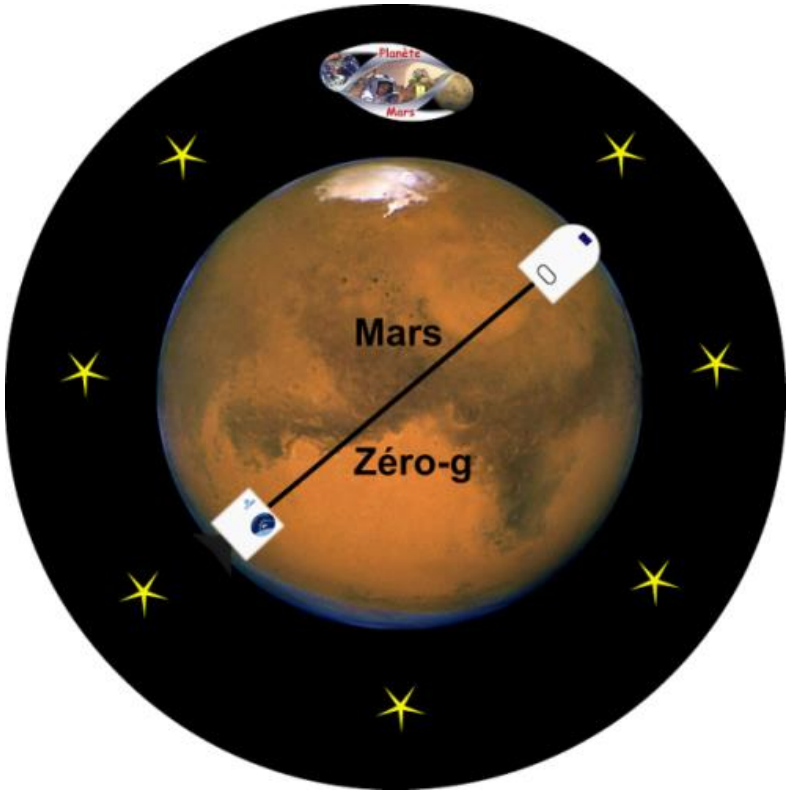
Rapport d'expérimentation

Projet MARS ZERO-G : Déploiement d'un démonstrateur en micro gravité



Antoine DAVOST, Odon De FRANCQUEVILLE,
Céline HOFFMANN, Denis LE GOFF, Vincent MARTINOT,
François NOYEZ, Yutaro ONO, Victor VAUDAUX

Table des matières

I Introduction 2
II Concept du vaisseau à tester et principes physiques de l'expérimentation 3
III Conception et Réalisation technique 5
IV Description de l'expérimentation 9
V Résultats 10
VI Amélioration et suite à donner au projet 12
VII Conclusion 12

I Introduction

Lors d'un séjour dans l'espace, les astronautes sont en permanence soumis à l'absence de pesanteur. Ce n'est pas sans conséquences sur leur santé, notamment dans le cas de longues missions, telles que le serait le voyage d'un vaisseau habité vers Mars, dont l'aller simple durerait six mois avec les configurations et technologies actuellement envisagées.

L'idéal serait de prévenir l'apparition de ces effets en générant, pendant le trajet, une gravité artificielle au sein du vaisseau, ce qui peut, entre autres, être réalisé par la rotation du vaisseau ou d'une partie du vaisseau sur lui-même.

Le vaisseau ici retenu est constitué de deux modules, reliés par un système de câble, et tournant autour du centre d'inertie du vaisseau ainsi constitué. Le projet Mars Zéro-G consiste à démontrer la pertinence et la faisabilité d'un tel type de vaisseau spatial.

Pour ce faire, il s'agit de fabriquer un démonstrateur reprenant le concept du vaisseau spatial, puis de le déployer et le mettre en rotation en condition d'apesanteur. Seulement ceci nécessite des conditions d'apesanteur, difficiles à reproduire sur Terre. C'est là que le CNES, le Centre National des Etudes Spatiales, intervient : via son département « Projets Jeunes », il met chaque année quelques places dans l'A300 Zéro-G à la disposition de projets étudiants.

Après un faux départ pour la campagne de vol d'octobre 2012, notre projet a été retenu pour la campagne de vols paraboliques d'octobre 2013, à laquelle nous avons bel et bien participé.
L'objet de ce rapport est de présenter succinctement le projet, ce qui a été réalisé dans son cadre, les résultats obtenus, ainsi que ce qu'a été l'apport du projet pour nous, qui l'avons réalisé.

II Concept du vaisseau à tester et principes physiques de l'expérimentation

Le vaisseau dont il est ici question doit pouvoir générer à son bord une gravité artificielle pour ses astronautes, autrement dit il doit pouvoir soumettre ces dernier en permanence à une accélération dont l'intensité est contrôlée. Dès lors, il y a au moins deux possibilités : soit le vaisseau utilise l'accélération générée par sa propulsion vers son objectif, comme l'illustre la fusée d'Hergé dans son album de Tintin « On a marché sur la Lune », où la gravité artificielle est générée par le fait que la fusée accélère constamment sous les pieds des astronautes présents à son bord ; soit le vaisseau, ou bien une partie, tourne sur lui-même, et la gravité artificielle correspond alors à l'accélération centrifuge générée par le mouvement de rotation. Cette dernière solution apparaît plus pratique que la première, car ici l'intensité de la gravité artificielle générée est indépendante de la vitesse du vaisseau vers son objectif, alors que dans la première solution les deux sont intrinsèquement liés. Cela permet de moduler à sa guise l'intensité de la gravité artificielle, et donc de préparer également les astronautes aux conditions de gravité sur leur lieu de destination. Enfin, surtout, cette solution d'un vaisseau en rotation sur lui-même apparaît comme étant plus réalisable que celle d'un vaisseau accélérant en permanence, car pour ce dernier, la technologie permettant de construire un moteur suffisamment résistant à la chaleur générée par la source d'énergie de propulsion (a priori nucléaire, en l'état de nos connaissances) manque encore.

Par ailleurs, le vaisseau est ici constitué de deux modules, l'un habité, l'autre servant de contrepoids, tous deux reliés par un câble rétractable. Cela permet de lancer facilement le vaisseau dans l'espace en deux parties (un lancer par module), et le fait que la longueur du câble soit rétractable permet de modifier facilement au cours du voyage l'intensité de la gravité artificielle générée.

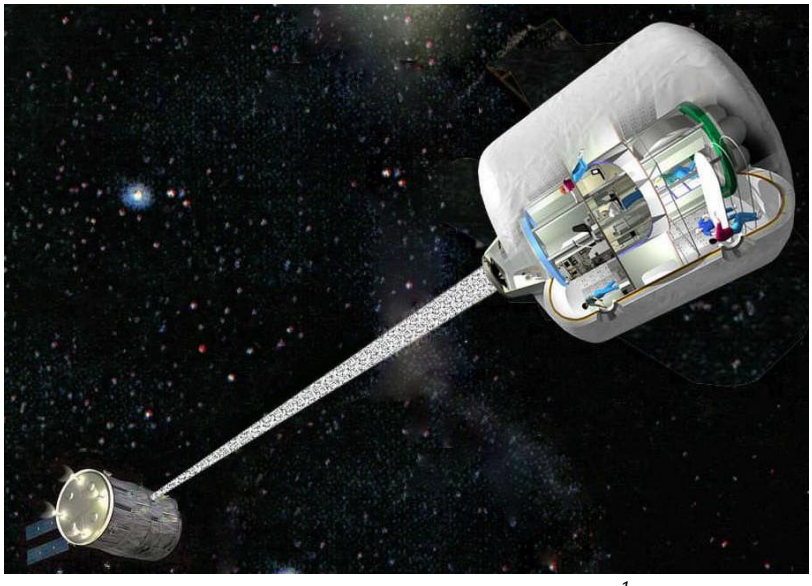


Fig.1 - Vue d'artiste d'un tel vaisseau[1]

[1] bas@delta-utec.com, Delta-Utec SRC, Leiden, Pays-Bas, www.delta-utec.com

Le câble est notamment utile lors de la mise en rotation du vaisseau. Le principe est qu'au moment de la mise en rotation du vaisseau, les deux modules sont plus éloignés l'un de l'autre qu'ils ne le seront en régime permanent, pendant le déplacement du vaisseau. On dépense alors une petite quantité d'énergie pour mettre les deux modules en rotation commune autour du centre d'inertie du vaisseau (qui est situé quelque part sur le câble reliant les deux vaisseaux). On rétracte alors une partie du câble, ce qui a pour conséquence de modifier la répartition de masse du vaisseau : les modules sont maintenant plus proches du centre d'inertie qu'ils ne l'étaient avant. Dans la mesure où, dans l'espace, on peut considérer le système du vaisseau comme étant pseudo-isolé, le principe de conservation du moment cinétique s'applique, et la vitesse de rotation du vaisseau augmente. C'est le même principe qui s'applique lorsqu'un patineur en rotation sur lui-même ramène ses bras près de son corps, et augmente en conséquence sa vitesse de rotation. Cela permet notamment d'arriver à la vitesse de rotation finale voulue à moindre frais. Par ailleurs, des travaux sur l'intensité de gravité artificielle générée à bord d'un tel vaisseau, et sur les valeurs de vitesse de rotation et de distance entre les modules à choisir afin de garantir des conditions de voyage supportables pour les astronautes, ont été réalisés par les scientifiques hollandais Lansdorp, Kruijff et Jan v.d. Heide[2].

L'équation de conservation du moment cinétique entre les instant 1 et 2 est : $\boldsymbol{\Omega_1 * I_1 = \Omega_2 * I_2}$, où, à l'instant **i**, $\boldsymbol{\Omega_i}$ est la vitesse de rotation du système (en $rad.s^{-1}$) et $\boldsymbol{I_i}$ est son inertie (en $kg.m^2$).

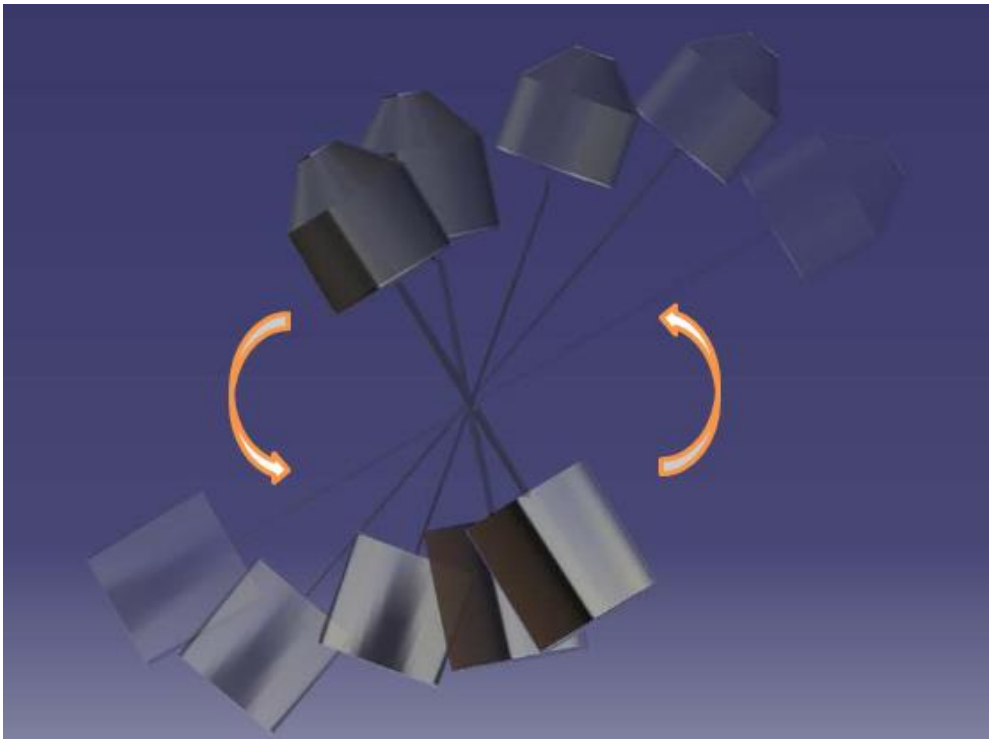


Fig.2 – Illustration du vaisseau accélérant sa rotation lors de sa contraction

[2] Leur étude est à télécharger sur www.marszerog.fr

III Conception et Réalisation technique

La conception du dispositif expérimental résulte du respect d'un Cahier des Charges établi avec notre partenaire et commanditaire, l'Association Planète Mars, d'une part ; et des contraintes imposées par l'environnement de réalisation de l'expérimentation (l'avion) et imposée par un document de travail établi par NOVESPACE, la société exploitant l'avion, d'autre part.

L'objectif du projet, pour l'Association Planète Mars, était avant tout de montrer la pertinence du concept du vaisseau spatial évoqué, et de communiquer au sujet du concept du voyage des Hommes vers la planète Mars, dont l'absence prolongée de pesanteur pour les voyageurs est une des problématiques. Il y avait donc un aspect mesure : on devait montrer que l'on génère bien une gravité artificielle à bord du vaisseau ; ainsi qu'un aspect esthétique : les images prises du vaisseau en rotation sur lui-même doivent être convaincantes.

Il résulte de cela, entre autres, que :

- Nous devions construire un démonstrateur du vaisseau, et l'utiliser lors d'une campagne de vol parabolique, pendant laquelle des conditions d'impesanteur sont approchées.

- Le démonstrateur devait être filmé de manière exhaustive et détaillée, et un dispositif devait pouvoir mesurer l'accélération centrifuge générée à son bord.

- Le démonstrateur devait posséder des paramètres semblables à ceux du vaisseau testé dès lors que ces paramètres influent sur le mouvement du vaisseau, vu que c'est ce dernier qui est étudié et doit être validé. Ici, ces paramètres étaient sa forme (deux modules reliés par un système câble rétractable) ainsi que sa répartition de masse (on suppose que dans la réalité, le module « habité » est plus massif que le module « contrepoids »).

- Enfin, le démonstrateur devait être déployé de manière « réaliste », et doit montrer l'intérêt du câble rétractable dans le système de génération de gravité artificielle.

Par ailleurs, les contraintes imposées par les mesures de sécurité à prendre à bord de l'avion nécessitaient le respect de conditions telles que :

- une masse limite pour le démonstrateur
- un encombrement limité du dispositif expérimental (l'espace disponible correspond globalement à un pavé de 2*2*1.5 m^3)
- un matériau solide pour le lanceur, afin de résister aux conditions d'accélération rencontrées en cas de problème
- un matériau non-cassable pour le démonstrateur
- un déploiement très rapide du démonstrateur, car la durée de micro-gravité lors d'une parabole n'excède pas une vingtaine de secondes

Pour procéder au dimensionnement du démonstrateur et du lanceur, nous avons réalisé une modélisation simplifiée du problème, que nous avons utilisé avec un logiciel de calcul afin de résoudre les équations pas à pas. Des allers et retours sont ensuite faits avec cette modélisation et la conception, jusqu'à ce que l'on puisse fixer définitivement certains paramètres (distance initiale entre les modules, paramètres du mécanisme de treuil, etc …).

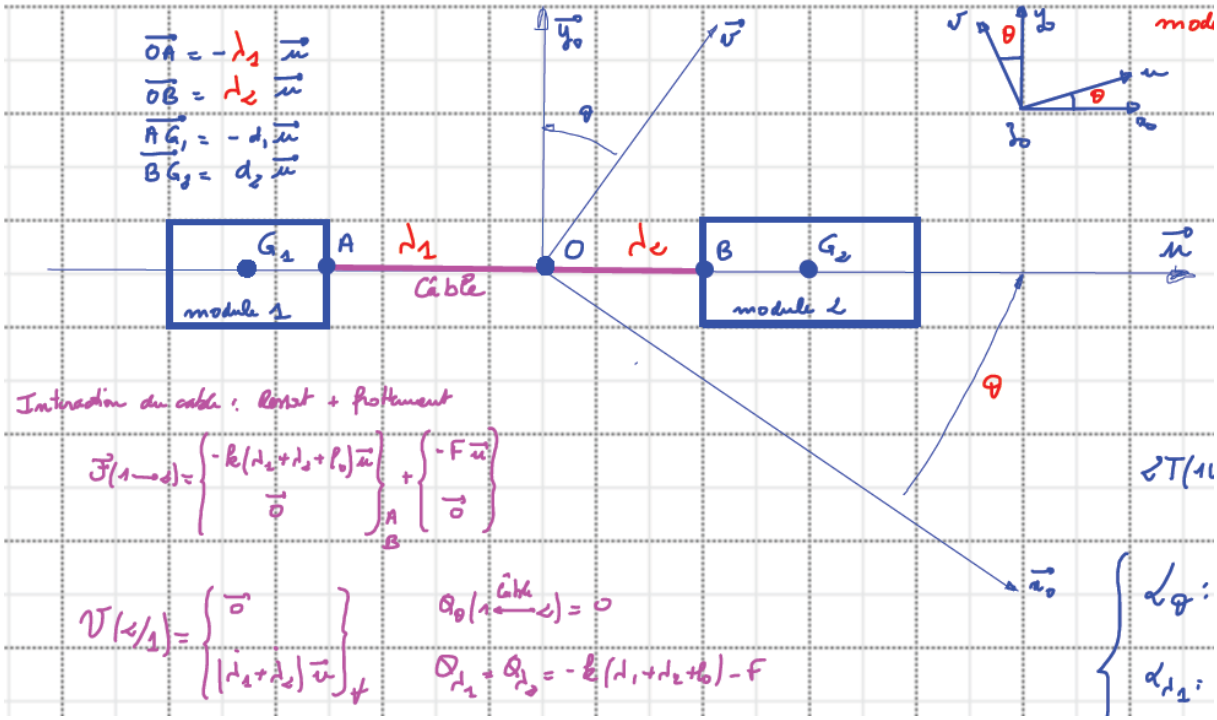


Fig.3 – Schéma de la modélisation simplifiée du système que constitue le démonstrateur en rotation

La conception elle-même fut réalisée à l'aide d'un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur, CATIA.

Au final, le dispositif expérimental est constitué du démonstrateur – la maquette du vaisseau - et du lanceur. Le démonstrateur est composé de deux modules de forme cylindrique reliés par un câble métallique. Le système de treuil utilisé pour tirer sur le câble et provoquer le rapprochement des deux modules est constitué d'un ressort lié à une poulie. Un accéléromètre avec stockage mémoire est fixé au fond de chaque module. Des caméras sont placées tout autour de la zone expérimentale, dont une permet de filmer le déroulement de l'expérimentation « au ralenti », afin de pouvoir exploiter finement les images et vidéos prises. Le lanceur conçu permet, à l'aide d'un système de mâchoires activées simultanément par un câble métallique, de maintenir solidement les modules pendant la mise en rotation, tout en les libérant avec le moins de perturbation possible une fois la phase de micro-pesanteur atteinte.

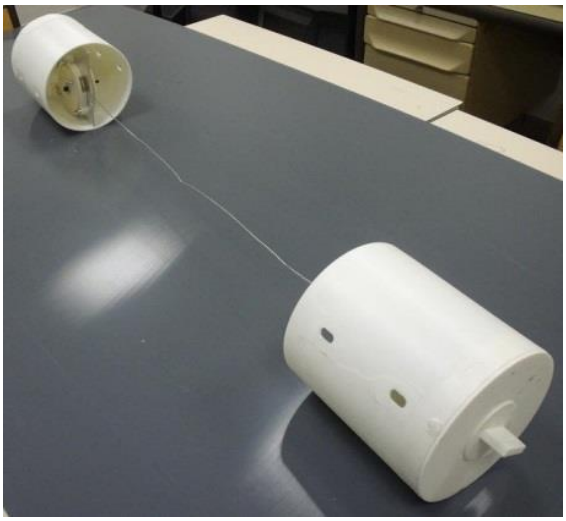


Fig.4 - Démonstrateur

Caractéristiques du module 1 :

- représente le module habitable
- 1,25 fois plus massif que le module 2
- contient un accéléromètre et des masselottes ainsi que le système treuil {poulie + ressort}

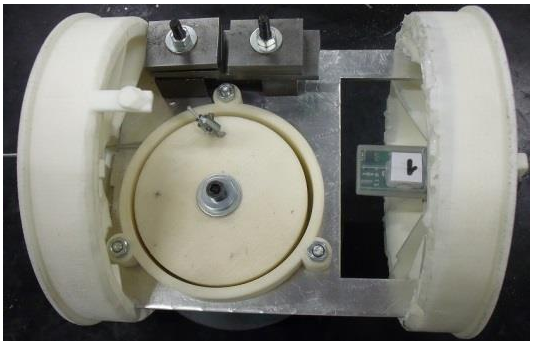


Fig.5 - Intérieur du module 1, dit « habité » (poulie et accéléromètre)

Caractéristiques du module 2 :

- représente le contrepoids
- contient un dispositif d'accroche du câble et des masselottes pour régler finement sa masse

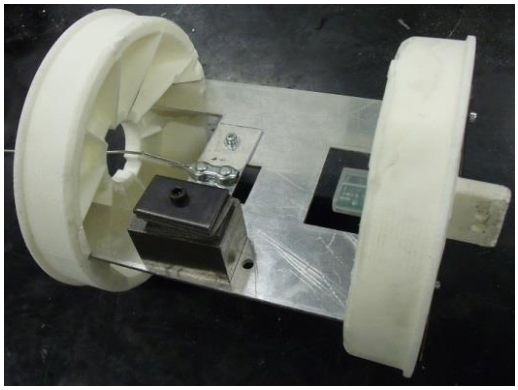


Fig.6 - Intérieur du module 2, dit « contrepoids » (Attache du câble et accéléromètre)

Caractéristiques du lanceur :

- bâti encastré au sol terminé par un bras vertical
- axe de rotation horizontal, terminé d'un côté par une manivelle, de l'autre par un bras aux extrémités duquel se trouvent les mâchoires devant maintenir en place les modules

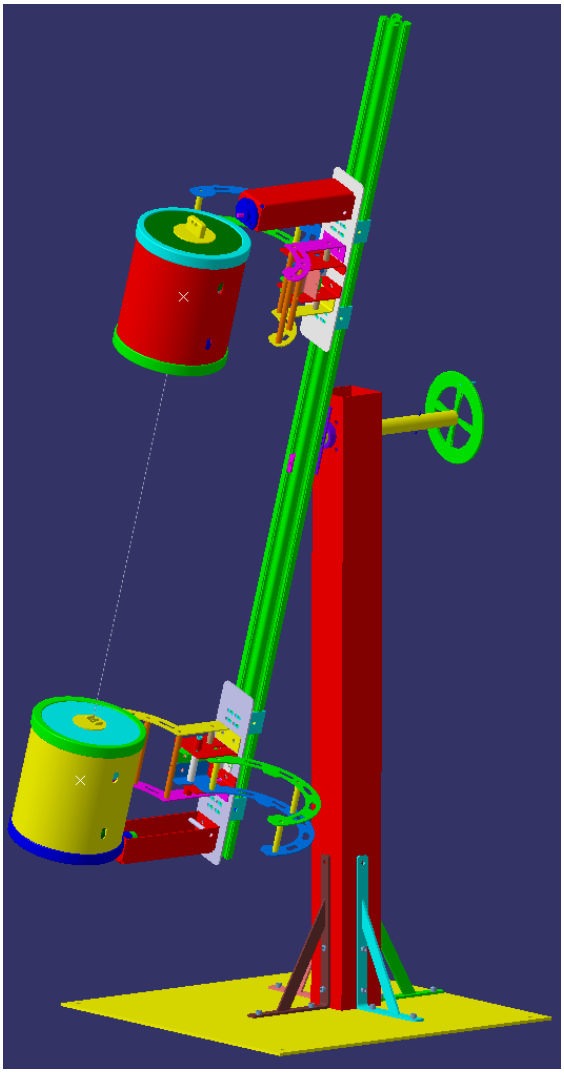


Fig.7 - Modélisation du dispositif expérimental sous le logiciel de CAO CATIA



Fig.8 - Dispositif expérimental réel

IV Description de l'expérimentation

L'expérience fut donc réalisée à bord de l'avion « A300 Zéro G » de NOVESPACE. Le dispositif était enfermé dans un espace délimité par des filets, afin de minimiser le risque que constituent des objets flottant librement.

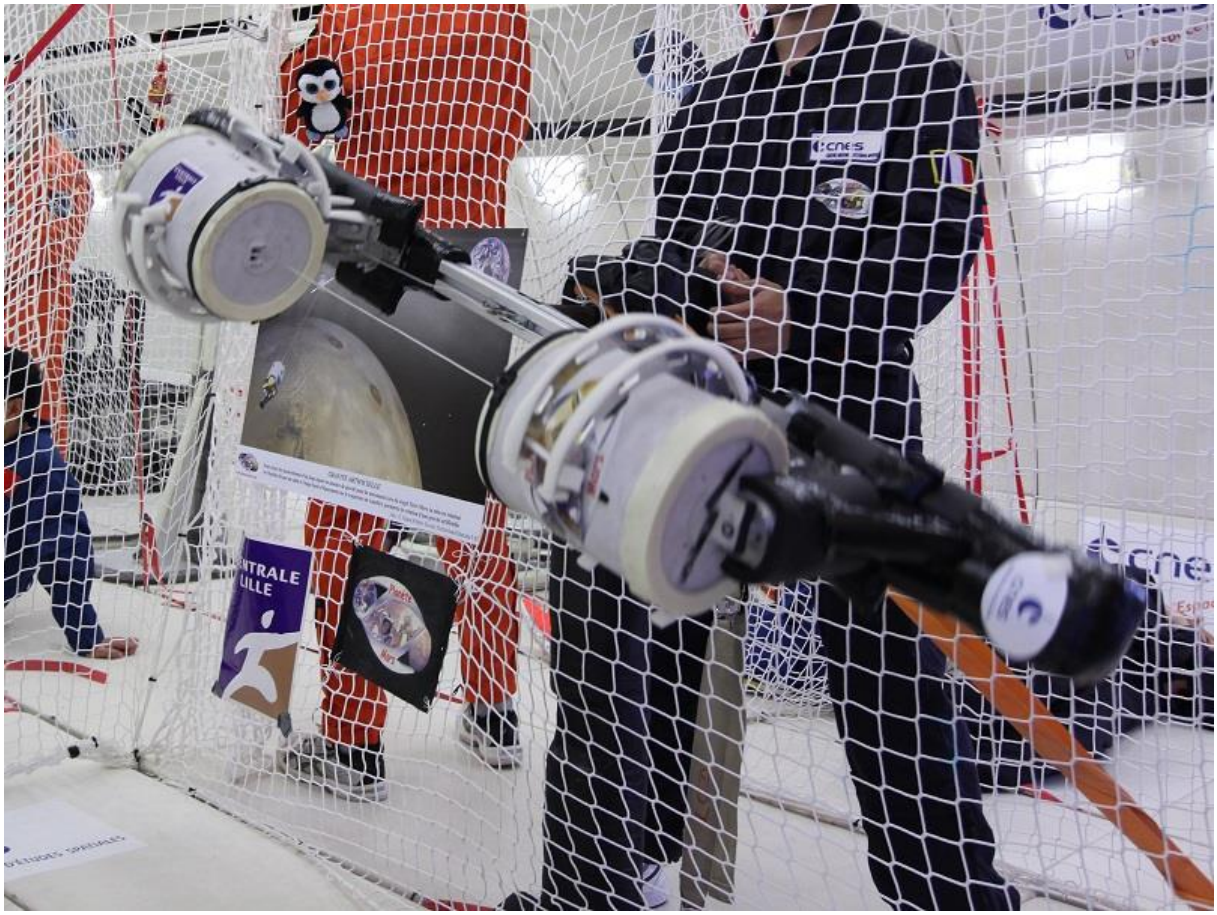


Fig.9 – Dispositif expérimental mis en rotation à bord de l'avion

L'expérience se déroule de la manière suivante :

- La maquette du vaisseau est mise en rotation via le lanceur mécanique, assimilable à une centrifugeuse. Les modules sont placés chacun dans une mâchoire qui sert à les maintenir en position pendant la phase de mise en rotation.

- Une fois la vitesse de rotation initiale atteinte, on déclenche l'ouverture des mâchoires et le largage simultané des modules. Ces derniers se rapprochent alors sous l'effet du treuil contenu dans le module « habité », ce qui induit l'accélération de la rotation du vaisseau.

- Cette augmentation de la vitesse de rotation vient progressivement contrecarrer l'effet du treuil, et, en raison des frottements (notamment ceux rencontrés au sein système {ressort + poulie}), finit par stopper le mouvement de rapprochement des modules. Le vaisseau finit donc par atteindre une vitesse de rotation stationnaire.

- A la fin de la phase de micro-pesanteur, le démonstrateur tombe sur le plancher. Il s'agit alors éventuellement de récupérer les données des accéléromètres, puis, en tout cas, de ré-installer le démonstrateur sur le lanceur, afin de réinitialiser l'expérimentation.

V Résultats

Notre expérimentation a bel et bien été réalisée au cours du vol du mercredi 9 octobre 2013. Les accéléromètres ont bien fonctionné, et ont permis de recueillir l'accélération subie par chaque module dans la direction de son axe (les modules étant assimilables à des cylindres). Les caméras, et notamment la caméra à large champ filmant « au ralenti », ont pu filmer toutes les réalisations de l'expérimentation.

L'analyse des vidéos et des données des accéléromètres permet de montrer que le démonstrateur a correctement rempli son rôle au cours des expérimentations, c'est-à-dire qu'il a bel et bien adopté un mouvement de rotation sur lui-même stable résultant en la présence d'une gravité artificielle à son bord, mesurée et quantifiée par les accéléromètres, comme le montre la figure ci-dessous.

Une vidéo de la partie intéressante d'une expérimentation réussie est disponible à cette adresse : http://www.youtube.com/watch?v=86FfJEE4HfA.

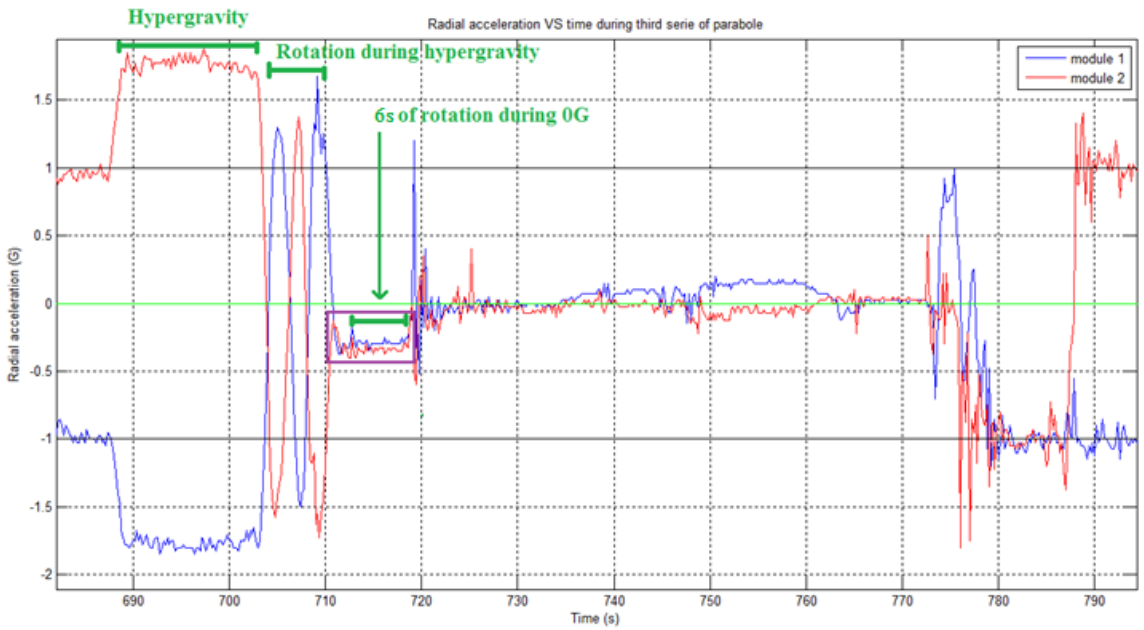


Fig. 10 – Variation des valeurs de gravité artificielle au sein des modules pendant la quatorzième parabole

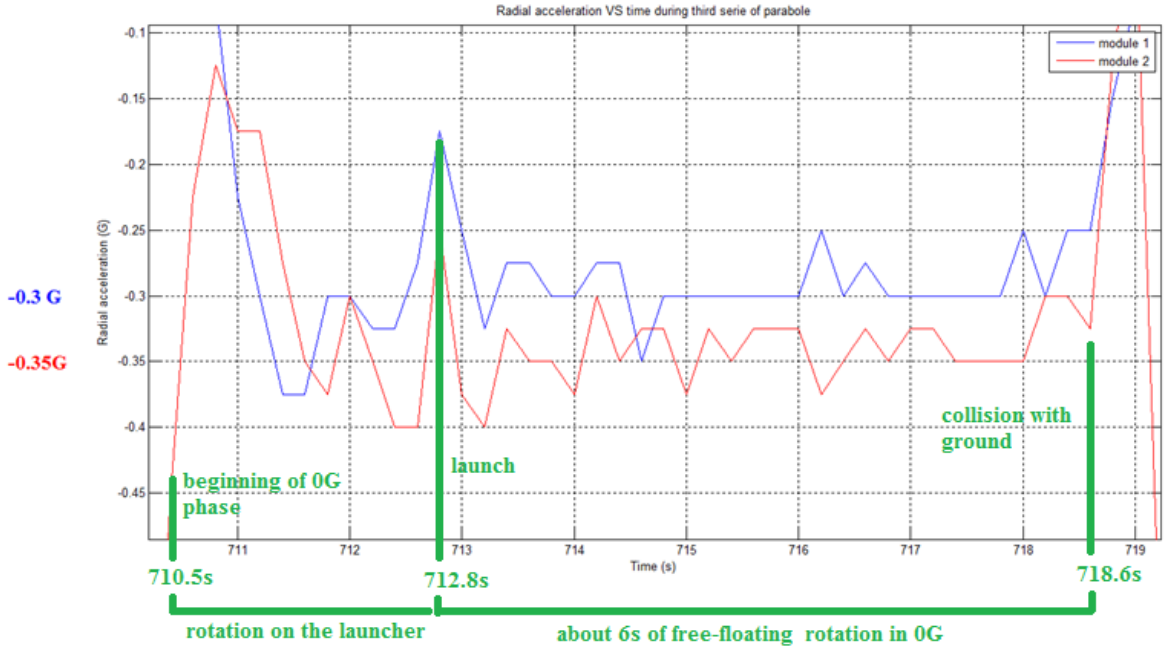


Fig.11 - Valeurs de gravité artificielle au sein des modules pendant la phase d'impesanteur de la quatorzième parabole

On observe que pendant la phase d'impesanteur de cette quatorzième parabole, l'intensité de gravité artificielle à bord des modules valait respectivement 0.3G pour le module 1 et 0.35G pour le module 2.

Une analyse plus complète est l'objet du document « Analyse des données et résultats - Projet Mars Zéro-G ».

Parce que de telles vidéos du démonstrateur en rotation stable sur lui-même ont pu être obtenues, et parce que l'intensité de gravité artificielle à bord des modules a pu être mesurée, et son lien direct avec la vitesse de rotation du démonstrateur vérifié, nous sommes en mesure de dire les objectifs du projet ont été atteint, et que celui-ci est donc un succès.

VI Amélioration et suite à donner au projet

Ce projet est en fait une Proof Of Concept, il montre l'intérêt d'un vaisseau spatial de la forme considérée pour les longs voyages spatiaux, pour lesquels ce vaisseau empêche les effets délétères de l'absence de pesanteur pour les astronautes. La prochaine étape devrait consister à réaliser une véritable maquette miniature d'un tel vaisseau, pour laquelle la distance entre les deux modules pourrait être réglée de manière fine et en temps réel, vraisemblablement à travers un système électronique et en partie automatisé. Ceci devrait également bénéficier au lanceur ainsi qu'au dispositif de mise en rotation du lanceur, afin de contrôler beaucoup plus précisément les paramètres de largage des deux modules du démonstrateur (notamment, la valeur de la vitesse de rotation au moment du largage), ainsi que sa simultanéité.

L'expérimentation devrait alors être en mesure de démontrer la manière de contrôler le vaisseau ainsi que les paramètres de son mouvement, et son succès ouvrirait la voie à la mise en application de ce principe de génération de gravité artificielle pour un vaisseau réel.

VII Conclusion

La réalisation de ce projet a notamment été pour nous l'occasion de comprendre et mettre en œuvre de façon concrète un travail en équipe, auquel nous n'étions jusqu'ici pas habitués ; un projet sur les résultats duquel nous nous étions par ailleurs engagés envers un partenaire, l'Association Planète Mars, et notamment ses président et vice-président MM. Alain Souchier et Richard Heidmann. Cette notion de responsabilité envers une personne extérieure est importante, et a notamment été un vecteur de motivation supplémentaire devant les difficultés que nous avons affrontées au cours de la réalisation du projet.

Pour celui-ci, plus que l'application des principes et de la théorie vue en cours, il s'est agi de mettre en œuvre sa créativité et son ingéniosité afin de résoudre des problématiques qui ne sont parfois même pas définies au départ. Nous avons également pris conscience des contraintes liées à la gestion de projet, notamment en termes de planning et d'organisation, et qui demandent d'être adaptables et réactifs. Enfin, réaliser un projet, c'est aussi savoir recevoir l'aide et le conseil d'autrui, et en ce sens nous tenons à remercier tous nos professeurs, en particulier MM.Yannick Desplanques, Denis Le Picart, Laurent Patrouix et Alain Deparcy, qui nous ont aidé jusque dans les phases de fabrication du dispositif expérimental, ainsi que le CNES et NOVESPACE, en les personnes respectives de M. Nicolas Pillet et M. Patrice Rosier, d'une part pour nous avoir permis de réaliser l'expérimentation lors d'un vol parabolique, et d'autre part pour leurs conseils et suggestions concernant l'expérimentation en elle-même.

Pour toutes ces raisons, l'aventure qu'a constitué pour nous le projet Mars Zéro-G a été extrêmement formatrice, et ce que nous en avons appris nous servira tout au long de notre carrière.



Fig.11 & 12 – Equipe du projet Mars Zéro-G

