



La contribution fédérale belge pour la mission JUICE de l'ESA

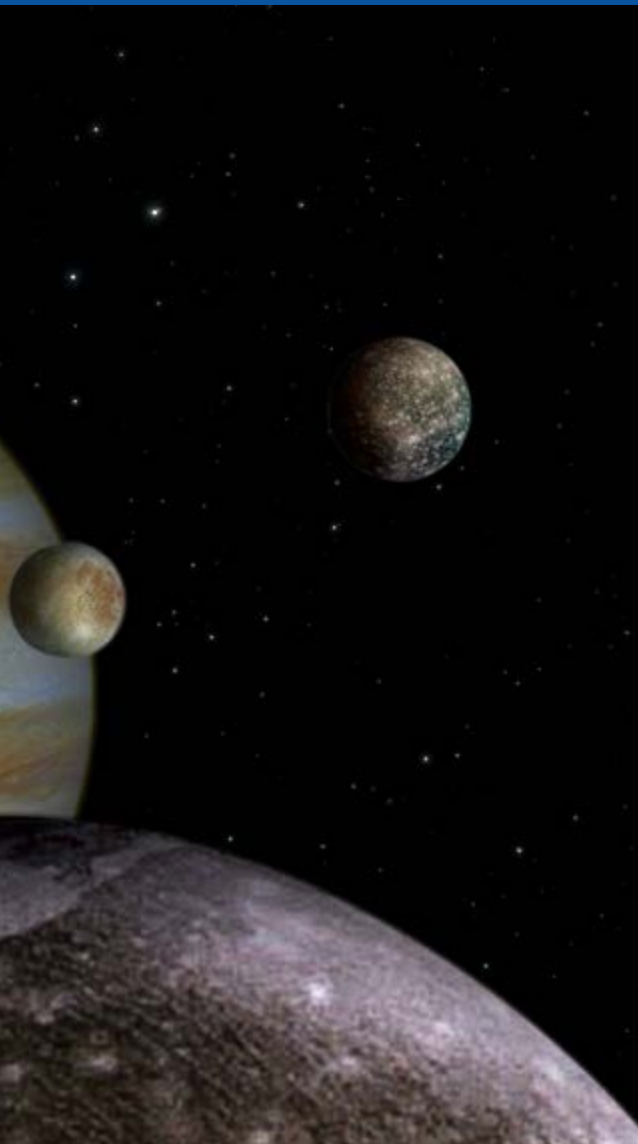
David Bolsée

et Lionel Van Laeken

Objectif de la mission JUICE

La géante gazeuse Jupiter et ses lunes sont connues pour représenter un système solaire en miniature. Sous les océans des lunes galiléennes (Ganymède, Callisto, Europe et Io) se cachent probablement des bio-signatures indiquant la possible existence de vie. Jupiter est

également un archétype, plus accessible à l'observation que la plupart des exoplanètes qui sont détectées aujourd'hui. Ces nombreuses motivations d'exploration ont amené l'Agence Spatiale Européenne (ESA) à sélectionner en 2012 la mission JUICE (JUUpiter and ICy moons Explorer) : une mission de classe L (Large) intégrée au programme Cosmic Vision 2015-2025, qui propose d'étudier le système jovien dans son ensemble. Le lancement est prévu en septembre 2022 depuis la base de lancement à Kourou (Guyane française).



© Spacecraft: ESA/ATG medialab; Jupiter: NASA/ESA/J. Nichols (University of Leicester); Ganymede: NASA/JPL; Io: NASA/JPL/University of Arizona; Callisto and Europa: NASA/JPL/DLR

Le satellite partira à bord d'une fusée Ariane 5 et voyagera pendant près de neuf ans avant d'atteindre Jupiter en 2031. Les objectifs principaux consistent à étudier l'atmosphère de Jupiter (structure, dynamique et composition), sa magnétosphère, la surface (glaces, matières organiques et minéraux) et les exosphères des satellites galiléens. La sonde JUICE doit embarquer 10 instruments et une expérience dont chacun a été sélectionné en fonction de sa capacité à répondre aux objectifs scientifiques de la mission.

L'instrument MAJIS

Dans ce contexte, MAJIS (Moons And Jupiter Imaging Spectrometer) apparaît comme un instrument de première importance. MAJIS est un imageur hyper spectral qui possède deux canaux de mesure VIS-NIR (visible - proche infrarouge) et IR (infrarouge) couvrant une plage spectrale étendue entre 0.5 μm et 5.54 μm . Il remplira de nombreux objectifs de la mission dans son ensemble : la caractérisation des surfaces des lunes glacées, leurs activités géologiques et cryo-volcaniques éventuelles, leurs exosphères, l'atmosphère de Jupiter, la surface d'Io et des satellites mineurs, et les anneaux joviens. MAJIS est développé par l'Institut d'Astrophysique Spatiale (IAS, France) sous la supervision du Centre National d'Etudes Spatiales (CNES, France) et de l'agence spatiale italienne (ASI).

Introduction

La mission JUICE de l'ESA débutera dès 2031, une étude approfondie du système jovien et de ses lunes glacées. Elle tentera d'apporter des réponses à l'histoire évolutive du système solaire. L'instrument franco-italien MAJIS contribuera de manière importante à cette mission par des données en imagerie spectrale dans deux canaux d'observations VIS-NIR et IR. Le développement de l'instrument a conduit à une implication passionnante des deux instituts fédéraux implantés sur le plateau d'Uccle : l'Institut royal d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB) et l'Observatoire Royal de Belgique (ORB). Leur rôle a consisté au développement et à l'utilisation d'une unité d'étalonnage pour la caractérisation radiométrique et électro-optique du détecteur de vol de MAJIS (canal VIS-NIR). Après deux années de préparatifs, la campagne d'étalonnage s'est déroulée durant l'été 2020.

Les exigences d'une mission spatiale

L'IASB et l'ORB ont une longue expérience pour le développement et la caractérisation de charges utiles pour des projets spatiaux. Les domaines couvrent par exemple, la physique solaire (instruments SOLSPEC, LYRA) et la planétologie (SOIR, NOMAD). Ces travaux ont donné lieu à de nombreuses collaborations internationales. Les conditions rencontrées lors d'une mission spatiale, tant pour la mise en orbite que pour les mesures en environnement spatial constituent un réel défi. Il faut en effet pouvoir garantir un traitement optimisé des signaux collectés par l'instrument pendant une mission. C'est une étape cruciale pour la réussite d'une mission spatiale qui intègre une conversion de signaux bruts, en données scientifiques finales de qualité. En conséquence, outre les tests environnementaux tels que des essais en vibration démontrant la robustesse de l'ensemble, chaque sous-système optique, et en particulier un détecteur, doit être testé et caractérisé sur le plan radiométrique.

L'application au projet MAJIS

Forts de leurs expériences acquises, l'IASB et l'ORB de par leurs équipes d'ingénieurs et de scientifiques ont été sollicités en 2015 par l'IAS (France), initiateur du projet MAJIS pour contribuer à la caractérisation du détecteur VIS-NIR, correspondant à un détecteur matri-

ciel de la société Teledyne (USA). Cette caractérisation étudie les propriétés intrinsèques du détecteur en l'absence de flux lumineux, ainsi que sa réponse face à un éclairage bien caractérisé. Il s'agit typiquement de l'homogénéité de sa réponse inter pixel, de sa linéarité, de sa réponse spectrale (efficacité quantique), de son niveau de saturation, de sa rémanence et d'autres propriétés de son électronique de proximité (gain, bruit, biais).

Avec le support de la Politique scientifique fédérale (BELSPO) et de l'ESA, l'objectif consistait à déployer au laboratoire, des moyens considérables pour tester sous vide et à très basse température le détecteur de vol. Les laboratoires disposaient déjà d'un équipement conséquent en radiométrie, mais celui-ci fut complété pour le vide thermique afin de s'aligner sur les exigences de qualité de mesure et de sécurité requises pour le projet MAJIS.



Figure 1. Vue générale de la cuve à vide de l'unité

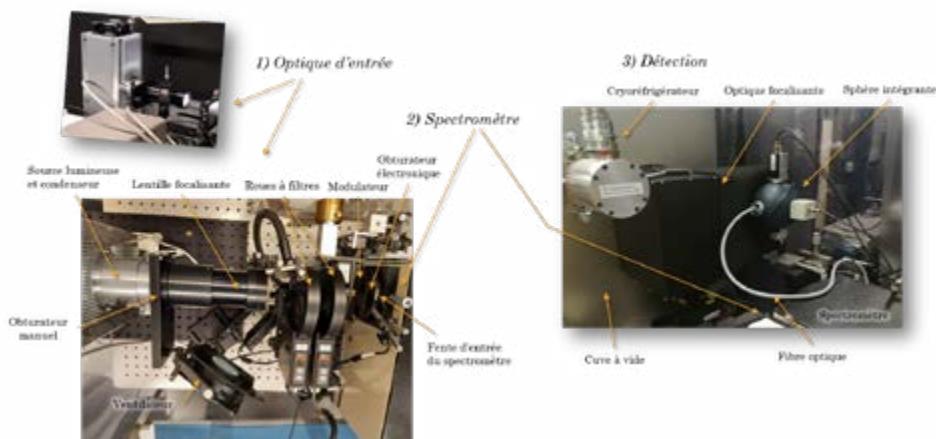


Figure 2. Equipment opto-mécanique de l'unité d'étalonnage MAJIS VIS-NIR.

Équipement, tests et performances de l'unité d'étalonnage

Le banc (Figure 1) a été assemblé dans les laboratoires de radiométrie de l'IASB. Les équipements fondamentaux consistent en une cuve à vide couplée à un cryostat permettant ainsi de simuler le vide spatial et les conditions thermiques de la mission JUICE. La gamme de températures à explorer pour le détecteur MAJIS s'étend de 125 K à 144 K (-148 °C à -129 °C). La cuve est équipée d'un hublot utilisé pour acheminer le flux lumineux à l'intérieur de la cuve lorsqu'un détecteur y est intégré en vue d'une caractérisation. L'essentiel de l'équipement optique pour la production et le transport de lumière, est assemblé sur un banc optique contigu à la cuve (Figure 2). S'agissant de composants modèle de vol, l'ensemble de ces équipements est installé dans une salle propre, sous un flux laminaire, répondant aux standards de propreté particuliers des plus élevés.

Pour accomplir un plan de test étendu, il faut disposer d'un flux lumineux stable, homogène, monochromatique, ajustable en longueur d'onde dans le domaine VIS-NIR et dont l'intensité peut être finement ajustée. Cette configuration a été respectée pour le projet MAJIS, en optimisant les performances pour la plage spectrale de 0.5 μm à 2.65 μm . Cependant, le banc pourrait également être optimisé dans le cadre d'autres projets, vers les courtes longueurs d'onde (UV) ou plus longues (IR). Le principe consiste à utiliser une lampe halogène à filament de tungstène comme source lumineuse, vu sa grande stabilité. Un double monochromateur permet la sélection d'un seul faisceau (une seule longueur d'onde ou couleur) qui est ensuite transféré et homogénéisé spatialement grâce à une fibre optique couplée à une sphère intégrante, jusqu'au hublot de la cuve. L'essentiel des composants opto-mécaniques pour configurer le faisceau (variation d'intensité, obturbateur, modulateur pour la détection de signaux NIR) sont insérés entre la lampe et le spectromètre. Divers moyens sont déployés pour la surveillance des caractéristiques de l'éclairage (principalement sa stabilité), à l'aide d'un radiomètre associé à la lampe, et de photodiodes VIS-NIR connectées à la sphère intégrante.

Certaines étant calibrées en unités radiométriques absolues, il est ainsi possible d'éclairer le détecteur avec un flux étalonné, ce qui est essentiel pour déterminer l'efficacité quantique du détecteur. Notons que pour le projet MAJIS VIS-NIR, une optique spéciale a également été développée pour éclairer le détecteur selon un angle de convergence (11°) afin de reproduire à l'identique la configuration du spectromètre MAJIS VIS-NIR une fois intégré dans le satellite JUICE. Au total, trois configurations ont été rendues possibles : obturateurs fermés ou non pour respectivement les caractérisations en l'absence ou présence de flux, puis sous faisceaux convergents.

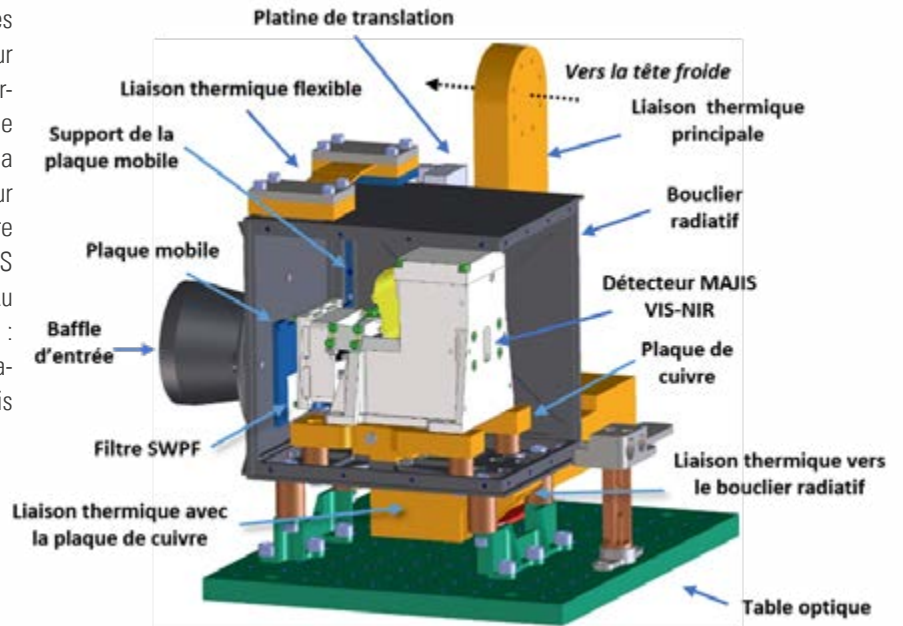


Figure 3. La monture conçue pour la caractérisation du détecteur modèle de vol MAJIS VIS-NIR, en garantissant sa sécurité, l'absence de contamination, la configuration du flux lumineux et la régulation à basse température (entre 157 °C à -120 °C).

Dans la cuve, une monture sophistiquée (Figure 3), connectée à l'équipement cryogénique, a été conçue pour garantir la sécurité, une absence de contamination moléculaire, et des conditions thermiques stables nécessaires pour caractériser le détecteur de vol. L'unité d'étalonnage VIS-NIR est automatisée grâce à des logiciels de contrôle développés sous LabVIEW. Enfin, un système de sécurité a été développé à l'extrême afin de répondre aux exigences du CNES et de l'ESA en matière d'étalonnage de détecteurs de vol, et ainsi garantir leur intégrité. Il permet une gestion de haut niveau des risques associés à d'éventuelles défaillances de logiciels et d'équipements de vide thermique. L'unité d'étalonnage VIS-NIR ainsi conçue a été validée au cours de tests à vide ou en utilisant un détecteur non sélectionné comme modèle de vol. Le contrôle qualité a été assuré tout au long du projet par les spécialistes du B.USOC (Belgian User Support and Operations Centre).

Le plan de test est résumé sur la Figure 4, où apparaît une configuration propre au détecteur MAJIS (présence d'un filtre dit 'LVF' devant le détecteur). Ce plan implique de nombreuses adaptations de température, longueur d'onde du faisceau, niveau d'illumination, et de paramètres propres au détec-

teur (mode de lecture, temps d'intégration). Le développement de cette unité d'étalonnage, à charge des laboratoires de radiométrie, a été le fruit de la collaboration entre celui-ci et différentes sections de l'IASB, principalement le département d'ingénierie. Il est important de souligner l'apport de l'ORB dans le domaine de la caractérisation de détecteurs matriciels. Le savoir-faire est notamment porté sur leurs logiciels de traitement de données de caractérisation, qui ont été adaptés ici pour le projet MAJIS.

Enfin, il est important de souligner la pérennité de l'investissement dans une telle infrastructure de laboratoire. Par conséquent, cette unité va rester pleinement opérationnelle et pourra contribuer aux tests d'autres charges utiles tels que des sous-systèmes ou un instrument dans son ensemble, dans le cadre d'autres projets spatiaux. De plus, l'équipe en charge du laboratoire est maintenue en fonction, avec un savoir-faire avéré.

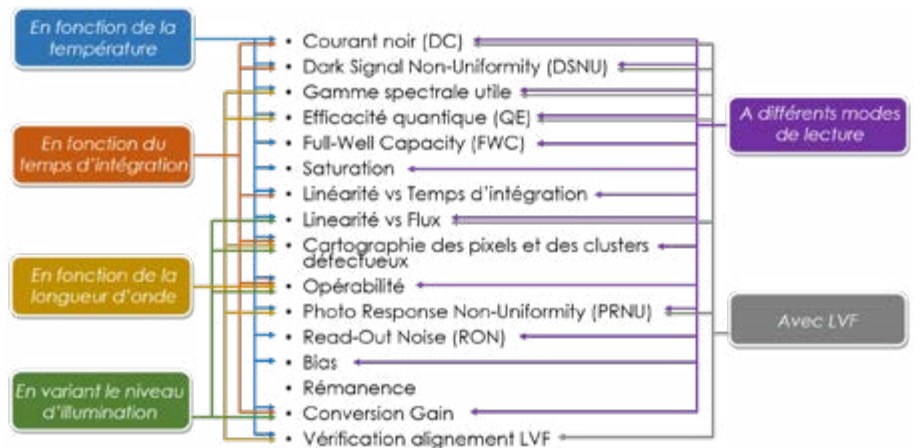


Figure 4. Résumé du plan de test pour la caractérisation d'un détecteur MAJIS VIS-NIR, comprenant l'ensemble des tâches et dépendances en paramètres physiques. L'unité d'étalonnage dispose de performances optiques et un vide thermique autorisant l'accomplissement du plan de mesure complet. La configuration LVF est au détecteur MAJIS (présence d'un filtre devant le détecteur).

La contribution du CSL

Notons que le Centre Spatial de Liège (CSL) a contribué de manière importante au développement de MAJIS, en réalisant des tests de détecteurs prototypes, exposés à des faisceaux de haute énergie. En effet, Jupiter possède une magnétosphère. L'origine du champ magnétique est identique à celle de la Terre, mais il est bien plus intense. La magnétosphère jovienne est par conséquent très riche en ions lourds et en protons, d'où la nécessité de développer des instrumentations spatiales robustes contre les radiations. En effet, les détecteurs de MAJIS doivent résister aux interactions avec les particules et limiter les dégradations de performances. Cela doit être testé et caractérisé avant le vol.

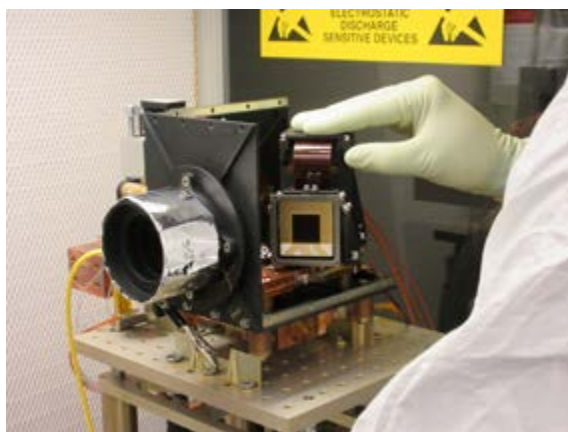


Figure 5. Le détecteur modèle de vol MAJIS VIS-NIR en cours de préparation en vue de son intégration dans la chambre à vide pour sa caractérisation électro-optique complète dans un environnement thermique sous vide.

Figure 6. Le détecteur MAJIS VIS-NIR lors de son intégration dans la chambre à vide pour la campagne de caractérisation.



Campagne de mesures MAJIS VIS-NIR

Suivant un calendrier de test strict et après une dernière série de tests de validation, la campagne de caractérisation du détecteur modèle de vol VIS-NIR a débuté fin juin 2020 après l'intégration du détecteur (Figure 5 et Figure 6). L'ensemble des performances ont été analysées lors de plusieurs semaines de tests. Après le traitement des données par l'IAS, le détecteur a été validé pour la mission MAJIS/JUICE. Une seconde campagne a eu lieu au mois d'août, axée sur le détecteur dans sa configuration de vol, à savoir avec le filtre LVF placé devant la surface réceptrice et un faisceau lumineux convergent. La confirmation des performances, combinée à la vérification de l'alignement de ce filtre a permis de clôturer la campagne avec succès.

Lorsque l'on évoque l'ensemble des attentes des scientifiques européens pour l'étude du système jovien grâce aux performances à venir de l'instrument MAJIS, inégalées à ce jour par les sondes ayant déjà exploré Jupiter, on appréhende toute l'importance des travaux effectués sur le plateau d'Uccle. Enfin, une dernière campagne a eu lieu en mai 2021 et a permis de caractériser le détecteur modèle de réserve de l'instrument MAJIS. A priori, ce détecteur ne devrait pas être utilisé pour cette mission, à moins qu'un problème fortuit n'apparaisse pour le modèle de vol avant le lancement. Dans ce cas, c'est ce modèle de réserve qui prendrait la relève.

Les auteurs

- Docteur en sciences de l'ingénieur, **David Bolsée** est le responsable de la section D42 de l'IASB, axée sur la mesure de l'éclairement solaire et les caractérisations radiométriques en laboratoire.
- Ingénieur en aérospatiale, **Lionel Van Laeken** a contribué au développement de l'unité d'étalonnage MAJIS VIS-NIR.

L'équipe MAJIS VIS-NIR

- A l'IASB : David Bolsée, Ann Carine Vandaele, Miriam Cisneros, Nuno Pereira, Lionel Van Laeken, Cédric Depiesse, Séverine Robert, Lars Jacobs et les techniciens associés, Claudio Queirolo et Michel Kruglanski (B.USOC), et les supports ponctuels des services IT, d'ingénierie, administratifs, de communication et de l'infrastructure.
- A l'ORB : Özgür Karatekin et Samuel Gissot.

Remerciements

Les développements réalisés à l'IASB et à l'ORB en support de la mission MAJIS/JUICE sont financés par la Politique scientifique fédérale (BELSPO), par le projet JUICE de l'ESA dans le cadre du programme PRODEX (PEA 4000124255) et par le Fonds de la recherche scientifique (FNRS), bourse 34828772. Nous remercions particulièrement les experts de l'IAS, du CNES et de l'ESA pour le support précieux apporté lors du développement de l'unité d'étalonnage.

Conclusions

La collaboration efficace entre les deux instituts scientifiques fédéraux que sont l'IASB et l'ORB, a permis de répondre avec succès à la sollicitation de l'équipe scientifique et technique MAJIS de l'IAS (France), avec le support de BELSPO et de l'ESA. Une campagne de caractérisation d'une grande importance pour le succès de la mission MAJIS/JUICE a permis de valider le détecteur modèle de vol VIS-NIR. L'unité d'étalonnage assemblée à l'IASB reste opérationnelle et de par sa flexibilité peut contribuer à d'autres caractérisations à l'avenir, pour d'autres projets spatiaux.