

GROUPE DE TRAVAIL THEMATIQUE SCIENCES DE LA MATIERE

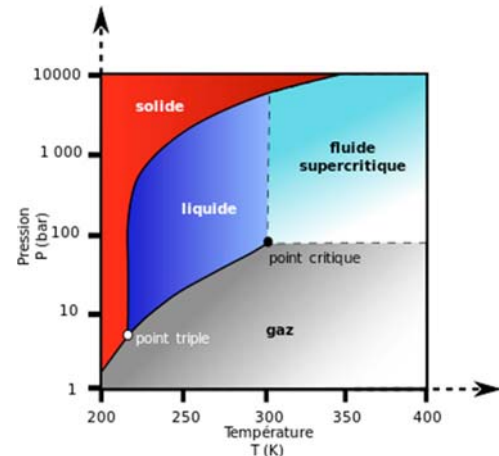
Président : Eric Falcon – *Thématicien* : Christophe Delaroche

Membres du GT : Harold Auradou, Hervé Combeau, Renaud Delannay, Pascale Domingo, Thierry Duffar, Pierre Haldenwang, Anke Lindner, Jean-Baptiste Manneville.

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. Et il faut généralement faire appel à la physique non-linéaire et à la physique statistique d'états hors d'équilibre pour modéliser ces phénomènes.

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 offre aux laboratoires scientifiques la possibilité de réaliser des expériences hors contraintes de gravité et permet ainsi de mettre en évidence des phénomènes inattendus où toutes les propriétés physiques peuvent s'exprimer.



Ces dernières années ont vu des avancées significatives dans la connaissance des propriétés fondamentales de la matière notamment grâce à la maturité acquise pour développer des instruments dédiés aux vols paraboliques et à l'ISS mais aussi par l'utilisation des moyens puissants de simulations numériques utilisant notamment la simulation en champ de phase, les architectures parallèles et les processeurs graphiques.

Cette dernière période depuis le séminaire de prospective de La Rochelle a permis l'observation de phénomènes nouveaux et leurs modélisations théoriques à l'aide de ces nouvelles puissances de calcul. Les propriétés dynamiques et statistiques de l'auto-organisation de la matière sont ainsi mieux comprises, notamment dans l'étude des états supercritiques, de l'évaporation, de la solidification, ou de la combustion.

1. Bilan et avancées depuis la prospective 2014

Les scientifiques utilisateurs de la micropesanteur issus de différents laboratoires de physique sont regroupés au sein d'un Groupement de Recherche du CNRS, le GdR Micropesanteur Fondamentale et Appliquée. Le GdR a été renouvelé (pour la cinquième fois) pour cinq ans en 2018. Il compte plus de 150 chercheurs du CNRS, du CEA et des Universités. Tous se réunissent chaque année pour discuter de leurs résultats et avancées scientifiques.

La période écoulée a vu notamment la réalisation du programme de l'instrument DECLIC dans l'ISS en coopération avec la NASA et aussi l'utilisation de l'instrument FLUIDICS installé dans l'ISS dans le cadre du projet PROXIMA.

En partenariat avec l'ESA, dans le cadre du programme ELIPS intégré aujourd'hui dans E3P sous le nom de SciSpace, les chercheurs français ont participé activement au sein des équipes de recherche organisées par l'ESA pour effectuer leurs expériences dans l'ISS ou en fusée sonde.

Nous présentons ci-dessous un bilan des activités menées dans les laboratoires du GDR et donnerons dans la section 2 les éléments de prospective correspondants pour les cinq années à venir.

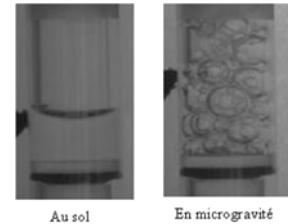
1.1. Matière molle et fluides complexes

La matière molle et les fluides complexes regroupent les mousses et émulsions, les granulaires et cristaux liquides ainsi que les écoulements fluides et 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 et de recalculer 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 et gels sont deux types de solides désordonnés. Les mousses liquides sont des dispersions de gaz dans une phase aqueuse qui peut-être un fluide complexe comme une émulsion (dispersion d'huile dans l'eau), ou encore une dispersion de particules colloïdales. Sur terre, la gravité conduit au drainage rapide de l'eau et au crépage des gouttes d'huile ou à la sédimentation des particules. Très rapidement, les mousses deviennent « sèches » avec, dans le cas des mousses de fluides complexes, un fort gradient vertical de densité. Les expériences en microgravité constituent une opportunité unique d'étudier le comportement des mousses « humides », en particulier au voisinage de la transition de blocage (dit de *jamming*) où la mousse passe d'un comportement solide à celui d'un liquide « bulleux ». L'enjeu est important pour les nombreuses applications : lors de leur fabrication, les mousses passent par le stade de liquide bulleux, dont le comportement n'a jamais pu être étudié sur terre.

Les dispersions de particules colloïdales (browniennes, taille inférieure au micron), sont soit des gels avec des particules attractives, soit des verres avec des particules répulsives. Sur terre, les contraintes dues au poids de ces particules ont un impact important sur la dynamique, voir l'existence même du système ; contraintes que la microgravité permet de supprimer. Le but est d'étudier la dynamique microscopique des verres et gels sollicités mécaniquement et en particulier lorsque la contrainte (ou la déformation) imposée dépasse le seuil d'écoulement ou est répétée dans le temps (essais de fatigue).



1.1.2. Milieux granulaires

La physique des milieux granulaires et des suspensions 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 du mouvement Brownien pour les particules inférieures au micron, de forces extérieures imposées (contraintes, pression, champ électrique ou magnétique...) et de la sédimentation. Cette dernière est difficilement contrôlable sur terre dans la mesure où elle implique l'utilisation de conditions d'isodensité qui réduisent drastiquement les domaines d'étude. Pour s'en affranchir l'ISS offre les conditions idéales.

Dans le domaine des granulaires, les expériences en microgravité sont souvent les seules permettant d'infirmier ou de confirmer les prédictions obtenues par simulation numérique. L'instrument VIPGRAN de l'ESA destiné à l'ISS, auquel le CNES participe activement, est en cours de développement pour l'étude du comportement des milieux granulaires (des régimes dilués à denses). Plusieurs résultats nouveaux ont été obtenus à l'aide d'un prototype en vol parabolique. L'existence d'une ségrégation entre de deux types de grains a été observée pour la première fois en microgravité, et l'origine de la transition d'un « gaz » granulaire vers un amas dense de grains, lorsque leur nombre augmente, a été comprise. Ces résultats ouvrent la possibilité d'étudier la formation des agrégats de type protoplanétaire aussi bien que le démon de Maxwell en physique statistique.

Dans un domaine voisin, l'écoulement de suspensions concentrées concernent de nombreux matériaux comme les ciments, les peintures, les composites fonctionnels, les céramiques etc... et des procédés de mise en forme basés sur l'extrusion de ces pâtes dans des moules ou via les imprimantes. La gravité joue là aussi un rôle important car, même une sédimentation sur la distance d'un diamètre de particule (de l'ordre du micron) est suffisante pour désolidariser la pâte des parois ou provoquer l'agrégation entre particules. On observe alors, dans certaines conditions d'écoulement, la formation d'agrégats de particules en contact frictionnel qui bloquent l'écoulement. Ce blocage peut être contrôlé par l'application d'un champ magnétique qui compense la gravité.

1.1.3. Biophysique

Les propriétés du sang et des interactions avec l'endothélium qui recouvre l'intérieur des vaisseaux sanguins est étudiée en collaborations entre laboratoires de physique, de biologie et de chimie. Ils visent à élucider les mécanismes fondamentaux (structuration, margination, agrégation) en utilisant les moyens d'accès à la microgravité pour s'affranchir de la sédimentation et dériver des lois générales prenant en compte les propriétés mécaniques variables des globules rouges ou des microcapsules.

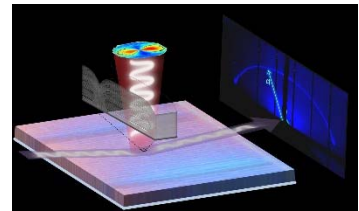
Le couplage sang/signalisation biochimique est simulé dans l'étude de la circulation du sang dans des réseaux complexes (agrégats, transport d'oxygène, partition hématocrite...) avec analyse de la signalisation biochimique (calcium et ATP qui est un nucléotide fournissant l'énergie nécessaire aux réactions chimiques).

Le dysfonctionnement endothélial est étudié en analysant les effets de la digestion enzymatique du glycocalyx (brosse de bio-polymères couvrant la paroi endothéliale) sur l'interaction de corpuscules sanguins. La digestion enzymatique mime l'effet de l'activité de l'amylase (augmentée en microgravité d'après des mesures sur des astronautes Russes).

La culture cellulaire et l'ingénierie tissulaire utilise la manipulation acoustique. La micropesanteur permet de valider les principes de création et de structuration spatiale d'agrégats de particules biologiques. La technique a été récemment améliorée en ajoutant une illumination spécifique des objets en lévitation.

1.1.4. Cristaux liquides

Dans le domaine des fluides complexes, les propriétés d'auto-organisation de la matière sont abordées par une nouvelles approche qui consiste à tirer parti des défauts topologiques d'un film de cristaux liquides. Ces défauts contrôlent de nombreuses propriétés de la matière condensée. En introduisant des nanoparticules dans ces cristaux liquides, on induit un piégeage des nanoparticules dans les défauts topologiques dont on peut suivre ensuite l'évolution. Ces défauts, de par leur taille et leur nature, orientent les nanoparticules dans leur déplacement et on peut ainsi contrôler l'assemblage de nanoparticules. La micropesanteur permet ici d'étirer des films liquides minces sans courbure.



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 échangeur thermiques ou encore, pour ce qui concerne le domaine supercritique, à l'extraction des huiles essentielles ou à la valorisation de la biomasse.

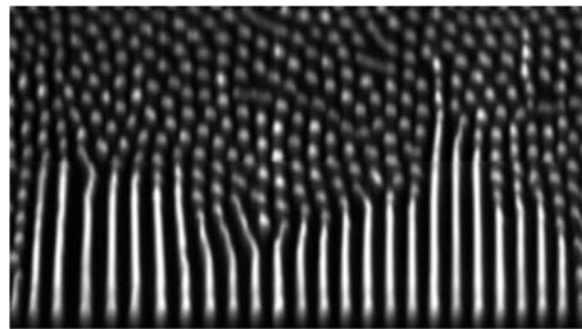
1.2.1. Solidification

La solidification concerne le changement d'état de la matière d'un état liquide à un état solide. Les projets d'expériences de solidification en micropesanteur sont nombreux en France. Grâce à l'action du CNES, de grands succès reconnus internationalement ont été obtenus, lors d'expérimentations préparatoires au sol et pendant les campagnes de vols paraboliques, de fusées sondes, et dans l'ISS. Notre compréhension de la formation des micro- et macro-structures de solidification a pu ainsi évoluer de manière spectaculaire. La croissance des cristaux et les instabilités morphologiques associées sont, en impesanteur, gouvernées uniquement par la diffusion de solutés et de chaleur, couplée à la réponse des interfaces solide-liquide. On explore ainsi les fondements de la formation des microstructures dans un contexte de physique non-linéaire des structures hors équilibre et on met en relief des phénomènes sensibles aux mouvements du fluide. Les microstructures de solidification sont la trace figée dans le solide de cette dynamique d'interface mobile. Elles déterminent les propriétés des matériaux ainsi élaborés. La recherche amont en solidification a un très fort impact industriel, notamment grâce aux simulations numériques pour lesquelles les équipes françaises sont à la pointe dans ce domaine.

Des alliages modèles se solidifient comme les métaux, mais ont l'avantage d'être optiquement transparents et de fondre à des températures faciles d'accès. Ils permettent d'observer en temps réel la morphologie de l'interface solide-liquide. L'insert DSI de l'instrument DECLIC est un projet en coopération CNES-NASA pour l'étude de la dynamique de motifs de forme cellulaire ou dendritique (alliages dilués). On obtient des résultats spectaculaires et inédits sur la sélection microstructurale et la dynamique d'ordre/désordre sous l'influence de distorsions du champ thermique ou de la cristallographie (compétition de grains, "cellules solitaires").

Des équipes du GDR participent aussi activement aux projets de l'ESA dans ce domaine :

L'instrument TRANSPARENT ALLOYS, installé début 2018 dans la Microgravity Science Glovebox (MSG) de l'ISS, a été conçu sur la base d'une méthode optique développée à l'INSP. Il permet l'observation *in situ* de la dynamique des structures de front de solidification biphasée (croissance couplée) dans les alliages « eutectiques ». Le succès a été total : performances de l'appareil, tenue en service des échantillons, et nouveaux résultats scientifiques. Pour la première fois expérimentalement, une transition morphologique entre fibres et lamelles a été mise en évidence. Une prochaine campagne doit avoir lieu début 2020, avec des échantillons « à gradient » et des alliages ternaires. L'analyse par simulations numériques est réalisée par le groupe de Mathis Plapp au LPMC. Ce groupe a développé de nouveaux codes de champ de phase pour inclure les effets d'anisotropie interfaciale.



La solidification à haute température des métaux est étudiée dans l'instrument XRMON et vise l'étude *in situ* de la croissance dendritique colonnaire ou équiaxe dans des échantillons d'alliages aluminium-cuivre par radiographie X en temps réel. Une première expérience a été réalisée en fusée sonde. Tandis que les vols paraboliques ont révélé une transition colonnaire-équiaxe par variation de pression hydrostatique lors des changements de gravité.

Les expériences CETSOL, à bord de l'ISS, ont aussi donné des résultats sur la transition colonnaire-équiaxe abruptes ou graduelles qui ont pu être analysés finement grâce aux simulations numériques.

L'insert MICAST (SIMAP) étudie les possibilités de contrôle de la convection dans le métal en fusion par action d'un champ magnétique. Le SIMAP collabore à la modélisation de l'expérience de référence au sol et développe de nouveaux modèles de croissance mixte colonnaire-équiaxe.

1.2.2. Evaporation et ébullition

Les activités sur la matière à l'état diphasique (liquide-gaz) sont menées par 5 laboratoires qui s'intéressent aux gouttes et aux bulles avec ou sans tension actifs. On étudie les phénomènes impliqués dans l'évaporation, le comportement des ponts capillaires et leur rupture et les régimes d'évaporation pulsants hautement ordonnés.

L'expérience RUBI de l'ESA coordonnée par l'IMFT est destinée à l'étude de l'ébullition sur site isolé, sous écoulement ou avec champ électrique. L'expérience sera lancée sur l'ISS en juillet 2019. Elle sera en opération pendant 4 mois. La croissance et le détachement des bulles seront filmés à l'aide d'une caméra rapide et la distribution de température à la surface de l'élément chauffant sera mesurée par une caméra infrarouge.

La vaporisation est le changement d'état d'un liquide à un gaz. Il peut généralement prendre la forme d'une ébullition ou d'une évaporation. L'objectif des recherches est de quantifier les effets des instabilités provoquées par les différences de densité. Ces phénomènes physiques de base sont présents dans de nombreux processus d'échange thermique. Concrètement, il s'agit par exemple d'évaluer les transferts de masse ou les transferts thermiques.

Ainsi pour les problématiques d'évaporation, il s'agit de préciser les mécanismes de l'évaporation du ménisque d'une goutte placée dans une phase gazeuse. Les expériences en microgravité permettent d'étudier hors perturbations la ligne de contact liquide-vapeur-solide qui joue un rôle fondamental dans le processus d'évaporation. En effet, l'évaporation est fortement couplée aux conditions limites et aux phénomènes se déroulant sur le bord de la goutte : diffusivité thermique et mouillabilité du substrat, phase gazeuse à l'interface de la goutte.

Le phénomène opposé de condensation est aussi regardé de près, il est présent dans de nombreux domaines techniques, y compris dans les applications spatiales. Une connaissance accrue permettrait par exemple d'optimiser la captation d'eau en milieu aride.

Pour le transfert de puissance, plusieurs techniques sont étudiées et parmi elles, les boucles fluides (monophasiques ou diphasiques) qui permettent un fort transfert. L'intérêt des boucles diphasiques est l'utilisation astucieuse de la chaleur de vaporisation qui permet de réduire les débits de masse et d'avoir des transferts de chaleur sur une plage étroite de température assurant une régulation précise. Cependant, la mise en œuvre de ces deux types des boucles se heurte à un manque crucial de connaissances importantes pour le dimensionnement. L'objectif des recherches menées en micropesanteur est, par déduction, d'apporter une meilleure compréhension des effets de la gravité sur la turbulence et l'organisation des écoulements diphasiques par exemple dans une conduite tubulaire.

1.2.3. Fluides supercritiques

La température au point critique concerne le point du diagramme des phases où la coexistence des phases liquide et vapeur se termine. Au-dessus de cette température, les propriétés physiques d'un fluide supercritique (densité, viscosité, diffusivité) sont alors intermédiaires entre celles du liquide et celles du gaz, tandis que d'autres divergent (tension de surface, compressibilité, ...).

En micropesanteur, les recherches sur les fluides placés au voisinage du point critique s'affranchissent de perturbations liées à la gravité. L'instrument DECLIC et ses inserts scientifiques leur a été dédié.

L'insert ALI a permis de paramétrer l'équation d'état universelle et de mettre en évidence l'importance de l'écart à la densité critique dans les comportements asymptotiques de type Ising à une proximité du point critique jusque-là inexplorée. Les fluctuations critiques ont été observées pour la première fois en direct dans l'espace.

Une avancée significative dans la compréhension et la caractérisation des lois d'accrochage des bulles sur les parois chaudes a aussi été réalisée grâce à l'insert ALI. Cela a permis de mieux appréhender la transition souvent catastrophique qui conduit à l'établissement d'un film de vapeur isolant à la surface des échangeurs. Les lois d'accrochage ainsi définies vont dans un proche avenir permettre d'optimiser un nouveau type d'échangeur très prometteur que sont les PHP ou Tubes pulsés oscillants.

L'insert HTI est dédié à l'étude du comportement de l'eau supercritique. Un effort technologique conjoint et soutenu des équipes CNES/CNRS et NASA a permis de maîtriser le passage à l'état supercritique de l'eau et de caractériser les effets de la présence de sels dans l'eau. En effet les sels sont les produits de combustion de la matière organique dans l'eau supercritique et il est important de mesurer les effets de leur accumulation locale sur la combustion. Ce mode de combustion, dite combustion froide, nécessite une faible énergie en comparaison d'une combustion classique et accélère les vitesses de réactions chimiques entraînant la décomposition très rapide de la matière organique.

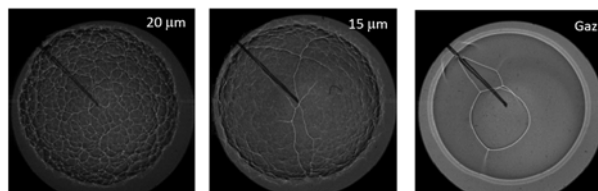
1.3. Instabilités, transferts et ondes

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 de la recherche scientifique sur la combustion en microgravité sont essentiellement d'accroître les connaissances sur les phénomènes fondamentaux de combustion, puis d'utiliser les résultats de la recherche pour faire progresser les technologies liées à la maîtrise de la combustion.

Les processus de combustion en gravité terrestre sont généralement fortement influencés par la convection naturelle. La recherche en microgravité permet de mener de nouvelles expériences dans lesquelles les écoulements et la sédimentation induits par la gravité sont pratiquement éliminés. Un environnement stationnaire propice à des résultats plus symétriques simplifie l'approche scientifique. Cela facilite les comparaisons avec les résultats de la modélisation numérique et avec les théories. On peut ainsi mettre en évidence des flux électrostatiques faibles, ou la thermocapillarité et la diffusion. Enfin, l'élimination des perturbations causées par les forces de flottabilité peut augmenter la durée des expériences, permettant ainsi l'examen des phénomènes à plus grande échelle temporelle.



Au niveau international, différentes équipes de recherche travaillent sur ces problématiques de combustion en microgravité, avec une forte représentativité de la part des États-Unis et du Japon. L'Europe est faiblement active, sauf en France où trois équipes sont soutenues par le CNES. La première concerne les recherches sur la combustion diphasique (spray combustibles), avec un volet expérimental, et un volet de simulation numérique, et la seconde concerne les études en combustion solide sur des flammes de diffusion et sur la production des suies.

1.3.2. Interfaces hydrodynamiques

La turbulence d'ondes concerne l'étude des propriétés dynamiques et statistiques d'un ensemble d'ondes en interaction non linéaire. Sur le plan fondamental, c'est une configuration dans laquelle le spectre d'énergie peut être prédit analytiquement dans la limite d'interactions faibles. Les applications sont diverses et concernent par exemple, les vagues à la surface des océans, les ondes d'Alfvén dans les plasmas astrophysiques ainsi que de nombreux dispositifs expérimentaux dont l'étude a connu un fort développement au cours de ces dix dernières années. L'intérêt de la microgravité 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) ont montré un bon accord avec les prédictions théoriques de la turbulence faible.



L'étude d'ondes à l'interface entre un liquide et sa vapeur au voisinage du point critique liquide-vapeur permet de varier les paramètres intervenant dans la relation de dispersion des ondes et d'examiner les conséquences sur la propagation et l'atténuation des ondes.

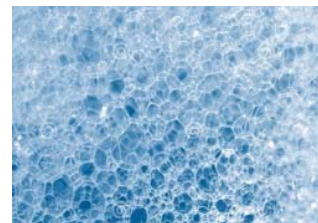
2. Recommandations du groupe

Priorités du programme de recherche en Sciences de la Matière

2.1. Matière molle et fluides complexes

2.1.1. Mousses et émulsions

A court terme, l'enjeu est la préparation des échantillons pour la micropesanteur basée sur des expériences préliminaires au sol en cours depuis plusieurs années. Ces expériences sont réalisées grâce à des instruments originaux qui couplent rhéologie et diffusion de la lumière (diffusion multiple pour les mousses). Pour les mousses, le but est d'élucider les dynamiques de vieillissement (mûrissement et coalescence), pour les gels et verres, d'étudier la dynamique microscopique sous sollicitation mécanique. Des expériences dans l'ISS sont prévues à partir de 2019 avec l'instrument FOAM-C de l'ESA pour les mousses et avec le Light Microscopy Module de la NASA pour les gels, puis l'instrument de diffusion de la lumière COLIS de l'ESA psera utilisé pour les gels et les verres.



A moyen/long terme, les objectifs sont les suivants :

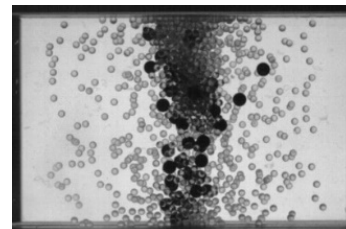
- Caractérisation et compréhension de la dynamique lors de la transition vitreuse (verres) ou de jamming (gels et mousses), ainsi que du rôle des contraintes gravitationnelles.
- Compréhension de l'origine microscopique de la transition solide-fluide qui découle d'une sollicitation externe pour les gels et verres. Pour les mousses, cette étude était prévue, mais n'a pu être mise en œuvre dans FOAM-C (projet REFOAM) du fait de restrictions budgétaires à l'ESA.

Les retombées seront multiples, outre la clarification des transitions vitreuses et de jamming sur le plan fondamental, les applications bénéficieront d'une compréhension plus fine des mécanismes responsables de la défaillance de matériaux désordonnés. Les procédés de fabrication des mousses pourront être optimisés, ce qui permettra par exemple de réaliser (après solidification) des matériaux nouveaux pour la construction ou la santé (biocompatibles).

2.1.2. Milieux granulaires

Les expériences à venir, menées en vol parabolique, devraient permettre de clarifier le rôle de la gravité sur les interactions particule-paroi et inter-particulaires ainsi que ses conséquences sur l'écoulement de suspensions.

Dans le cas des granulaires secs, la participation au projet VIPGRAN de l'ESA devra se poursuivre jusqu'à la réalisation des expériences prévues de 2021 à 2024 dans l'ISS. L'excellent niveau de microgravité permettra d'étudier des régimes inaccessibles sur Terre comme la dynamique de relaxation d'un



granulaire (lorsque l'excitation est stoppée), la rhéologie d'un granulaire proche du seuil de la transition de blocage (jamming), ainsi que la propagation du son dans un granulaire sans pression de confinement des grains dues à leur poids. Enfin, déplacer un granulaire sur Terre est aisé par l'intermédiaire de la gravité, mais devient un défi majeur en impesanteur : l'application de vibrations au milieu au sein d'une cellule semi-cloisonnée serait une solution et répondrait aussi à des questions ouvertes en physique statistique des systèmes hors d'équilibre.

2.1.3. Biophysique

L'étude du dysfonctionnement endothéliale (interaction globules rouges / paroi des vaisseaux sanguins) se poursuivra en vol parabolique puis dans l'ISS par des expériences sur réseau microfluidique. Elle comprendra l'évaluation de l'effet de la digestion enzymatique de la brosse de bio-polymères couvrant la paroi interne des vaisseaux sanguins.

La culture cellulaire et l'ingénierie tissulaire permettront de valider les principes de création et de structuration spatiale d'agrégats de particules à l'aide d'illumination spécifique d'objets en lévitation acoustique.

A long terme ces techniques de lévitation acoustique en gravité artificielle permettront de générer des constructions biologique 3D. La perspective est donc de valider une culture cellulaire sur plusieurs heures / jours dans la station spatiale.

Le projet d'instrument PIVO (Photoacoustique In vivo) qui permet une mesure indirecte et non-invasive de la vitesse de sédimentation devra effectuer une campagne de vol parabolique en 2019/2020 afin de tester le dispositif sur un circuit micro-fluidique simulant un réseau sanguin. A plus long terme cet instrument assisté par simulation numérique permettra de remonter à la statistique spatiotemporelle d'agrégats de globules rouges.

2.1.4. Cristaux liquides

Le but sera de poursuivre les travaux engagés sur l'assemblage de nanoparticules sur des films de cristaux liquides dans le cadre d'expériences programmées dans l'ISS, en coopération avec la NASA, et en utilisant des campagnes de vols paraboliques dans le cadre d'une coopération avec le DLR qui s'intensifie.

2.2. Etats et transitions d'état de la matière

2.2.1. Solidification

La recherche sur les matériaux modèles transparents se poursuivra avec l'insert DSI-R2 de DECLIC dans lequel une modification de l'insert permettra d'effectuer une mesure de température directe de l'interface solide-liquide. Cela permet d'explorer la carte des morphologies en fonction des paramètres de contrôle.

De nouveaux projets seront proposés qui concernent le contrôle adaptatif utilisant une micromanipulation par chauffage local au laser et la solidification de cristaux facettés.

Le projet TRANSPARENT ALLOYS devra tirer bénéfice de l'implantation en cours de moyens de calcul utilisant des cartes graphiques (GPU). Cela conduira à une démultiplication (deux ordres de grandeur d'après les récents tests) de l'efficacité des simulations.

La participation à XRMON devra se poursuivre pour mettre en évidence les interactions diffusives entre cristaux en croissance, et pour montrer des effets d'inversion du sens de la solidification par rapport à la gravité.

Pour CETSOL et MICAST il faudra prendre en compte les nouvelles exigences relatives aux expériences de solidification dans l'espace qui ont été formulées en 2017 et transmises par les partenaires à l'ESA.

2.2.2. Evaporation et ébullition

La campagne d'essai de l'instrument RUBI qui arrive dans l'ISS en juillet 2019 devra permettre de recalculer les modèles de transport d'énergie en diphasique. A plus long terme, on attend le développement de l'expérience ESA Flow Boiling à laquelle on participera activement.

A terme, les équipes vont chercher à avancer plus encore sur le mouillage et l'évaporation de fluides complexes. Avec un œil attentif sur le déplacement de la ligne triple aux premiers instants de l'étalement en fonction de la nature des substrats en passant d'hydrophiles à hydrophobes. Enfin, il faudra poursuivre les nouvelles recherches qui s'intéressent depuis peu à la transposition de la microfluidique en situation de microgravité.

2.2.3. Fluides supercritiques

Afin de répondre aux nouvelles exigences scientifiques et techniques, les différentes configurations expérimentales permettront de travailler en flux et seront miniaturisées. L'objectif est de poser les bases du traitement de la matière organique dans l'eau supercritique. Cela a un intérêt certain pour la neutralisation des déchets toxiques, la valorisation de la biomasse et, en particulier pour les futures missions d'exploration habitées qui nécessitent des moyens de traitements embarqués. C'est en vue de ces futures applications que le CNES et la NASA ont convenu de poursuivre ce programme de recherche en développant un nouvel insert SCWO pour le programme DECLIC Évolution.

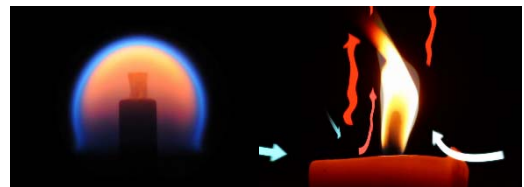
L'insert SCOW de DECLIC-Evolution sera ainsi utilisé pour poursuivre les études des flammes hydrothermales de combustion froide dans la perspective d'un processus de traitement continu avec séparation et récupération des produits de combustion : eau pure, sels, CO₂ valorisable.

Il est aussi recommandé d'utiliser cet insert pour l'étude de la chiralité des molécules produites par la combustion hydrothermale pour étayer l'hypothèse d'une origine de la vie à grande profondeur sur les dorsales océaniques à haute température.

2.3. Instabilités, transferts et ondes

2.3.1. Combustion

Tant pour l'étude de la combustion solide que pour celle des sprays liquide, l'accès simultané à l'ensemble des informations produites par les diagnostics développés en vol parabolique constitue une première et laisse entrevoir des perspectives extrêmement prometteuses.



L'introduction d'un certain nombre de processus physiques supplémentaires non pris en compte par les modèles actuels permettrait un apport significatif dans la prédiction de la combustion des sprays et des solides. La validation préalable des modèles proposés nécessite une comparaison minutieuse avec des expériences mettant en jeu ces différents processus pour des conditions thermodynamiques proches de celles rencontrées dans les applications industrielles.

Les travaux de recherche se poursuivront notamment via des coopérations bilatérales afin de pouvoir effectuer des mesures sur les temps longs auxquelles seules les stations spatiales donnent accès.

Ces travaux permettront d'aborder les questions de sécurité relatives aux incendies, notamment à bord des engins spatiaux.

2.3.2. Interfaces hydrodynamiques

L'activité à court terme va consister à étudier l'influence d'autres paramètres, tels que la rotation d'ensemble du fluide sur la turbulence d'ondes.

A moyen terme, les régimes d'équilibre statistique que nous avons observés pour les ondes à échelle plus grande que celle du forçage, seront étudiés quantitativement. Il faudra dans ce cas considérer des quantités au-delà des spectres, telles que les corrélations à deux temps en deux points. Il sera également intéressant de pouvoir poursuivre ces expériences à bord de l'ISS en utilisant une méthode d'excitation des ondes plus appropriée.

A plus long terme, il sera intéressant d'étendre les études au voisinage du point critique liquide-vapeur au régime diphasique, c'est-à-dire à des configurations impliquant un brouillard de gouttes liquides dans sa vapeur ou des bulles de vapeur dans le liquide (nouvel insert AEROSOL). Un problème fondamental est de déterminer comment les échanges de chaleur latente liés à la transition liquide-vapeur agissent sur l'atténuation des ondes acoustiques. Plus intéressant sur le plan des applications potentielles est d'arriver à amplifier une onde par un bon phasage des échanges de chaleur. Ces études concernent le problème général de couplage entre écoulement et transition de phase qui peut jouer un rôle important en turbulence diphasique. Des applications potentielles peuvent concerner la physique des nuages.

2.4. Objectifs transverses sociétaux

Les sciences de la matière telles qu'étudiées en micropesanteur sont une recherche fondamentale des propriétés physique de la matière qui se situe très en amont de la recherche et développement, et des applications. Néanmoins, ces travaux étudient des questions posées par des problèmes sociétaux d'actualité, pour lesquels les organismes de recherche appellent à contribuer.



La transition énergétique nécessaire ouvre plusieurs voies de recherche pour mieux utiliser les énergies fossiles et limiter les émissions carbonées et pour sécuriser les sources d'énergie alternatives. Ainsi, la micropesanteur se met au service du stockage du CO₂ dans les aquifères profonds en contribuant à l'optimisation et à la quantification des phénomènes de diffusion. Nous participons à la détermination des conditions idéales de combustion. Et nous menons aussi de nombreux travaux sollicités par l'industrie nucléaire et les énergies alternatives pour en sécuriser et en optimiser la production.

Les recherches sur la combustion froide dans l'eau supercritique, sans émission de NO_x, permettront de détruire les déchets organiques dangereux, de retraiter les boues industrielles et de valoriser la biomasse.

En matière de santé, la suppression des forces hydrostatiques dans les vaisseaux sanguins permet de mieux comprendre les mécanismes de la circulation et les interactions entre les globules rouges et les parois qui régissent les réactions inflammatoires et les mécanismes auto-immunitaires. De plus, l'absence de gravité permet de mieux maîtriser les mécanismes de croissance des tissus biologiques en vue de produire et de réparer des organes affectés. Enfin, nous participons à la recherche des moyens de dispersion dans le corps humain de substances actives encapsulées dans des objets biomimétiques.

Les rapports du GIEC identifient depuis plusieurs années le manque de connaissance sur le fonctionnement des nuages et les transferts d'énergie qui s'y déroulent. Les applications aidant à l'amélioration des modèles climatiques et aux prédictions météorologiques sont tirées des recherches sur la turbulence et la nucléation de l'eau (nouvel insert AEROSOL).

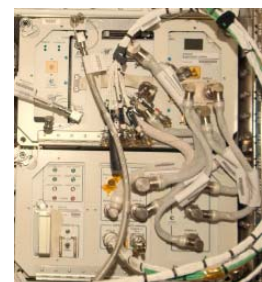
Toutes ces recherches utilisant la micropesanteur, trouvent des résultats qui sont évidemment directement applicables à la physique dans l'espace. De nombreuses applications à l'industrie spatiale et à l'exploration spatiale peuvent en tirer bénéfice.

Mais en amont de toutes ces applications, la micropesanteur trouve son maximum d'intérêt dans la recherche fondamentale des propriétés physique de la matière, notamment les propriétés d'auto-organisation qui se produisent lors des changements de phase et qui en régissent les propriétés mécaniques, thermiques, électriques de la matière.

2.5. Synthèse des recommandations

2.5.1. Priorités du programme de recherche en Science de la Matière

Dans les années qui viennent, nous soutiendrons la continuation du programme DECLIC-Evolution dont les nouveaux inserts sont en phase A. Les recherches qui sont faites dans ces inserts scientifiques sélectionnés en coopération avec la NASA ne pourraient pas être effectuées en dehors de l'ISS. Ces recherches ne sont pas prises en compte à notre connaissance par les autres agences spatiales et c'est une vraie spécificité française. De plus ce programme est approuvé par la NASA qui s'est engagé à transporter l'instrument et les inserts dans l'ISS.



Les sujets de recherches du programme DECLIC-Evolution sont :

- Le paramétrage des équations d'état universelles des fluides supercritiques : insert ALI existant

- La solidification de matériaux modèles transparents : insert DSI existant auquel il faut ajouter une sonde de température
- La combustion froide dans l'eau supercritique : nouvel insert SCOW
- La nucléation de l'eau : nouvel insert AEROSOL

Pour les deux nouveaux inserts, nous donnons une priorité à AEROSOL

Pour les futurs projets, nous soutiendrons les propositions d'instrument en physique fondamentale pour lesquelles la micropesanteur est incontournable. En priorité, nous souhaiterions pouvoir développer un instrument adapté à l'étude de la turbulence d'ondes.

En seconde priorité, pour les projets futurs, nous soutiendrons les projets interdisciplinaires. En effet, la micropesanteur est un des rares lieu où les échanges entre physiciens et biologistes sont facilités. Le CNES a ici une possibilité unique de favoriser ces rencontres et de décloisonner ces disciplines. Il nous semble nécessaire de soutenir cette spécificité.

Au-delà des sciences de la matière, nous soutiendrons aussi les projets trans-thématiques où nous pourrions apporter un soutien fondamental à la santé, la météorologie, la climatologie, la planétologie... en apportant des modèles construits sur les propriétés universelles, hors gravité, de la matière.

2.5.2. Sélection des propositions de recherche

Entre atomes, molécules ou particules subatomiques, les interactions électrostatiques ou nucléaires dominent et la micropesanteur ne modifie pas le comportement de ces assemblages. Par contre, et essentiellement en mécanique des fluides, quand l'échelle de longueur typique est grande devant la longueur capillaire, la gravité déforme la matière et brise la symétrie haut/bas de l'interface compliquant ainsi les études et la modélisation des phénomènes étudiés. En particulier, au voisinage du point critique où la compressibilité diverge, le fluide va se stratifier sous son propre poids. De même, une bulle d'air dans un liquide, sur Terre, va toujours remonter à la surface. Par conséquent, pour sélectionner une proposition de recherche en micropesanteur, on s'intéresse aux nombres sans dimension qui régissent le phénomène à étudier. Si ces nombres ne peuvent pas être retrouvés par un astuce expérimentale au sol, l'accès à la micropesanteur sera accordé.

Les nombres de Bond, Grashof, Rayleigh, Reynolds... sont des exemples de grandeurs sans dimension quantifiant le rôle respectif de la gravité/capillarité, de la gravité/viscosité, de la convection/diffusion, de l'inertie/viscosité... et qui vont ainsi permettre de déterminer l'intérêt des propositions. Si les nombres sans dimension issus des équations du problème ne contiennent pas la gravité g , alors la microgravité n'est clairement pas nécessaire. Dans le cas contraire, les propositions à retenir seront celles où l'influence de g sera significative dans ces nombres, et où on ne pourra pas simuler la diminution de g dans ce nombre par le changement d'un autre paramètre. En effet, s'il suffit de diminuer la taille des gouttes, de travailler avec deux fluides iso-densité, ou avec de faibles gradients de température, les expériences au sol seront privilégiées, à condition de pouvoir rester dans une gamme des paramètres où les mesures ne sont pas affectées.

Aujourd'hui les phénomènes nécessitant une étude en micropesanteur ont bien été identifiés et nombreux sont les cas où seule la présence de deux milieux de densité très différentes permet d'accepter la proposition de recherche, sous réserve que les perturbations inhérentes aux moyens d'accès disponibles ne dépassent pas l'amplitude des phénomènes à observer.

2.5.3. Tableau de synthèse

Type de mesure/d'observables	Cadre de réalisation	Engagement	R&T associée	Thème scientifique
Auto-organisation de la matière				
Condensation de l'eau et influence de la turbulence sur la nucléation de l'eau	DECLIC-Evo (NASA) Insert AEROSOL	Projet engagé avec la NASA En phase 0 au CNES	/	<i>Condensation de l'eau Transfert d'énergie</i>
Solidification des matériaux	DECLIC-Evo (NASA) Insert DSI-R2	Projet engagé avec la NASA En phase A au CNES	Sonde de température rétractable	<i>Structure des matériaux</i>
Combustion de la matière organique dans l'eau supercritique	DECLIC-Evo (NASA) Insert SCOW	Projet engagé avec la NASA En phase 0 au CNES	Microfluidique	<i>Propriétés de l'eau supercritique</i>
Transfert d'énergie dans les fluides supercritiques	DECLIC (NASA) Insert ALI	Insert disponible Non prioritaire pour la NASA	/	<i>Equations d'état</i>
Turbulence d'ondes	CNES	à engager	/	<i>Turbulence</i>
Propriétés universelles de la matière				
Matière molle et fluides complexes, états et transitions d'état	ESA Scispace	Projets engagés A soutenir	/	<i>Propriétés de la matière</i>
Propriétés de la matière où la micropesanteur est absolument nécessaire	/	à engager en fonction des propositions de recherche	/	<i>Science fondamentale de la matière</i>
Inter et trans-disciplinarité				
Projets inter et transdisciplinaires	/	A poursuivre ou à engager	/	<i>Santé, exobiologie, climat, météo</i>

Glossaire

AEROSOL : Insert de DECLIC pour l'étude de la condensation de l'eau et des aérosols
ALI : Insert de DECLIC pour l'étude des Fluides Supercritiques
CETSOL : projet ESA pour l'étude de la solidification des alliages d'Aluminium
COLIS : projet ESA pour l'étude des colloïdes solides
DECLIC : Instrument scientifique dédié à l'étude des changements de phase dans les milieux transparents
DSI : Insert de DECLIC pour l'étude de la solidification
E3P : European Exploration Envelope Program
ELIPS : European Program for Life and Physical Sciences in Space
FLUIDICS : Instrument scientifique dédié à l'étude de la turbulence d'onde
FOAM : projet ESA pour l'étude des mousses
GdR MFA : Groupement de Recherche Micropesanteur Fondamentale et Appliquée réunissant les chercheurs utilisant la microgravité
GdR : Groupement de Recherche du CNRS
MAP : Microgravity Application Project, projets ESA financés en partenariat avec des industriels
MICAST : projet ESA pour l'étude de la solidification des matériaux
RUBI : projet ESA pour l'étude de l'ébullition
SciSpace : Suite du programme ELIPS de l'ESA, intégré à E3P
SCOW : Insert de DECLIC pour l'étude de la combustion dans l'eau Supercritiques
VIPGRAN : projet ESA pour l'étude des granulaires vibrés
XRMON : projet ESA pour l'étude de la solidification des matériaux observée sous rayonnement X