

GROUPE THEMATIQUE

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.

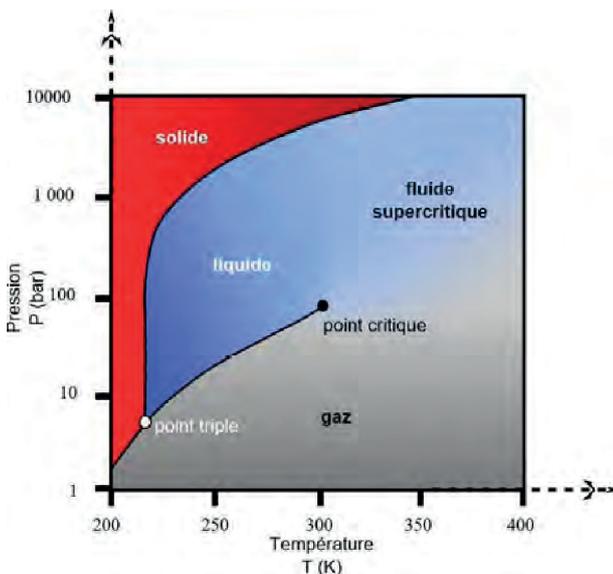


Fig.1 : Diagramme de phase du dioxyde de carbone, présentant les courbes d'équilibre entre les différents états.

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.

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 de grains (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.

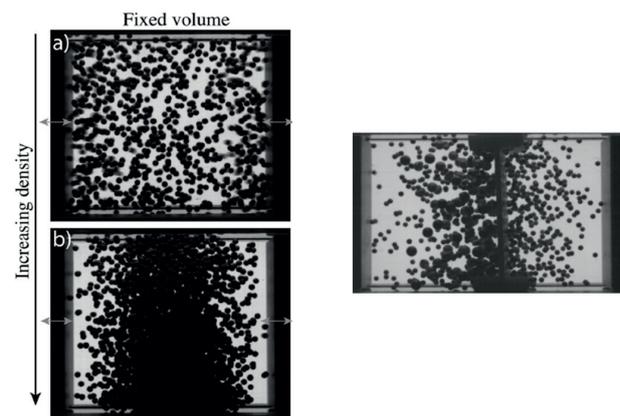


Fig.2 Visualisations en micropesanteur d'expériences sur milieux granulaires :

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.

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).

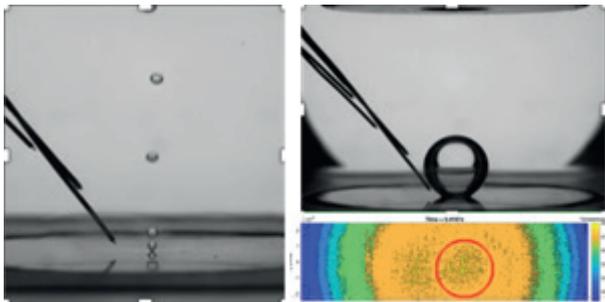


Fig.4 : expérience Rubi
(gauche) ébullition à gravité terrestre ;
(droite) ébullition en microgravité et champ de température associé (cercle rouge : pied de bulle)

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 bou-

chons 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.

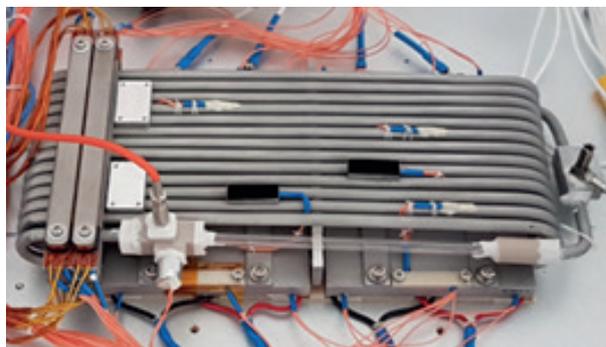


Fig.5 : Prototype de caloduc oscillant pour l'appareil HTH-1 de l'ESA.

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.

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 mon-

tré 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.

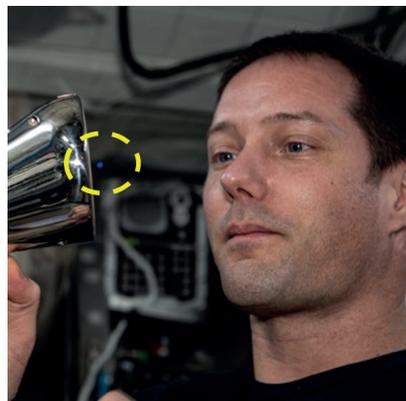


Fig. 8 : Utilisation de la pince acoustique TELEMAQUE pour piéger une bille (entourée en jaune) par Th. Pesquet lors de la mission Alpha (Juillet 2021).

2.2.2 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 démarre 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 Super-Critical 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.

pensable 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
Micro-physique des nuages	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 ?
Combustion bas carbone	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 ?
Etude des grandes échelles en turbulence d'ondes	Dynamique d'interface	Fluidics_L Phase A au CNES Coopération Esa	Validation Vols Paraboliques	Engagement visé fin 2024
Mousses Transferts d'énergie Milieux granulaires	Rhéologie du murissement Evaporation de gouttes Milieu granulaire sous vibration	Esa SciSpaceE		Cadre programmatique Esa fondamental
Programmes inter-disciplinaires Energie - Climat Combustion - Biophysique		Esa SciSpaceE, 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.