

SYNTHÈSE SCIENCES DE LA VIE DANS L'ESPACE

Nés sur Terre, l'espèce humaine mais aussi le monde animal et végétal ont été façonnés par la gravité. C'est donc un défi majeur pour l'homme que d'échapper à la pesanteur. Depuis le début des activités spatiales, les sciences de la vie en micropesanteur et la médecine spatiale ont fait d'immenses progrès. Elles commencent à développer les contre-mesures qui pourraient permettre de vivre dans ce milieu hostile et à entrevoir le rôle de la gravité dans le développement et le fonctionnement des organismes vivants.

Les programmes en bioastronautique se sont multipliés depuis l'aboutissement d'un demi-siècle d'expériences lors de vols spatiaux habités. Les résultats médicaux et physiologiques de ces missions ont démontré les effets dramatiques que ces derniers ont sur la quasi-intégralité des systèmes physiologiques, causant entre autres une atrophie musculaire, une déminéralisation osseuse, des dysfonctionnements métaboliques et cardiovasculaires, une altération du développement cognitif, une diminution de la réponse immunologique et du métabolisme/nutrition. Ces réponses adaptatives conduisent à un déconditionnement physiologique dans l'espace et peuvent affecter la santé et les performances de l'équipage en vol et après le retour sur Terre.

La communauté scientifique travaillant sur les sciences de la vie en microgravité dispose d'un certain nombre de moyens spatiaux et terrestres afin d'effectuer ses expériences : Station Spatiale Internationale, capsules récupérables, vols paraboliques et simulation au sol (bedrest à -6°, centrifugeuse et immersion).

Deux bassins d'immersion ont été installés dans la clinique spatiale du MEDES en 2014. L'immersion dans un liquide est l'état naturel de nos cellules, celui de nos ancêtres aquatiques et même le nôtre durant les neuf mois que dure la période prénatale. Les propriétés curatives de l'immersion dans l'eau sont bien connues et utilisées depuis des siècles. Paradoxalement, cependant, le regain d'intérêt des scientifiques pour l'immersion dans l'eau ne le doit aucunement à quelque expérience préalable, mais bien au développement des programmes spatiaux. L'apesanteur est la cause de nombreux changements physiologiques qui affectent les systèmes nerveux, sensoriel, cardiovasculaire, musculosquelettique et bien d'autres. Les opportunités expérimentales durant les vols spatiaux effectifs étant limitées, des installations sol sont nécessaires.

Ces modèles permettent d'évaluer les effets de déconditionnement induits par la microgravité et révèlent les mécanismes gravitationnels à l'œuvre dans les systèmes physiologiques du corps, ainsi que dans l'adaptation du corps à la microgravité. Ils permettent en particulier aux chercheurs de développer et de tester des mesures visant à contrer les effets délétères de la microgravité. L'immersion est l'un de ces modèles puisqu'elle crée des conditions extrêmement proches de celles d'un environnement sans gravité.

Depuis trente ans, le CNES participe à des expériences sur les rats et les souris avec Biocosmos et Bion.

En 2013, trois équipes du CNES ont participé au programme Bion-M1 (physiologie cardiovasculaire, métabolisme des muscles et os). Ils avaient pour mission :

- D'étudier par télémetrie la régulation de la tension artérielle et de la fréquence cardiaque pendant la durée d'un vol Bion-M1. Pour les humains, ces cycles sont modifiés.
- D'étudier plusieurs adaptations métaboliques. On a en effet pu montrer que l'hypokinésie et l'hypodynamie causées par l'apesanteur peuvent affecter le renouvellement énergétique et à la capacité à absorber les triglycérides circulants et les acides gras non estérifiés, qui, à leur tour, affectent les voies de l'influx d'insuline dans tout le corps. Les mécanismes sous-jacents n'ont pas encore été correctement étudiés et on a pu émettre plusieurs hypothèses. Celles-ci concernent des protéines régulatrices spécifiques en lien avec le renouvellement des lipides et de l'énergie, et l'accumulation d'intermédiaires lipidiques qui peuvent interférer avec l'insuline et les fonctions mitochondriales. Afin de déterminer le réseau métabolique en jeu lorsque les souris sont soumises à la microgravité, on a pu proposer des approches protéomiques et métabolomiques différentielles ont été proposées. On comparera ces données afin de mieux comprendre les mécanismes à l'œuvre durant les périodes de bedrest chez les humains, pour lesquels nous sommes actuellement en train d'analyser les biopsies du soléaire et du vastus lateralis. Sur le long terme, ces résultats nous aideront à définir de nouveaux leviers qui nous permettront de développer une nouvelle génération de contremesures.

- D'étudier les altérations de l'os trabéculaire et les changements de cellules osseuses concomitantes. En bref, lors d'une perte osseuse, on a constaté que les os trabéculaires restants étaient plus fins. Tandis que la formation des os avait diminué régulièrement, l'activité de réabsorption n'était pas systématiquement altérée. Ces altérations cellulaires sont sans doute différentes de celles qu'on a pu constater chez les astronautes à partir de marqueurs sériques et urinaires. Comme la croissance des rongeurs se poursuit, la perte osseuse peut également être vue comme la conséquence d'une altération de l'expansion longitudinale et du périoste.

Cette nouvelle approche intégrée de la physiologie est nécessaire pour la recherche en bioastronautique. Elle est évidemment renforcée par les récents développements en biologie moléculaire et les nouvelles technologies analytiques comme les « omiques ».

La recherche en bioastronautique a des applications pour la médecine terrestre, notamment pour la physiopathologie du métabolisme : les questions nutritionnelles liées à la recherche en bioastronautique sont également pertinentes pour résoudre de multiples problèmes de santé sur Terre. Les retombées potentielles sont d'une grande importance clinique (syndrome métabolique, insulino-résistance, dyslipidémie, diabète, etc.).

Le système musculo-squelettique joue un rôle essentiel pour la locomotion et la posture. Le maintien de la stabilité de la fonction corporelle est donc important pour garantir la réussite de la mission ainsi que la santé des astronautes avant et après cette dernière. Sans contre mesure, tous les composants du système musculo-squelettique s'adaptent aux conditions de microgravité et peuvent endommager la structure et la fonction des tissus. La solidité et la masse des os sont réduites, tout comme la masse musculaire. De plus, la morphologie est altérée, avec une perte de la force et de l'endurance des muscles. Nous devons repenser notre approche des contre mesures.

La contre mesure idéale doit :

- pouvoir protéger le plus de fonctions corporelles possibles, sans endommager les fonctions corporelles non-ciblées (comme par exemple, l'effet de la supplémentation en protéine sur les os),
- être facile à mettre en œuvre (sans l'aide d'appareils lourds, encombrants ou coûteux),

- ne pas être coûteuse en temps pour l'équipage (comme par exemple des programmes d'exercices physiques).

L'approche actuelle ne respecte pas ces indications et multiplie les contre mesures. Cela monopolise le temps de l'équipage, diminuant ainsi sa disponibilité pour effectuer des activités de recherche et nous empêchant de tirer pleinement profit de tout ce que peut nous apporter la Station Spatiale Internationale.

On pourrait développer des approches novatrices :

- considérer l'impact de « l'écosystème Station Spatiale Internationale » sur la santé des astronautes à travers un impact sur le stress, le sommeil, le rythme et l'apport alimentaire,
- tester les effets de la méditation/relaxation durant les campagnes de bedrest ou dans des installations analogues isolées (sous-marins, stations polaires),
- il est actuellement impossible de démontrer que l'exercice est physiologiquement trop coûteux pour les astronautes.

Il sera d'ailleurs possible d'envisager une coopération avec la Russie et la Chine sur ces programmes.

Durant ces quatre dernières années, la coopération internationale s'est développée, notamment avec la Chine. Dans ce contexte, nous espérons renforcer la coopération avec d'autres partenaires comme le Brésil ou le Japon pour les quatre prochaines années.



SYNTHESIS LIFE SCIENCES IN SPACE

Born on Earth, mankind as well as animals and plants have been shaped by gravity. It is therefore a major challenge for man to escape gravity. Ever since the beginning of space studies, life sciences in microgravity and space medicine have made tremendous progress. They have begun to develop countermeasures which could help us Live in this hostile environment and better understand the role of gravity in the development and functioning of living organisms.

Human bioastronautics programs have grown since the culmination of 50 years of human space flight experience. Medical and physiological findings from these missions have demonstrated that spaceflight has a dramatic impact on almost all physiological systems including muscle atrophy, bone demineralization, cardiovascular and metabolic dysfunctions, impaired cognitive processes and reduced immunological competence, and nutrition/metabolism. These adaptive responses lead to a physiological de-conditioning in space and have the potential to affect crew health and performance both in space and upon return to Earth.

The scientific communities working on Life Sciences in the microgravity environment have access on a number of different existing space- and ground-based facilities to conduct their experiments: International Space Station, recoverable capsules, parabolic flights and ground simulation (bedrest at -6° , centrifuge, and immersion).

Two immersion baths have been installed in MEDES (space clinic) in 2014. Immersion in fluid is the natural state for our cells, for our aquatic ancestors, and even for ourselves during the 9-month prenatal period. The curative properties of immersion in water have been known and exploited for centuries. Somewhat ironically, however, the current growing scientific interest in water immersion is due not to prior experience, but rather to the development of space programs. Weightlessness causes numerous physiological changes, which affect the musculoskeletal, cardiovascular, sensory, nervous, and other systems. Experimental opportunities during actual space flight are limited, so ground-based models are necessary. These models allow the assessment of microgravity induced deconditioning effects, and reveal gravitational mechanisms in the body's physiological systems, as well as mechanisms involved in adaptation of the body to microgravity. In particular, they allow researchers to develop and

test measures to counter the deleterious effects of weightlessness. Immersion is one such model, because it creates conditions that closely resemble the gravity-free environment.

For thirty years, CNES has been participating in studies of rats and mice with Biocosmos and Bion.

In 2013, 3 CNES teams participated in the Bion M1 program:

- To study the regulation of blood pressure and heart rate for the duration of a Bion M1 flight by telemetry. In humans, the cycles are modified.

- To study the numerous metabolic adaptations: indeed it was shown that both the hypokinesia and the hypodynamia induced by weightlessness affect the energy turnover and capacity to uptake circulating triglycerides and non-esterified fatty acids which, in turn, affect the whole body insulin signalling pathways. The underlying mechanisms have not been properly studied and several hypotheses were made. Those involved specific regulatory proteins in relation to energy and lipid turnover and the accumulation of lipid intermediaries that may interfere with both insulin and mitochondrial functions. In order to determine the metabolic network at play during exposure to actual microgravity in the mice, differential proteomic and metabolomic approaches were proposed. This data will be compared to ascertain what mechanisms are at play in humans during bedrest, for which we are currently analysing soleus and vastus lateralis biopsies. In the long term those results will help to delineate new levers on which a new generation of countermeasures can be developed.

- To study the knowledge of trabecular bone alterations and concomitant bone cellular changes. In brief, with a bone loss, thinner remaining trabeculae were reported. While bone formation was regularly reported to have decreased, reabsorption activity was not always impaired. These cellular alterations might be different from those which were reported, based on serum or urine markers, in human cosmonauts. Since the rodents are still growing, the bone loss is also seen as the consequence of altered longitudinal and periosteal expansion.

The new integrated physiology approach is necessary for bioastronautics research; this integrative approach is obviously enhanced by recent developments in molecular biology and new analytical technologies such as the « -omics ».

Bioastronautics research has applications in earth medicine particularly on the physiopathology of metabolism: the nutritional questions related to bioastronautics research are very relevant to multiple ground-based related health issues. The potential spin-offs are of great clinical importance (metabolic syndrome, insulin resistance, dyslipidemia, diabetes...)

The musculoskeletal system is essential for locomotion and posture. Maintaining stable body function is essential to mission completion as well as to astronaut's health during and after the mission. Without countermeasures, all components of the musculoskeletal system adapt themselves to the microgravity environment, and in that way can create damage to tissue structure and function. Bone mass and strength are lost, muscle mass is also lost and morphology is altered, with a loss of muscle strength and endurance.

We need to rethink our approach on countermeasures. The ideal countermeasure should:

- Protect as many body functions as possible, without negatively affecting non-targeted body functions (for example, the effect of protein supplementation on bone).
- Be easy to implement (without using expensive, bulky or heavy devices).
- Not be time-consuming for crew members (e.g. exercise programs).

The current approach ignores these concerns, and adds layers of countermeasures one on top of another, increasing the cost of crew time and their availability for research. This impacts the science that can be done to now fully use the International Space Station.

Innovative approaches:

- Considering the impact of the 'International Space Station ecosystem' on the astronauts health through the impact on stress, sleep, rhythm and diet intake
- Testing meditation/relaxation during bedrest or in isolated analogs (submarines, polar stations)
- Demonstrating that exercise is too physiologically 'costly' for astronauts is currently almost impossible.

Cooperation with Russian and Chinese programs on those topics may be a possibility.

During the four last years, international cooperation has increased, notably with the Chinese program.

For the four next years, we hope to increase cooperation with other partners, for example, in Brazil and Japan.





GROUPE DE TRAVAIL THÉMATIQUE SCIENCES DE LA VIE

1. INTRODUCTION

L'homme a toujours exploré, exploité, colonisé et contrôlé son environnement en élargissant son domaine d'activité. Depuis les premiers hominidés, le progrès technique expose notre espèce à des situations extrêmes et à des milieux hostiles. Jadis, les grands explorateurs, navigateurs, conquérants de l'impossible ont parcouru des distances incroyables au travers des mers et océans. Les terres inexploitées et inexplorées par la civilisation ont de ce fait « disparu ». Les frontières terrestres sont ainsi tombées.

C'est pourquoi le début du troisième millénaire verra les projets d'exploration du Système solaire se multiplier.

À la différence des bateaux qui parcouraient les océans avec des équipages, les nouveaux vaisseaux qui traversent l'espace interplanétaire ne sont pas, actuellement, habités par l'homme mais par des robots, ce qui rend les missions beaucoup moins contraignantes.

Toutefois bien que l'expansion de l'espèce humaine dans l'espace apparaisse un progrès irréversible, elle représente un défi majeur pour l'homme car elle s'accompagne d'un décalage majeur entre l'histoire évolutive de l'homme et l'environnement dans lequel il va devoir évoluer pour des mois voire des années.

En effet c'est la gravité qui a façonné pendant des millions d'années le monde animal et végétal. Si la gravité n'existait pas nous n'aurions pas besoin d'un système cardiovasculaire aussi complexe, en particulier avec la mise en place de mécanismes de protection permettant de maintenir une circulation cérébrale normale lors de l'orthostatisme. Nous passons donc l'essentiel de notre vie à lutter contre la pesanteur.

Dans le contexte des vols spatiaux, ce rôle est déjà évident après 15 jours de microgravité où l'on voit des altérations majeures du système cardiovasculaire, du système osseux, musculaire et nerveux, pour ne citer que les principaux. Même à l'échelon cellulaire, la microgravité entraîne les modifications de l'expression des gènes et des altérations de la réponse et de la morphologie des cellules. La démarche scientifique (elle date de Claude Bernard et se poursuit actuellement avec les animaux knock out) consiste donc, pour mieux connaître un système, à étudier les conséquences

de son exclusion. Ceci justifie largement les études humaines ou animales faites lors des vols spatiaux. Il en va de même du règne végétal (gravitropisme). C'est ce que nous ont laissé entrevoir les expériences à bord de la Station Mir, de la navette américaine ou de la Station Spatiale Internationale. Une remarque concerne l'expérimentation animale : l'animal est indispensable que ce soit à bord de stations automatiques comme Bion ou de la Station Spatiale Internationale. C'est seulement à bord de ces plateformes que l'on peut étudier les effets de l'absence de gravité et surtout son effet sur l'évolution.

Les communautés scientifiques des Sciences de la Vie en milieu microgravitaire disposent de moyens spatiaux et terrestres existants pour effectuer leurs expériences. La Station Spatiale Internationale est le moyen principal d'expérimentation pour ces disciplines. Elle est le laboratoire de recherche essentiel pour la médecine spatiale. D'autres moyens sont indéniablement nécessaires pour répondre aux priorités identifiées lors des séminaires de prospective pour les sciences en micropesanteur. Ces moyens comme les capsules récupérables, les ballons, les vols paraboliques, les moyens de simulation au sol sont mis en œuvre dans un cadre national, européen ou international.

2. BILAN

Rappel des recommandations du séminaire de Biarritz :

- Poursuivre les études fondamentales en microgravité : gravitropisme végétal / effets micro et hyper gravitaire sur les vertébrés
- Renforcer les approches intégratives : physiologie des fonctions et leurs interactions
- Augmenter les capacités d'expériences en vol : vol (astronautes/plantes/animaux) / nouveaux instruments
- Développer/renforcer les plateformes au sol : centrifugeuse (homme & animal), immersion sèche, bedrest
- Développer les aspects « radiobiologie » et « effets psychosociaux du confinement »
- Développer un axe contre-mesures
- Accroître les liens inter-organismes, les réseaux collaboratifs
- Accroître la visibilité des recherches spatiales.

2.1. Les études fondamentales se sont poursuivies sur les plantes avec notamment l'expérience Genera-A

Le gravitropisme est cette faculté des plantes de s'orienter et de croître en suivant le vecteur gravitaire. Ce mécanisme connu depuis longtemps restait en grande partie non élucidé. Lors des années précédentes, les vols spatiaux ont permis de mettre en évidence que la gravité était perçue par la pointe racinaire de la plante avec une grande sensibilité mais les mécanismes cellulaires et moléculaires qui sont responsables de ces changements morphologiques restaient à décrire. En effet si la gravité est perçue par la plante, la gravité doit activer des mécanismes intracellulaires qui sont transmis aux cellules proches pour provoquer des cascades de modifications moléculaires et morphologiques pour finalement induire la courbure de la racine.

L'expérience Genera-A s'est attachée à mesurer les modifications dans l'expression des protéines contenues dans des jeunes plantes soumises à la microgravité (μg). Et cela afin de déterminer quelles sont les voies cellulaires qui sont affectées par la μg , c'est à dire les voies susceptibles d'être impliquées dans la prise en compte de la gravité. Ainsi, le résultat de l'expérience montre que les protéines impliquées dans la réponse au stress et dans les mécanismes de défense ont une expression qui augmente, tandis que celles qui sont impliquées dans la construction des parois cellulaires, les mouvements des organites intracellulaires ou le transport d'hormone végétales, ont quant à eux une expression diminuée. Ces résultats suggèrent que la construction du végétal est affectée par la μg .

2.2. Les études fondamentales se sont poursuivies sur les animaux

2.2.1. Soumis à des centrifugations

Une question scientifique s'impose : existe-il oui ou non un continuum d'effets de la gravité sur le vivant ? Le CNES a su structurer un réseau d'équipes de recherche (sept équipes) de façon à étudier cette question. Les équipes ont pu travailler durant trois ans avec des animaux soumis à différents niveaux d'hypergravité et à différents âges grâce à une centrifugeuse installée à Marseille. Cet équipement a permis au consortium d'obtenir d'autres soutiens financiers (ANR) et de montrer que l'hypothèse du continuum c'est à dire « plus on augmente le niveau de gravité plus la modification s'accroît » n'est pas toujours vérifiée qu'il dépend du tissu ou de la fonction mesurée et qu'il pourrait dépendre de l'âge de l'animal. Ce consortium de laboratoires continue ses investigations dans le cadre d'une plateforme d'analyses plus complète, installée par le CNES à Saint-Étienne.

2.2.2. Une capsule automatique avec Bion MI

Trois équipes françaises ont participé au vol Bion qui s'est déroulé en avril 2013 pour une durée de vol de 30 jours. Pour la première fois, la pression artérielle et la fréquence cardiaque ont été mesurées pendant toute la durée du vol 24 h/24 grâce à un équipement réalisé par l'équipe toulousaine du CNES. Des études sur l'ostéoporose et les maladies métaboliques ont également été effectuées.

2.3. Renforcer les approches intégratives

Les équipes se sont structurées tout au long de ces quatre années afin d'avoir une approche plus intégrative lors des expériences dans la Station Spatiale Internationale ou les bedrests. Par exemple, le déconditionnement cardiovasculaire dû au vol spatial était connu mais les bases moléculaires de celui-ci faisaient encore défaut. Ici, des données acquises séparément peuvent être remises en perspective et aboutir à une meilleure connaissance des mécanismes mis en jeu par les modifications gravitaires. En effet, il a été montré, par l'analyse doppler de la circulation au niveau de la veine porte hépatique, un flux sanguin réduit et une vasoconstriction diminuée chez les spatonautes. Et à Bordeaux dans le même temps, il a été montré chez l'animal suspendu par le train arrière tout comme après un vol spatial une diminution de l'amplitude des variations de la concentration calcique intracellulaire. Ce phénomène est lié à la diminution de l'expression d'une protéine canal responsable des mouvements de calcium. Ces variations de calcium sont en grande partie responsables de la réactivité vasculaire et donc il est possible que le mécanisme moléculaire mis en évidence chez l'animal soit à l'origine des perturbations mesurées chez l'homme.

Dans tous les organes, il a été montré que les modifications gravitaires induisaient des altérations des fonctions cellulaires par des modifications d'expression ou d'états des protéines. Il a également été démontré que les changements gravitaires affectaient la qualité de la réponse immunitaire et cela dans différentes espèces comme le pleurodèle ou la souris. La réponse immunitaire est affectée parce que les réarrangements des gènes qui codent pour les immunoglobulines ne sont pas identiques en microgravité et en normogravité. Ceci a pour conséquence que les anticorps produits sur Terre ou en vol en réponse à un agent pathogène sont différents, ce qui provoque une diminution de l'immunité chez les astronautes.

Il est établi, chez les vertébrés, que la perception de la gravité intègre plusieurs stimulations : stimulations visuelles, vestibulaires et proprioceptives. Il est clair maintenant que les modifications gravitaires perturbent l'équilibre du sujet et que la gravité représente un

référentiel stable pour réaliser les actions. La difficulté expérimentale réside dans les interactions entre les signaux captés par les systèmes vestibulaire, visuel et propriocepteur avec les systèmes nerveux impliqués dans la décision et la représentation de l'action. C'est pourquoi en neurosciences, si les études sur la perception de la gravité se poursuivent pour mieux la comprendre, il est aussi nécessaire de comprendre comment la perturbation de la perception de la gravité peut influencer les régulations végétatives qui sont à l'origine du contrôle nerveux des fonctions assurées par les organes tels que le système cardiovasculaire et le tissu osseux. C'est par les études utilisant des approches bio-astronautiques que les interactions entre le système vestibulaire et le système nerveux végétatif sont précisées. Par exemple, la suppression du système vestibulaire chez le rat a les mêmes effets délétères sur le tissu osseux que la microgravité. Il semble que cela pourrait impliquer le système nerveux sympathique.

Mais le meilleur exemple du travail de physiologie intégrative qui a vu le jour ces dernières années est le consortium créé autour des problèmes métaboliques. En effet, les conséquences délétères de l'inactivité physique sont décrits depuis longtemps et un nombre croissant d'études montrent que la sédentarité est causale dans le développement des maladies métaboliques modernes comme l'obésité, l'insulino-résistance, les dyslipidémies, le diabète de type 2, l'hypertension artérielle.

Les relations causales entre inactivité physique et maladies métaboliques sont indirectes et essentiellement basées sur les effets positifs de l'entraînement. Notre méconnaissance de la physiologie de l'inactivité est largement attribuée au manque de modèles expérimentaux induisant, au long cours, de la sédentarité chez des sujets sains qui récupéreront. Manquent en particulier des modèles qui permettent de contrôler tous les facteurs confondants comme la balance énergétique positive induite par l'inactivité physique elle-même.

Les modèles de physiologie spatiale offrent ainsi une opportunité unique pour étudier la physiologie de l'inactivité physique. En effet, en sus de la perte du gradient hydrostatique liée à la microgravité, l'inactivité physique représente le facteur principal du déconditionnement à la gravité. Ces déconditionnements sont très bien simulés au sol par le modèle d'alitement prolongé (bedrest). Ainsi, celui-ci permet d'étudier, en plus des questions de médecine spatiale, les mécanismes par lesquels l'inactivité physique induit le développement des troubles métaboliques associés aux maladies métaboliques modernes.

Les études conduites depuis quatre ans, ont ainsi permis de montrer que l'ensemble du scénario

d'adaptation métabolique que l'on peut trouver, dans la littérature, dans l'obésité est étonnamment similaire à celui que l'on retrouve en réponse à la sédentarité. Ces résultats montrent sans conteste l'apport de la physiologie spatiale et de ses modèles pour la compréhension de pathologies au sol. Les processus de remodelage musculaire observé lors de vol spatial sont également observés après une période d'inactivité prolongée ou dans le bedrest. Celui-ci induit toute une cascade de modifications métaboliques qui vont induire la déstabilisation des lieux de stockage des graisses. Cette augmentation du stockage ectopique des graisses reproduisant le syndrome métabolique connu dans certaines formes d'obésité.

Cette étude ouvre de nombreuses perspectives puisqu'il est connu que les dépôts ectopiques de graisse dans les organes sont générateurs de perturbations fonctionnelles.

2.4. Augmenter les capacités d'expériences en vol /développer de nouveaux instruments

De nombreuses nouvelles équipes ont été sélectionnées au cours de ces quatre dernières années pour faire des expériences dans la Station Spatiale Internationale : problèmes métaboliques, neurosciences.

Durant ces quatre dernières années, Cardiospace, appareil à visées cardiovasculaire pour la station chinoise a été développé. Par contre, un appareil de biologie animale et végétale, priorités du séminaire de 2009, a du être arrêté, faute de moyens. Cet arrêt a été une très grande déception pour la communauté scientifique.

2.5. Développer/renforcer les plateformes au sol

Un système de bain d'immersion sèche (Fig. 2) a été installé au MEDES en février 2014, la première étude pilote aura lieu à l'automne 2014, et la plateforme sera ensuite européenne pour accueillir des équipes internationales.

Les études de bedrest se sont poursuivies. La centrifugeuse pour animaux installée à Marseille a été déplacée à Saint-Etienne et fait maintenant partie d'une plateforme avec de nombreux dispositifs.

Fig. 2



2.6. Développer la partie radiobiologie

De nombreuses radiations sont connues pour provoquer des ruptures de l'ADN. Sur la Terre, une grande partie des radiations est filtrée par les différentes couches de l'atmosphère.

Mais dans l'espace, ces radiations se propagent et sont susceptibles d'impacter le vivant qui se trouve dans le module spatial. Le risque spatial va dépendre en théorie de la nature et des doses de radiations reçues. La radiobiologie fait des études sur le risque des radiations au sol qui sont rencontrées lors d'expositions accidentelles ou d'exams radiologiques ou de traitements radiothérapeutiques.

Ainsi sous l'égide du CNES le groupe de travail Praxitèle s'est structuré pour apporter son expertise en radiobiologie et comprendre comment les radiations spatiales peuvent affecter les équipages. Leur travail a d'abord été de caractériser la dose et les sources de radiations auxquelles sont exposés les équipages.

La méta-analyse des données radiobiologiques d'un grand nombre de missions montre que la dose reçue dépend en partie de la durée du vol même si pour des durées d'exposition spatiale identiques des équipages ont été beaucoup plus irradiés que d'autres.

De plus la nature des particules semble très variée.

Et enfin les sources de radiations proviennent en grande partie des émissions secondaires des matériaux de blindage qui sont bombardés par des protons de haute énergie qui sont assez rares dans l'espace mais très efficaces pour créer ces radiations secondaires.

D'autre part, les équipes de Praxitèle ont étudié les variations de radiosensibilité d'un individu à un autre en clinique pour déterminer au mieux les traitements de radiothérapie. La protéine ATM est fondamentale pour permettre les réparations de l'ADN en particulier après des cassures provoquées par les radiations. La radiosensibilité pourrait donc être due à une mauvaise réparation de l'ADN plutôt qu'à des dommages directs de l'irradiation.

Les effets des radiations sont loin d'être linéaires en fonction de la dose d'exposition. Il est possible que la répétition de doses faibles chez des individus radiorésistants soit plus délétères qu'une forte dose.

Ces résultats peuvent également améliorer la sélection des spatonautes mais aussi en donnant des pistes pour trouver les meilleures contre-mesures possibles à la radioactivité subie lors des missions spatiales. C'est ainsi que des pistes pharmacologiques ont été mises à jour avec le test d'un cocktail radioprotecteur qui permet d'améliorer les réparations de l'ADN par la voie ATM.

2.7. Développer la partie psychologie

Enfin, à la frontière entre les neurosciences et la psychologie, lors des dernières années et grâce aux expériences Mars 500 ou conduites sur Concordia, le rôle du confinement sur les interactions sociales a pu être étudié pour confirmer l'importance de la prise en compte du contexte environnemental pour assurer des relations sociales équilibrées. Dans ce domaine également des différences inter-individuelles notables sont mises en évidence.

2.8. Développer un axe contre-mesures

Nous savons maintenant que les remodelages musculaire et osseux sont couplés à un désordre métabolique des graisses. Les contre-mesures s'étaient jusqu'à présent focalisées sur l'un ou l'autre de ces remodelages. C'est par une approche translationnelle qu'il a pu être montré que le resvératrol, un puissant anti-oxydant, peut contrebalancer les effets de la microgravité simulée au niveau métabolique, osseux et musculaire.

Ainsi, le resvératrol apparaît comme un bon candidat de contre mesure médicament.

De nombreuses études ont également été faites pour tester la centrifugation comme contre-mesure.

2.9. Accroître les liens inter-organismes, les réseaux collaboratifs

De très gros efforts ont été effectués par les équipes pour participer à la vulgarisation scientifique, avec notamment de nombreux articles dans des revues scientifiques, des participations à des cafés des sciences, des films pour les jeunes, des émissions de télévision.

2.10. Accroître la visibilité des recherches spatiales

De 2009 à 2013, la communauté française a publié environ 140 articles dans des revues internationales à comité de lecture et de nombreux chapitres de livres. Les articles publiés adressent à la fois des questions fondamentales en biologie mais également des questions appliquées en médecine spatiale qui ont des retombées majeures dans la compréhension de nombreuses pathologies sur Terre (myopathie, ostéoporose, inactivité physique, syndrome métabolique, etc.). Les équipes françaises ont eu à leur disposition : 9 expériences spatiales, 4 bedrests, 45 vols paraboliques et 21 expériences en hypergravité.

2.11. Coopération internationale

Celle-ci s'est intensifiée durant ces quatre dernières années : Cardiomed lancé en 2010 nous permet de récupérer les données médicales de tous les cosmonautes russes, Cardiospace a été décidé et sera lancée en 2015 pour prendre place dans la station chinoise. De nombreuses expériences au sol ont été faites avec des équipes russes et chinoises. Les scientifiques chinois ou les taïkonautes participent à une campagne de vols paraboliques par an.

De nouveaux modèles d'inactivité commencent à se développer avec la Suède et notamment sur les problèmes d'hibernation avec les ours.

3. PERSPECTIVES

Renforcer la recherche en biologie et physiologie spatiales en se focalisant sur des aspects fondamentaux :

- contraintes évolutives liées à la gravité et adaptations

Renforcer la recherche en biologie et physiologie spatiales en se focalisant sur des aspects opérationnels pour les vols de longue durée et l'exploration

- évaluer les risques radiobiologiques & psychologiques
- réévaluer nos approches sur les contremesures
- développer des contremesures intégrées

Renforcer la recherche en biologie et physiologie spatiales en se focalisant sur des aspects sociétaux :

- rendre plus visibles les apports de la bio-astronautique en santé humaine

Et en s'appuyant sur le développement de moyens et plateformes au sol et en vol.

3.1. La contrainte gravitaire, moteur majeur de l'évolution, doit être étudiée

- de l'organisme à la cellule : c'est-à-dire de l'ADN à l'organisme entier
- en passant d'une physiologie des fonctions à une physiologie intégrée à l'exemple récent de l'ostéocalcine, produite dans le muscle en réponse à l'exercice montre une résistance à la sensibilité à l'insuline du muscle et du cerveau.

3.2. évaluation des risques radiobiologiques et psychologiques

Le programme de radiobiologie doit se développer en particulier lors des vols ballons où de très nombreuses expériences sur la cellule peuvent être conduites. La participation à des expériences de confinement ou dans la station Concordia ont été confirmées par la communauté scientifique.

3.3. Développer des contre-mesures innovantes

La contre-mesure idéale doit :

- protéger l'ensemble des fonctions du corps
- ne pas avoir d'effets négatifs sur certaines fonctions : exemple supplémentation en protéines sur l'os
- pouvoir être implémentée facilement (matériel peu encombrant)
- ne pas consommer trop de temps astronautes comme l'exercice musculaire.

3.4. Développement de moyens et plateformes

Lors des discussions de la prochaine convention avec l'équipe russe pour Cardiomed, il est indispensable que le système puisse être utilisé non seulement à des fins médicales mais également scientifiques afin que les protocoles puissent être discutés par les deux parties.

Pour le prochain vol de l'astronaute français Thomas Pesquet, une forte demande de la communauté scientifique a été émise pour faire des expériences demandant peu de nouveaux développements.

3.5. Accès à des vols animaux à bord des capsules Bion

De très nombreuses expériences sur les animaux peuvent être mises en œuvre avec peu de développement de matériel et donner d'excellents résultats de biologie fondamentale. C'est pourquoi il est recommandé au CNES de faire un effort particulier pour aider la communauté scientifique à y participer.

3.6. Maintenir la Station Spatiale Internationale jusqu'en 2024

Renforcer autant que possible, avec de nouveaux instruments, les expériences actuelles.

SYNTHÈSE SCIENCES DE LA MATIÈRE



1^{ère} image de mesure de l'instrument DECLIC

Dans le domaine des fluides critiques, on poursuivra la métrologie ultime des paramètres de l'équation d'état, l'étude de la crise d'ébullition et la combustion froide dans l'eau supercritique.

Dans le domaine de la solidification de matériaux modèles transparents, on poursuivra l'exploration de l'organisation des microstructures de l'interface d'échantillons massifs, la transition lamelles-fibres dans les échantillons lamellaires et la relation dynamique-ordre de réseau. Cette thématique pourra également comprendre les alliages facettés.

Dans le domaine de l'évaporation de gouttes posées sur substrat on qualifiera des modèles quantitatifs pour comprendre les phénomènes impliqués dans l'évaporation des fluides complexes avec ou sans substrat soluble.

Dans le domaine de la combustion, on a noté une évolution favorable de la thématique vers la propagation de flamme dans les brouillards et sur les surfaces solides qu'il faut encourager.

Pour ce faire, on poursuivra l'exploitation de l'instrument DECLIC avec la NASA jusqu'en 2018 par une utilisation

alternée des trois inserts déjà développés et remis à niveau après chaque retour au sol.

Dans la mesure où l'instrument DECLIC est considéré par les scientifiques comme un succès scientifique, technique et opérationnel, on développera un instrument de nouvelle génération, DECLIC-NG, basé sur le même concept : un instrument modulaire pouvant accueillir des inserts pour répondre aux enjeux scientifiques du domaine de la solidification, de l'évaporation de gouttes et de la combustion. Cet instrument prendra la relève de l'instrument actuel à partir de 2018. Il est à souligner que le cadre de coopération bilatérale acquise avec la NASA protège cette action des aléas européens sur la fin de la Station Spatiale Internationale.

Cet instrument sera compatible avec les inserts existants et ses diagnostics devront être renouvelés : par exemple, diffusion micro Raman pour la combustion dans l'eau, nouveau microscope avec changement de champ d'observation, meilleur contrôle des gradients de température et l'amélioration en général des mesures de température et de pression.

Pour les thématiques qui n'ont pas fait jusqu'à ce jour l'objet de développement d'inserts (combustion, digestion visqueuse, solidification de composés lamellaires) on conduira des phases O d'inserts correspondants.

Pour ce qui concerne l'utilisation des moyens-sol de lévitation magnétique, on complètera grâce à elle les actions de recherches sur l'eau supercritique effectuées dans l'instrument DECLIC.

On développera une station de lévitation pouvant travailler avec les volumes d'hydrogène liquide de 400 cm³ pour se rapprocher encore plus des conditions rencontrées dans les technologies de réservoirs de lanceurs. On recherchera un partenariat dans le cadre H2020 par exemple.

La convergence avec les sciences du vivant sera poursuivie avec l'étude en phase O d'un insert dédié.

SYNTHESIS CONDENSED-MATTER SCIENCES

In the field of critical fluids, we will keep working on the ultimate metrology of the parameters of the equation of state, the study of the boiling crisis and cold combustion in supercritical water.

In the field of transparent material model's solidification, we will keep studying microstructure organization in the interface of massive samples, lamellae-fiber transition in lamellar samples and the relationships between dynamics and network order. This theme will also cover faceted alloys.

As for the evaporation of drops on a substrate, we will qualify quantitative models to understand phenomena involved in complex fluid evaporation with or without soluble substrate.

As for combustion, we noticed positive developments toward flame propagation in fog and on solid surfaces. This evolution must be supported.

That is why we will keep exploiting the DECLIC instrument with NASA until 2018, by alternately using its three inserts that have already been developed and that are upgraded after each return on Earth.

Considering that the DECLIC instrument is a scientific, technical and operational success, we will develop a new-generation of this instrument, DECLIC-NG, based on the same concept – a modular instrument which can accept inserts to answer scientific issues in the fields of solidification, drop evaporation and combustion. It will supersede our current instrument from 2018 onward.

Besides, the bilateral cooperation framework with NASA prevents the development of the instrument from being impeded by the European uncertainties about the end of the International Space Station's exploitation.

This instrument will be compatible with the existing inserts and its diagnoses will have to be renewed: for instance, micro-Raman scattering for combustion in water, new microscope with new coverage, improved control of temperature gradients and general improvement of temperature and pressure measurements.

As for the themes that have not lead so far to the development of inserts (combustion, viscous fingering, solidification of lamellar compounds) we will conduct the phases O of the corresponding inserts.

The use of magnetic levitation on the ground will allow us to complete research actions on supercritical water made with the DECLIC instrument.

We will develop a levitation facility to work with a volume of 400 cm³ liquid hydrogen, to be close to conditions found in the tanks of space launchers. We will look for instance for a partnership in the framework of the H2020 program.

Convergence with life sciences will continue with the study of phase O of a dedicated insert.

GROUPE DE TRAVAIL THEMATIQUE SCIENCES DE LA MATIERE

Les effectifs de la communauté scientifique engagée dans les recherches en micropesanteur sont en légère augmentation avec 41 équipes rassemblées dans un Groupement de Recherche (GdR) avec le CNRS et le CEA. Sur la période écoulée, le budget de soutien des laboratoires a augmenté sensiblement pour atteindre toutes lignes confondues 1,3 M€/an.

La période écoulée a vu, au plan du programme national, l'exploitation de l'instrument DECLIC dont il faut souligner le succès technique, scientifique et opérationnel et qui a bénéficié d'une allocation de temps d'expérience de plus de 10 000 heures (l'Europe dans le même temps a reçu quelques 3 000 heures pour l'ensemble de ses instruments).

1. BIOPHYSIQUE ET SCIENCES DU VIVANT

L'étude d'objets biologiques est réalisée par deux équipes, une dans le laboratoire LIPhy à Grenoble, l'autre au PMMH de l'ESPCI à Paris et consiste en des études expérimentales au sol ainsi qu'en vol parabolique et en fusées sondes.

1.1. Lévitacacoustic d'objets biologiques (M. Hoyos, ESPCI PMMH)

L'équipe du PMMH étudie une méthode de lévitation acoustique pour la manipulation d'objets biologiques. La gravité induit une migration des objets par sédimentation. La micropesanteur permet de positionner ces objets avec des forces très faibles et donc sans perturbation. Le travail s'oriente vers la manipulation acoustique de bactéries en suspension.

1.2. Dynamique d'objets biomimétiques (C. Misbah, Université Joseph Fourier)

1.2.1. Dynamique et rhéologie de vésicules et globules rouges

L'objectif vise une meilleure compréhension des phénomènes individuels et collectifs des vésicules et globules rouges sous écoulement, ainsi que leur rhéologie, tant en géométrie étendue qu'en

microfluidique. Cette dernière activité est motivée à la fois par le besoin de mimer les architectures de la microvascularisation et le souhait de comprendre les processus de transport sanguins en vue de contribuer aux aspects fondamentaux dans les technologies de laboratoires sur puces. Les travaux se font en symbiose entre expérience, théorie et simulations. Les études en microgravité ont déjà donné lieu à plusieurs résultats importants comme l'étude de la force de portance et la diffusion hydrodynamique de globules rouges dans le sang.

1.2.2. Force de portance

Les expériences ont montré une loi de migration quantitativement en accord avec les prévisions théoriques.

1.2.3. Diffusion hydrodynamique

Il s'agit de l'étude de la diffusion hydrodynamique dans une suspension assez concentrée de globules rouges. Le sang est injecté dans un canal comme le montre la Fig. 1. Le jet focalisé évolue librement par le processus de diffusion hydrodynamique. Il est trouvé expérimentalement, et montré grâce à un modèle analytique simple, que la loi de diffusion est anormale (le jet s'élargit comme la racine cubique du temps et non comme la racine carrée, comme cela arrive pour la diffusion Brownienne).

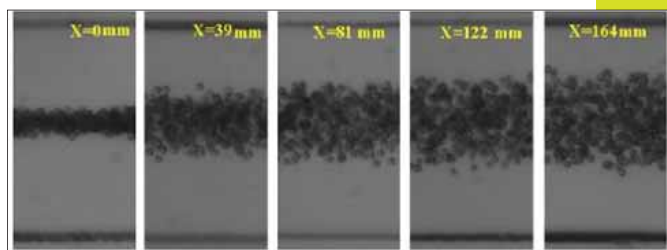


Fig. 1 : Jet sanguin montrant la diffusion hydrodynamique en fonction du temps

1.3. Rhéologie du sang, mouvements et forme des globules rouges

L'étude systématique de la rhéologie d'une suspension concentrée de vésicules à deux dimensions a permis de confirmer le comportement qualitatif de la viscosité d'une suspension diluée selon laquelle la viscosité effective de la suspension diminue quand on augmente la viscosité interne (résultat opposé à celui d'une émulsion). Quand la viscosité interne atteint une valeur critique, la viscosité effective atteint un minimum et croît ensuite. Il a été montré que le minimum coïncide avec une transition dynamique entre le mouvement dit « chenille de char » (tank-treading) vers le mouvement de bascule (tumbling), découverts en micropesanteur.

2. SOLIDIFICATION ET CROISSANCE CRISTALLINE

Ce rapport couvre les travaux réalisés par trois groupes de recherche de l'IM2NP, l'INP et du LPMC sur les thématiques de formation des structures de solidification sur des échantillons élaborés à partir d'une phase liquide. Dans ce type de configuration, le recours à l'expérimentation en microgravité permet l'établissement de conditions de transport des espèces contrôlé par les lois de Fick, sans lesquelles la validation des modèles physiques utilisés pour décrire la croissance n'est pas possible. Sur cette thématique solidification, le fait marquant de la période 2010-2013 est la concrétisation du début du programme expérimental microgravité après une très longue attente, à la fois pour les alliages transparents (projet Misol 3D) et les alliages métalliques (projets Columnar to Equiaxed Transition in Solidification et XRMON).

Pour ce qui concerne les alliages transparents, les travaux menés à l'IM2NP ont notamment permis de remettre en question le mécanisme classiquement accepté de création de cellules par tip splitting. D'autre part, les résultats obtenus à la transition cellules-dendrites montrent un comportement différent de celui obtenu en lame mince au sol, ce qui conforte encore, si besoin en était, le besoin de recourir à l'expérimentation en microgravité pour l'élucidation des mécanismes dans des configurations représentatives de la réalité industrielle.

En particulier un résultat très important a été obtenu au sujet d'instabilités secondaires consistant en l'oscillation des cellules (Fig. 2) : ce phénomène n'avait pas pu être observé sur terre et est maintenant reproduit par les simulations de champ de phase qui sont donc alimentées de manière indispensable par les résultats en micropesanteur. Il importe de noter que c'est grâce à l'instrument DECLIC développé par le CNES, et plus précisément dans l'insert DSI (Directional Solidification Insert), embarqué à bord de la Station Spatiale Internationale, que tous ces résultats ont pu être obtenus dans le cadre d'une coopération avec les meilleurs laboratoires.

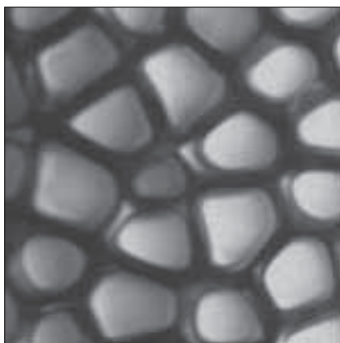


Fig. 2 : Ordre hexagonal local oscillant

Pour les alliages métalliques, le point le plus remarquable porte sur le développement d'un dispositif permettant l'imagerie par radiographie X de la solidification en temps réel et qui a été embarqué dans une fusée sonde (MASER 12). Il est à noter que le laboratoire IM2NP travaille également sur cette thématique d'imagerie X dans le cadre de programmes réalisés au synchrotron de Grenoble. Toutes ces études ont permis de faire progresser la connaissance des mécanismes en jeu lors de la transition colonnaire-équiaxe, notamment sur le blocage de la croissance colonnaire et sur l'interaction des grains en croissance équiaxe. Il s'agit de sujets relevant non seulement de la recherche fondamentale mais qui peuvent avoir des applications industrielles importantes, notamment dans le domaine de la métallurgie.

Il importe aussi de rappeler que les programmes expérimentaux des équipes de l'IM2NP et de l'INP bénéficient de l'apport de collaborations avec des spécialistes de modélisation numérique utilisant la technique du champ de phase. Il est à noter que le principe d'un article de revue sur ces thèmes vient d'être accepté (*In situ monitoring of solidification dynamics in diffusive conditions by Akamatsu et Billia, dans Acta Materialia*).

3. FLUIDES CRITIQUES, CHANGEMENT DE PHASE

Les fluides critiques sont à la fois des objets d'études fondamentales encore fascinants par la complexité de la description nécessaire pour rendre compte des phénomènes statiques ou dynamiques proches du point critique (PC), et aussi des états de la matière utilisés dans les propulseurs. Leurs comportements en accélération ou gravité variable doivent donc être maîtrisés et ce d'autant plus qu'ils sont hypercompressibles à l'approche du point critique (divergence de la compressibilité). Le projet DECLIC a donc été réalisé par le CNES et l'instrument éponyme se trouve opérationnel sur la Station Spatiale Internationale depuis octobre 2009. DECLIC est équipé de plusieurs inserts, chacun étant dédié à une classe d'expérience. Par ailleurs une station de compensation magnétique de la gravité est opérationnelle à Grenoble (CEA-INAC) et permet des expériences sur l'oxygène ou l'hydrogène en petits volumes. Les thèmes explorés et les résultats obtenus se déclinent de la manière suivante :

3.1. Approche ultime du point critique et validation des paramètres de l'équation d'état

L'absence de gravité permet de s'approcher à quelques centaines de micro kelvins du point critique tout en conservant une densité égale à sa valeur critique. L'approche n'est limitée que par les inhomogénéités de température, notamment dans le cas de l'eau supercritique (insert HTI) où la température critique est élevée (400° C). La comparaison aux modèles théoriques se fait par l'intermédiaire de la mesure de la lumière transmise à travers la cellule ou plus exactement de la turbidité qui mesure la diminution de cette transmission due à la divergence des fluctuations critiques à l'approche du PC. Cette turbidité a été mesurée avec une précision inégalée dans les conditions critiques et off-critiques pour le CO₂ ainsi que pour H₂ et O₂ sous lévitation magnétique. On extrait de ces mesures les paramètres critiques qui entrent dans les équations d'état essentielles pour la prédiction du comportement de ces fluides d'intérêt technologiques dans l'espace.

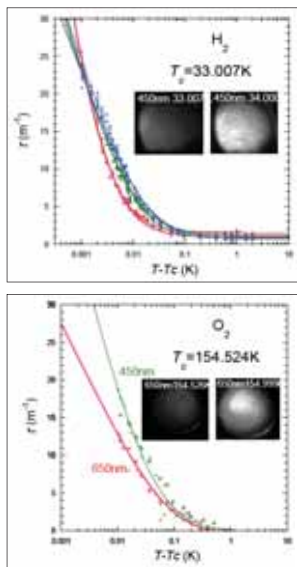


Fig. 3 : Turbidité dans (a) H₂ et (b) O₂. Les ajustements aux équations donnent (H₂) $\kappa T_0^+ = 57 \times 10^9$ Pa-1 et $\xi_0^+ = 2.2 \text{ \AA}$ et (O₂) $\kappa T_0^+ = 15 \times 10^9$ Pa-1 et $\xi_0^+ \sim 2.5 \text{ \AA}$.

3.2. Transport de phase vapeur par changement de phase

Le mouvement thermocapillaire (Marangoni) d'une bulle de gaz sous un gradient de température n'existe pratiquement pas dans un fluide pur. En effet, dans un tel système, l'interface vapeur-liquide est toujours isotherme (à la température de saturation). L'évaporation du côté chaud et la condensation du côté froid peuvent se produire et cependant déplacer la bulle. Ce phénomène a été observé dans deux fluides différents, l'hydrogène et l'eau, les deux sous gravité réduite.

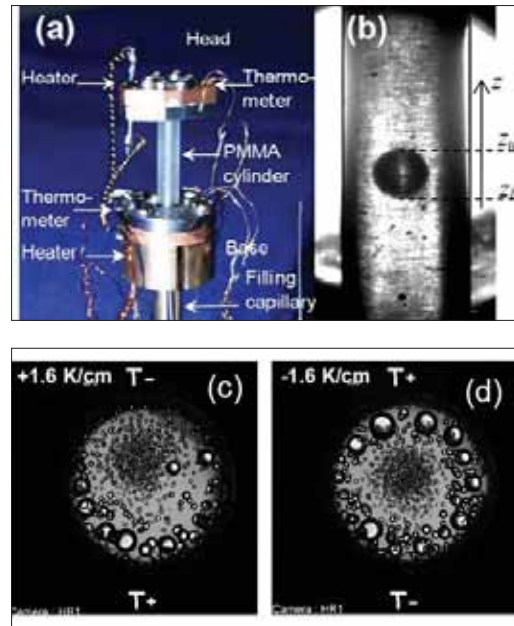


Fig. 4 : Déplacement de bulles d'hydrogène gazeux (à gauche) et d'eau vapeur (à droite) vers la partie chaude de la cellule

Le mouvement a été comparé aux théories existantes et des simulations 1D numériques. Les expériences et l'analyse ont été réalisées à proximité du point critique afin de tirer bénéfice de l'Universalité critique. Les expériences avec l'hydrogène (température critique : 33 K) ont été réalisées en lévitation magnétique tandis que l'expérience avec l'eau près de sa température critique ($T_c = 373.995 \text{ C}^\circ$, comme déterminé avec précision sous apesanteur) a été effectuée avec l'insert HTI dans l'instrument DECLIC à bord de la Station Spatiale Internationale (Fig. 4). La cause du phénomène, comme confirmé par une simulation numérique, réside effectivement dans l'effet piston différentiel qui, de part et d'autre de la bulle, provoque des taux d'évaporation et de condensation différents des deux côtés et génère le mouvement.

3.3. Transitoires d'accélération dans O₂

L'installation de lévitation (OLGA), qui permet de léviter l'oxygène, a été modifiée pour étudier des variations rapides de champ de pesanteur. Les conditions de ré-allumage de fusées en orbite ont été reproduites par une variation du champ de zero-g vers 0,4g. Des résultats intéressants ont été obtenus sur les écoulements transitoires induits sur un réservoir rempli d'oxygène liquide et gazeux à la pression et la température des réservoirs de fusées (2 bar, 90 K). Les grandes bulles d'oxygène sont lévitées à l'intérieur d'une colonne liquide d'oxygène à saturation. Le champ magnétique est alors rapidement modifié, ce

qui provoque la formation d'un geyser dans la bulle, comme déjà observé dans les réservoirs de fusée lors du re-allumage en orbite.

3.4. Effets de vibrations dans les fluides critiques

Ces études concernent l'étude des phénomènes induits dans les fluides par des vibrations périodiques. Ces vibrations (typiquement d'amplitude 0,1-0,5 mm et de fréquence 1-100 Hz) sont externes aux fluides et sont transmises par les parois de la cellule le contenant. Le fluide se trouve ainsi soumis à des déplacements périodiques dont la vitesse dépend de la densité locale du fluide. Des écoulements moyens s'ensuivent. Sur terre, ceux-ci sont en général très fortement couplés à la gravité. L'absence de pesanteur simplifie bien évidemment les nombreux comportements qui découlent de l'effet des vibrations car les écoulements à grande portée dus à la sédimentation et la convection thermo-gravitationnelle sont en effet totalement supprimés. D'un point de vue appliqué, l'effet sur un fluide en apesanteur des vibrations d'une station orbitale ou d'un vaisseau spatial reste très mal connu.

3.5. Instabilités thermo-vibrationnelles supercritiques ($T > T_c$)

Une instabilité de Rayleigh vibrationnelle peut se former quand la direction de la vibration est parallèle (tangentielle) à la couche limite thermique. Quand la direction de la vibration est perpendiculaire à la couche limite thermique, des instabilités de nature paramétrique peuvent à leur tour se développer.

3.6. Instabilités vibrationnelles en diphasique ($T < T_c$)

Dans un système diphasique en apesanteur, la phase liquide mouille les parois de la cellule et la vapeur se met sous forme de bulle, plus ou moins sphérique suivant le remplissage (la fraction volumique) et la forme de la cellule. Quand la vibration est imposée au fluide, la direction de celle-ci pourra donc dans certaines régions être tangentielle au fluide et perpendiculaire dans

d'autres, induisant ainsi différents types d'instabilité. Ainsi les vibrations peuvent induire des instabilités du type Faraday (paramétriques) et/ou de Rayleigh-Taylor pour la portion d'interface gaz-liquide perpendiculaire à la vibration ou de type Kelvin-Helmholtz (ondes gelées) pour la portion d'interface parallèle à la vibration. Ces observations confirment l'existence des ondes de Faraday en conditions d'apesanteur.

Quant à l'instabilité d'onde gelée, elle a aussi été détectée dans H_2 diphasique. Le diagramme de stabilité de l'instabilité a été obtenu et correspond à un modèle théorique non visqueux indépendamment du niveau de gravité. Cependant l'amplitude de l'instabilité dépend fortement du niveau de gravité et diverge à $g=0$ (Fig. 5) ce qui permet d'expliquer des structures en bandes qui avaient été observées lors de précédents expériences en microgravité.

3.7. Ebullition à différentes distances du point critique

Ce thème à la fois expérimental et théorique s'intéresse à la physique de l'ébullition en fonction de la gravité et à l'évolution temporelle de la surface libre des bulles de vapeur en croissance sur une paroi chauffante. L'objectif principal du projet est de comprendre la crise d'ébullition, c'est-à-dire la transition de l'ébullition nucléée vers l'ébullition en film où la paroi chauffante est couverte d'un film continu de vapeur. La transition s'effectue par l'étalement des bulles de vapeur, c'est-à-dire par un mouvement de la ligne triple. La partie expérimentale concerne avant tout les expériences au voisinage du point critique liquide-gaz. On peut alors observer l'ébullition « au ralenti » grâce au ralentissement critique de la diffusion de chaleur.

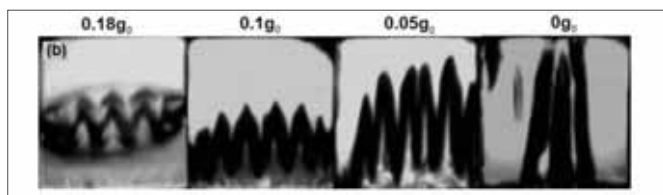


Fig. 5 : Evolution de l'amplitude de l'instabilité d'onde gelée en fonction du niveau de gravité



3.8. Ebullition en film et nucléée en fonction du niveau de gravité

La méthode de mesure consiste à immerger rapidement un disque (à 300 K) en cuivre dans un bain d'oxygène liquide (à 90 K) à des niveaux fixés de gravité et de sous-refroidissement (station OLGA).

Le ralentissement de l'ébullition nucléée est étudié dans deux types d'expériences : compensation magnétique de gravité et DECLIC à bord de la Station Spatiale Internationale. Les expériences en compensation magnétique de gravité ont été menées dans deux installations : HYLDE et OLGA. Au moment de la crise d'ébullition, l'assèchement de la paroi chauffante est observable (Fig. 6). La crise d'ébullition existe pour n'importe quelle valeur du flux un certain temps après l'imposition du flux thermique. Il a été démontré pour la première fois qu'aux conditions de compensation magnétique de la gravité, la valeur de CHF (flux critique de la crise d'ébullition) serait zéro en accord avec les prédictions théorique pour zéro g.

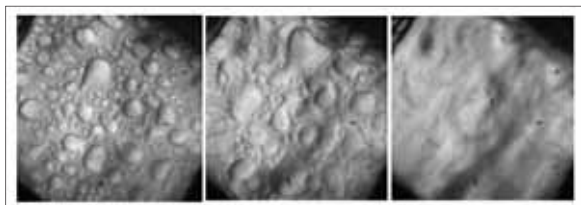


Fig. 6 : Visualisation du flux critique à 0g au niveau du plan chauffant (de gauche à droite :
Image 1 : Ebullition nucléée,
Image 2 : Transition,
Image 3 : Ebullition en film) : $T_c - T = 10\text{mK}$.

Le deuxième type d'expériences dont un des objectifs principaux est l'étude de l'ébullition utilise l'appareil DECLIC du CNES avec l'insert ALI. Les cellules sont remplies de SF₆ à la densité très proche de la densité critique. Les images obtenues avec la cellule d'observation directe sont semblables à celles issues des installations terrestres de compensation magnétique de gravité mais beaucoup plus propres car il n'y a pas de champ résiduel qui entraîne la déformation et/ou mouvement des bulles observés par exemple dans HYLDE.

4. LA COMBUSTION

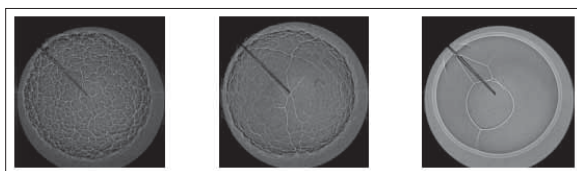
La plupart des expériences de base en combustion ont lieu à des vitesses, d'écoulement ou de propagation, suffisamment faibles pour que les effets de flottabilité y jouent des rôles importants. Si ces effets peuvent avoir un rôle moteur dans la combustion, par exemple, d'un tas de bois ou d'un immeuble, la convection naturelle apparaît, la plupart du temps, comme un parasite de l'expérience, dont il est bon de s'abstraire.

Ainsi, les expériences en micropesanteur ont pour objectif de mettre en évidence un certain nombre de phénomènes que la convection naturelle masque au sol, tels les ballons de flamme, la combustion individuelle de gouttes, la combustion des brouillards, etc.

Les effets collectifs se sont vite avérés primordiaux en ce qui concerne les régimes de combustion de groupes de gouttes, puis des brouillards.

L'aspect expérimental de la combustion des brouillards a été mené par l'équipe de Christian Chauveau du laboratoire ICARE (CNRS Orléans). Cette étude consiste à engendrer un brouillard de gouttes de combustible dans une chambre de combustion remplie d'air et d'initier l'inflammation de ce mélange hétérogène par une étincelle au centre de la chambre. Une flamme va ainsi se développer et se propager sphériquement en consommant progressivement le mélange combustible. Cette propagation est très rapide, de l'ordre d'une dizaine de millisecondes, et va nécessiter l'utilisation d'un dispositif optique non intrusif d'ombroscopie à haute cadence d'imagerie pour suivre l'évolution temporelle du front de flamme (Fig. 7). La vitesse de propagation de la flamme est déterminée grâce à cette évolution temporelle. Cette étude fait intervenir de nombreux paramètres influant sur cette vitesse de propagation, comme la pression, la température, la richesse, le combustible, le nombre et la taille des gouttes.

Les expériences sont réalisées en microgravité en utilisant les vols paraboliques de l'Airbus A300 ZERO-G de NOVESPACE. Cet environnement de gravité réduite permet d'abord de s'affranchir des problèmes de sédimentation des gouttes dans la phase préparatoire du mélange, ensuite il permet de réduire considérablement les phénomènes de convection naturelle. Des études comparatives sont conduites au laboratoire, en conditions de gravité normale. Celles-ci permettent de mettre en évidence les avantages procurés par l'expérimentation en gravité réduite dans cette étude. Les premières campagnes de vols (2010-2012) ont été dédiées à l'étude granulométrique du brouillard formé dans l'expérience pour les différentes conditions de pression et température. Ensuite à partir d'octobre 2012, trois campagnes de vols paraboliques ont été consacrées à la combustion de ces mélanges.



SMD = 20 μm SMD = 15 μm Gaz

Fig. 7 : Exemple de déformation de flamme pour des conditions identiques (pression, température et richesse globale) à différentes tailles de gouttes. (Images présentées en 0g à 2 bars, 334 K et $\Phi = 1,4$).

Les premières observations ont indiqué que la granulométrie des gouttes composant le brouillard a une influence directe sur l'aspect cellulaire (instabilités) de la flamme di-phasique. En effet, plus la taille des gouttes est conséquente plus les cellules sont marquées et vont plisser le front de flamme.

En ce qui concerne la vitesse de propagation de la flamme, des expériences de combustion en phase gazeuse ont été réalisées dans les mêmes conditions que celles réalisées en diphasique (température, richesse globale et pression). Les résultats mettent en évidence une vitesse accrue de la propagation de la flamme en diphasique pour les hautes richesses. L'explication tient principalement dans le fait que la vitesse de propagation de la flamme est pilotée principalement par la quantité de combustible restée sous forme gazeuse au sein du brouillard. Ainsi, la richesse réelle est moindre, et ceci se traduit par un décalage de richesse. Une conséquence très importante de ce résultat est que des mélanges non inflammables en phase gazeuse peuvent le devenir en diphasique.

L'approche théorique d'accompagnement a été menée par un laboratoire qui a développé une modélisation adaptée aux brouillards (à pression modérée et haute) pour lesquels la distance moyenne inter-goutte n'est pas petite devant l'épaisseur de flamme. Cette étude fait suite à des études antérieures où les gouttes étaient

considérées comme beaucoup plus petites (brouillards à basse pression) et les modèles de combustion faisaient alors appel à des considérations d'homogénéisation.

5. MOUSSES, ÉMULSIONS ET MILIEUX GRANULAIRES

5.1. Mousses, émulsions

5.1.1. Génération et vieillissement des mousses

Sur terre, il est très difficile de découpler leur formation de leur évolution cinétique due au drainage qui est l'écoulement du liquide et donc l'assèchement des mousses. Ce phénomène empêche de caractériser les mousses immédiatement après fabrication alors que la connaissance des mousses à ce stade précoce pourrait être très utile pour comprendre les paramètres qui régissent leur fabrication et les instabilités conduisant à leur destruction ultérieure.

Pour étudier les mousses en microgravité, un dispositif de caractérisation optique par DWS et de conductivité a été mis au point afin de déterminer la fraction en liquide et la taille des bulles (module Mousse de la Station Spatiale Internationale (FSL) en lien avec un réseau européen de l'ESA).

Les expériences de fabrication de mousse en vols paraboliques (2007 et 2008) ont permis de montrer qu'en l'absence de drainage, l'utilisation de stabilisant n'est pas nécessaire pour former des mousses humides stables.

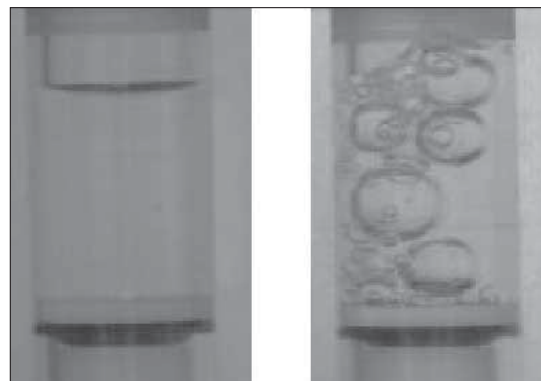


Fig. 8 : Mousse d'eau quelques secondes après formation, à droite sur terre, à gauche, en vol parabolique.

Ces expériences préliminaires ont mis en évidence le rôle important de l'élasticité de surface dans la stabilité des mousses qui devra être comparée à ce qui se passe sur une mousse réelle à 3D dans la Station Spatiale Internationale.

Des expériences de stabilité sur des temps plus longs ont été effectuées par un astronaute dans la Station Spatiale Internationale en 2009 et 2012.

5.1.2. Mousses de fluides complexes

L'objectif des recherches est d'étudier la fabrication et le vieillissement des mousses aqueuses, stabilisées par des tensioactifs ou des particules solides et de comprendre comment le vieillissement et la rhéologie des mousses sont modifiés lorsque le fluide interstitiel entre les bulles est complexe (dispersion de particules ou émulsion).

Dans la Station Spatiale Internationale, les données de DWS seront collectées. Au sol, l'étude sur des mousses plus sèches, permettra de comprendre l'effet des attractions capillaires entre particules au sein d'une mousse sur la dynamique de vieillissement et permettra d'interpréter les données de vieillissement des mousses humides en microgravité recueillies dans la Station Spatiale Internationale. Sur ces travaux sur les mousses humides, une revue vient d'être acceptée dans *European Journal of Physics E (Microgravity studies of aqueous wet Foams by D. Langevin and M. Adler)*.

5.2. Les milieux granulaires

L'étude des propriétés des milieux granulaires en impesanteur est primordiale pour mieux comprendre leur rhéologie, leur écoulement ou leur dynamique lorsqu'ils sont soumis à des vibrations mécaniques. Au-delà de l'intérêt spatial (gestion d'un granulaire dans l'espace, d'un combustible solide de fusées et d'une meilleure compréhension de la dynamique des anneaux planétaires), la motivation pour la microgravité est d'atteindre une situation expérimentale où les collisions inélastiques entre particules sont le seul mécanisme d'interaction dans le cas dilué, ou de s'affranchir, dans le cas dense, de la pression de confinement des grains due à leur propre poids. La seule échelle de temps pour un tel système granulaire en microgravité est alors la période de vibrations qui simplifie fortement la modélisation du système en utilisant l'analyse dimensionnelle.

Un milieu granulaire en régime dilué et fortement vibré mécaniquement ne se comporte pas comme un gaz usuel du fait de la dissipation d'énergie lors des collisions inélastiques. Les concepts de la théorie cinétique des sphères dures ne peuvent alors pas s'appliquer directement. La formation d'amas de particules et la distribution des vitesses des particules qui diffère de la distribution de Maxwell-Boltzmann est la manifestation la plus surprenante d'un tel « gaz » granulaire dissipatif. Lorsque le libre parcours moyen des particules n'est pas négligeable devant les dimensions de la cellule, il a été montré que le

milieu granulaire vibré s'écarte significativement des prédictions relatives aux gaz raréfiés (P. Evesque et al.). Dès que l'énergie injectée dans le milieu granulaire est arrêtée, le suivi des particules a permis d'étudier la relaxation ou « refroidissement » de ce gaz granulaire lors de vols paraboliques (G. Bossis et al.). L'absence d'équipartition de l'énergie cinétique de translation et de rotation a été notamment mise en évidence tout au long du déclin.

Dans le régime dense, des études relatives à la transition de blocage ou jamming d'un écoulement granulaire sous faibles vibrations ont été réalisées en vols paraboliques, en collaboration avec le DLR afin de s'affranchir de la pression de confinement des grains due à leur propre poids. En mesurant la diffusivité des particules, il a été montré que la dynamique de blocage est plus rapide qu'en gravité terrestre et qu'elle dépend significativement de l'amplitude de cette pression de confinement.

6. ÉCOULEMENT À DEUX PHASES, ÉVAPORATION, ÉBULLITION

Pour le thème des écoulements diphasiques, il s'agit de fournir des données expérimentales et des modèles pour le dimensionnement des réservoirs du lanceur Ariane 5 et d'autres systèmes spatiaux : boucles fluides à pompage capillaire ou mécanique, lignes d'alimentation des moteurs fusée.

Concernant les études sur les écoulements diphasiques, l'équipe de l'IMFT travaille sur trois thèmes : l'ébullition en vase sur site isolé ou en multi-sites, l'ébullition convective et les écoulements adiabatiques diphasiques. Les résultats expérimentaux en ébullition en vase ont permis de développer une corrélation permettant de prédire le flux de chaleur en microgravité pour des réfrigérants mais également pour l'oxygène liquide. Des expériences modèles sur les fusées sondes Maser 11 et Maser 12 ont été conduites pour analyser le comportement des ergols dans les réservoirs d'Ariane 5 en micropesanteur. En parallèle avec les approches expérimentales, un modèle numérique fin permettant de simuler la croissance et le détachement d'une bulle a été développé.

L'équipe de l'IUSTI a travaillé sur l'évaporation et plus particulièrement elle visait à préciser les mécanismes de l'évaporation du ménisque d'une goutte placée dans une phase gazeuse. La comparaison de gouttes d'éthanol s'évaporant sur un substrat chauffé à deux niveaux de gravité ont permis de montrer que le développement d'ondes à la surface de la goutte est dû aux forces purement thermo-capillaires et que leur évolution temporelle était similaire pour des conditions de gravité différentes.

