

PICASSO

ÉTUDE DE L'ATMOSPHÈRE ET DE L'IONOSPHERE

PAR UN CUBESAT



Figure 1: Vue d'artiste du satellite PICASSO en orbite autour de la Terre.

Didier Fussen,
Emmanuel Dekemper,
Philippe Demoulin,
Didier Pieroux,
Filip Vanhellemont,
Sylvain Ranvier,
Michel Anciaux,
Sabrina Bonnewijn,
Pepijn Cardoen,
Emmanuel Gamby et
Johan De Keyser

L'objectif de la mission PICASSO est de démontrer la capacité, pour des nano-satellites peu onéreux, d'effectuer des mesures scientifiques, à distance et in-situ, des propriétés physico-chimiques de l'atmosphère terrestre. En outre, PICASSO vise à amener les instruments de bord et les composants de traitement des données embarqués à un haut niveau de maturité technologique, afin de pouvoir les incorporer dans de futures missions scientifiques avec un risque réduit. Pour atteindre ces objectifs, le satellite sera lancé en 2017 sur une orbite terrestre basse, à haute inclinaison, avec une durée de vie d'au moins 1 an. Il embarquera un spectromètre imageur miniature (VISION), pour observer les occultations solaires, et un instrument à sondes de Langmuir à balayage (SLP), pour mesurer les caractéristiques du plasma dans l'ionosphère.

Introduction

PICASSO (*PICo-satellite for Atmospheric and Space Science Observations*) est un projet de CubeSat scientifique initié par l'Institut royal d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB) en 2010. Il a été proposé avec succès à la Politique scientifique fédérale (BELSPO) et à l'ESA en tant que démonstrateur orbital de CubeSat scientifique.

Outre l'IASB, qui est maître d'œuvre du projet et responsable scientifique des 2 instruments embarqués, le consortium PICASSO comprend trois autres partenaires européens :

- Clyde Space Ltd (Royaume-Uni), en charge du développement de la plateforme, de l'intégration de la charge utile, de la station au sol, ainsi que du contrôle et du suivi du satellite;
- VTT (Finlande), en charge du développement de l'instrument VISION;
- le Centre Spatial de Liège (Belgique), responsable de la coordination technique et des aspects de contrôle de qualité du projet.

La plateforme du satellite est un triple CubeSat¹ de 32 x 10 x 10 cm, avec quatre panneaux solaires déployables (Figure 1), un système de communications UHF/VHF et en bande S, deux ordinateurs de bord et un système à haute performance de détermination et de contrôle de l'attitude du satellite.

L'objectif des deux instruments embarqués est :

- (i) de mesurer la concentration d'ozone dans la stratosphère et la température de l'air jusque dans la mésosphère, grâce à un spectromètre imageur miniature (VISION, *Visible Spectral Imager for Occultation and Nightglow*), développé par VTT (Finlande);
- (ii) de caractériser le plasma (densité et température électroniques) dans la haute atmosphère, grâce aux mesures d'une sonde de Langmuir à 4 canaux (SLP, *Sweeping Langmuir Probe*), développée à l'IASB.

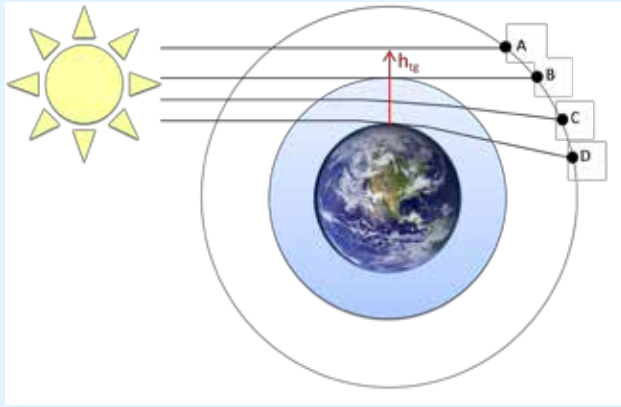


Figure 2: Principe de l'occultation solaire.



Figure 3. Aplatissement de l'image du Soleil lors d'un coucher.
Photo EPOD 6 décembre 2013

VISION

Le spectromètre imageur VISION peut enregistrer des images à n'importe quelle longueur d'onde dans le visible et le proche infrarouge, entre 430 and 800 nm, avec un champ de vue de 2.5°. La sélection des longueurs d'onde est réalisée grâce à un interféromètre de Fabry-Perot², dont l'espacement entre les miroirs est ajustable par un dispositif piézoélectrique.

VISION observera les occultations du Soleil à travers l'atmosphère de la Terre. En mesurant l'absorption de la lumière, des profils verticaux de la concentration d'ozone pourront être déduits. L'instrument mesurera également la forme du Soleil réfracté par l'atmosphère terrestre, afin de déterminer la température de la stratosphère et de la mésosphère.

Occultation solaire

La Figure 2 illustre le principe général de mesure par occultation solaire. L'atmosphère de la Terre est représentée par la zone bleu clair autour de la photo de la Terre, l'orbite du satellite par le cercle noir et le Soleil par le symbole jaune. L'altitude tangente h_{ig} est définie comme la plus courte distance entre le rayon de lumière considéré et la surface de la Terre.

Lors d'un coucher de soleil par exemple, le satellite se trouve au point A sur son orbite et l'imageur pointe vers le Soleil. Le rayon de lumière du Soleil passe au-dessus de l'atmosphère, le long d'un trajet sans absorption. L'intensité solaire hors atmosphère est alors mesurée à des longueurs d'onde prédéfinies, avant que le satellite n'atteigne le point B où le faisceau de lumière commence à interagir avec l'atmosphère.

Le satellite poursuit son chemin autour de la Terre, la lumière du Soleil est atténuée par l'atmosphère et est mesurée de façon répétitive le long de l'orbite, comme par exemple à l'emplacement C. Avant d'atteindre l'imageur, la lumière du Soleil passe à travers une atmosphère de plus en plus épaisse: d'une part, la longueur totale du trajet dans l'atmosphère augmente; d'autre part, plus l'altitude tangente est petite, plus la densité atmosphérique est élevée. Enfin, le satellite atteint l'emplacement D, après lequel il se trouve dans l'ombre de la Terre.

Mesure de la température

Dans l'atmosphère, les rayons de lumière du Soleil sont réfractés et s'infléchissent vers la Terre. Vue de l'imageur, la position apparente du Soleil s'écarte de la Terre, comme si la Terre le repoussait. Ce déplacement est maximal au point D, juste avant que le Soleil ne disparaisse derrière la Terre. Comme illustré sur la Figure 3, la forme apparente du disque solaire se contracte le long de la verticale. Cette déformation se produit parce que les rayons issus du bas de l'image solaire se propagent dans des couches atmosphériques plus denses que ceux émanant du haut. La réfraction varie en fonction de la température des différentes couches atmosphériques. Les profils de température mésosphérique et stratosphérique peuvent donc être déduits de l'analyse de la forme du Soleil en fonction de l'altitude.

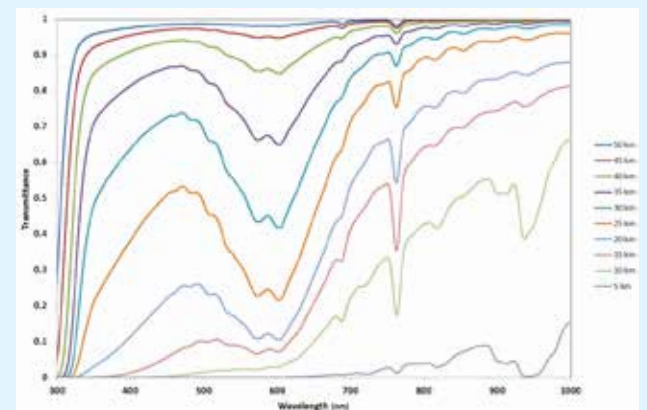


Figure 4: Facteur de transmission de l'atmosphère en fonction de la longueur d'onde, pour différentes altitudes tangentes: la courbe supérieure correspond à une altitude de 50 km, et les courbes suivantes à des altitudes diminuant par incrément de 5 km, jusqu'à une altitude de 5 km, qui est représentée par la courbe inférieure. La diminution de la transmission vers 600 nm correspond à l'absorption de photons par l'ozone atmosphérique, dans la bande dite de Chappuis.

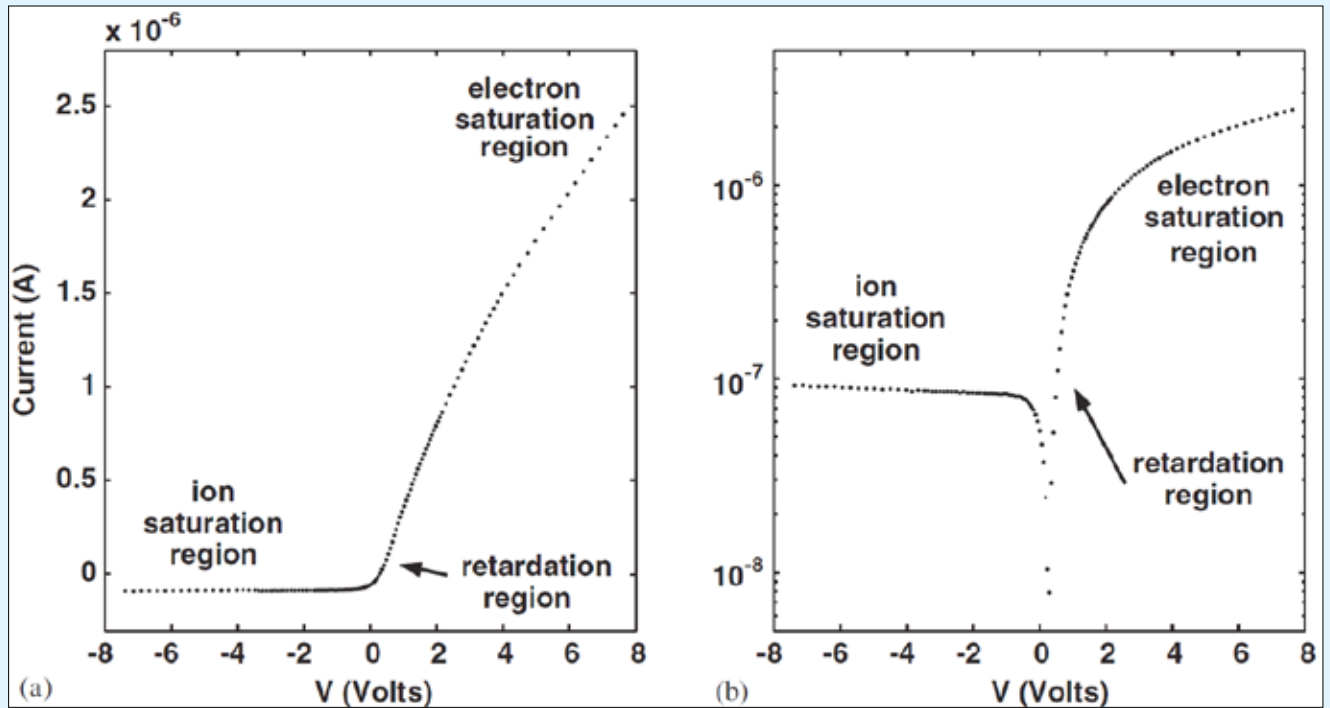


Figure 5: Caractéristiques courant-tension typiques d'une sonde de Langmuir, avec l'axe des courants linéaire (à gauche) et logarithmique (à droite). (Source : Mero et al., *Proceedings of the AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2015)

Mesure de l'ozone

Le long de son trajet dans l'atmosphère, l'intensité du rayonnement solaire est atténuée par des processus de diffusion et d'absorption. En étudiant l'atténuation à différentes longueurs d'onde, la concentration des composants de l'atmosphère peut être déduite. La Figure 4 montre une simulation numérique de l'atténuation du rayonnement solaire à différentes altitudes tangentes. La diminution du signal vers 600 nm correspond à l'absorption de la lumière par l'ozone atmosphérique : il s'agit de la bande d'absorption dite de Chappuis.

Pour mesurer l'ozone (O_3), nous envisageons d'enregistrer l'intensité solaire à trois longueurs d'onde différentes, l'une autour de 600 nm, au centre de la bande de Chappuis, où l'absorption par l' O_3 est maximale, et à deux autres longueurs d'onde situées de chaque côté de la bande de Chappuis, là où l'absorption par l' O_3 est négligeable: le rapport de ces longueurs d'onde fournira la quantité d' O_3 présente dans le trajet optique.

SLP

Le second instrument de PICASSO est SLP, une sonde de Langmuir à 4 canaux, qui effectuera des mesures *in situ* dans l'ionosphère.

Le principe de mesure de SLP est basé sur la théorie classique de la sonde de Langmuir³. En faisant varier le potentiel électrique des sondes par rapport au potentiel du plasma, tout en mesurant le courant dans chaque sonde, l'appareil enregistre une caractéristique courant-tension à partir de laquelle la densité et la température des électrons, la densité des ions et le potentiel électrique du satellite peuvent être déduits. Les mesures sont effectuées

dans trois régions : les régions de saturation en ions, de retard et de saturation en électrons. Les caractéristiques courant-tension typiques d'une telle sonde sont illustrées dans la Figure 5.

La densité des ions est déduite de la région de saturation en ions, où le potentiel des sondes est suffisamment négatif pour repousser les électrons et n'attire que les ions positifs. La température électronique et le potentiel du satellite sont évalués à partir de la zone de retard, où le potentiel des sondes est proche de celui du plasma de telle sorte qu'à la fois les ions et les électrons sont attirés. La densité électronique est dérivée de la région de saturation en électrons, où le potentiel des sondes est suffisamment positif pour repousser les ions et n'attire que les seuls électrons.

En mode nominal, SLP fait varier périodiquement le potentiel des sondes de -5 V à +13 V par rapport au potentiel du plasma, afin de mesurer la densité et la température des électrons, ainsi que le potentiel du satellite et la densité des ions (si elle est assez grande). Dans un autre mode, l'instrument mesure uniquement dans la zone de saturation d'électrons, mais à un rythme plus élevé (plusieurs milliers de fois par seconde), ce qui permet d'estimer la densité des électrons avec une résolution spatiale de l'ordre du mètre.

Les sondes sont des minces tiges cylindriques en titane, montées sur les quatre panneaux solaires. En plus de fournir une redondance des mesures, cette configuration garantit qu'au moins une sonde est à tout moment en dehors du sillage du satellite.

Détermination et contrôle de l'attitude du satellite

L'attitude d'un satellite est son orientation dans l'espace autour de son centre de gravité. Une exigence fondamentale pour la mission PICASSO est de veiller à ce que l'instrument VISION reste pointé vers le Soleil pendant toute la durée d'une occultation. Cela nécessite une précision de pointage de VISION vers le Soleil de mieux qu'un degré. Pour répondre à cette exigence, le système de détermination et de contrôle de l'attitude du satellite doit à la fois connaître précisément la direction de pointage et être en mesure de la corriger finement. Il comprend des roues de réaction, un capteur solaire fin, des capteurs solaires grossiers, un viseur d'étoiles, des magnétomètres, des magnéto-coupleurs, un récepteur GPS et une carte-mère avec 2 processeurs pour gérer ces différents sous-systèmes.

Les roues de réaction sont utilisées pour effectuer des changements d'orientation du vaisseau spatial. Elles comprennent un moteur électrique et un volant d'inertie tournant à grande vitesse (jusqu'à 7500 tours par minute). Le moteur électrique est utilisé pour faire varier à la demande la vitesse du volant d'inertie. Lorsque cette dernière est modifiée, l'engin spatial tourne dans le sens opposé au sens de rotation du moteur (conservation du moment angulaire). PICASSO contient trois roues de réaction dont les axes sont perpendiculaires les uns aux autres, ce qui permet de réorienter l'engin spatial dans n'importe quelle direction.

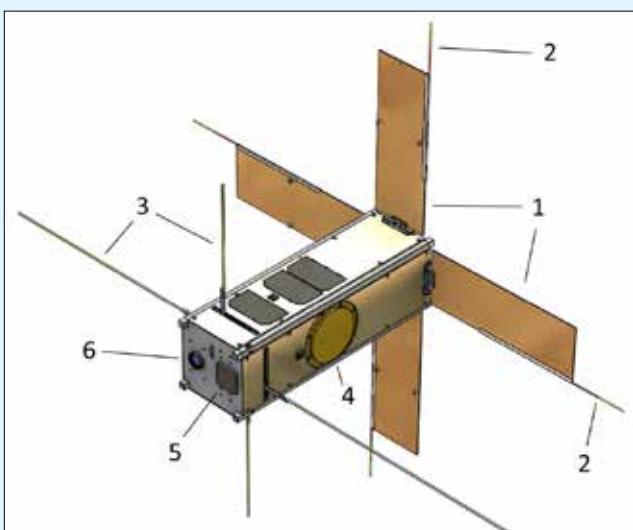


Figure 6: Vue arrière de PICASSO. En (1) les panneaux solaires déployés, de 20 cm sur 10 cm; le long de chaque panneau, les sondes de Langmuir (2) de l'expérience SLP. En (3), les antennes VHF/UHF et en (4) l'antenne planaire de l'émetteur en bande S, située sur le côté du satellite faisant face à la Terre. En (5) le récepteur GPS et en (6) le viseur d'étoiles.

Le capteur solaire fin est monté sur la face du satellite qui pointe vers le Soleil et est utilisé comme capteur primaire sur la partie de l'orbite éclairée par le Soleil, tandis que le viseur d'étoiles est utilisé pour déterminer l'orientation du satellite sur la partie de l'orbite dans l'ombre. Les magnétomètres sont utilisés pour détecter l'amplitude et la direction du champ magnétique autour du CubeSat.

Les magnéto-coupleurs sont des bobines électromagnétiques intégrées dans les panneaux solaires. Ils produisent un champ magnétique qui interagit avec le champ magnétique de la Terre, ce qui génère un couple mécanique. Ces dispositifs sont utilisés pour éliminer les rotations résiduelles du vaisseau spatial, pour pointer grossièrement le satellite et pour 'dé-saturer' les roues de réaction (c'est-à-dire augmenter ou réduire leur vitesse de rotation sans pour autant changer l'orientation du satellite).

Gestion des commandes et des données

Il y a deux ordinateurs à bord de PICASSO : l'ordinateur de bord primaire, qui gère le fonctionnement de la plateforme, et l'ordinateur de la charge utile, qui contrôle les instruments scientifiques. Ce dernier a également pour tâche d'analyser les données de VISION pour n'en conserver que la partie strictement utile. Cet instrument produit en effet plus de 9 Go de données par occultation, et transmettre au sol ces mesures brutes dans leur intégralité est infaisable, vu les limitations de la bande passante disponible.

Communications

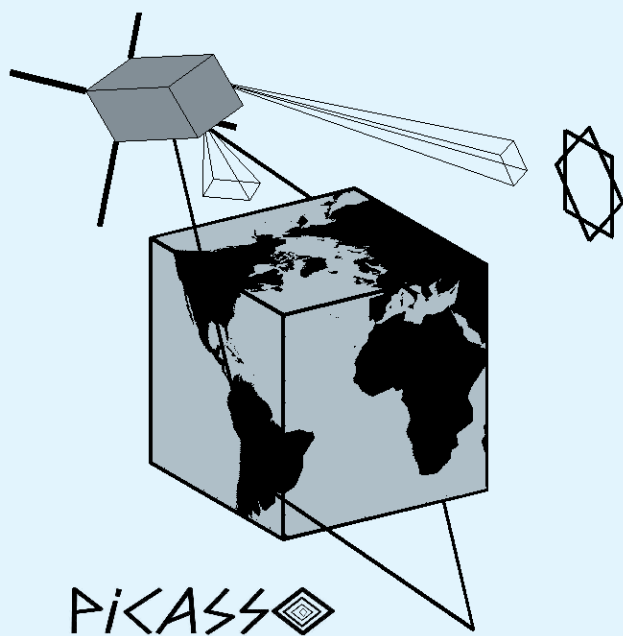
Le satellite communique avec le sol grâce à un émetteur-récepteur VHF/UHF, destiné au contrôle de la plateforme. Quand il ne transmet pas, cet émetteur-récepteur entre dans un mode de balise morse, où il diffuse un code d'identification et des données succinctes pour vérifier l'état de santé du satellite. Un second émetteur, en bande S, est utilisé pour le transfert à haut débit des données de la charge utile (Figure 6). Il peut transmettre au moins 50 Mo par jour. La station de réception est située chez Clyde Space Ltd (Glasgow, Royaume-Uni).

Conclusion

PICASSO est un projet CubeSat ambitieux, porteur d'une mission scientifique visant à étudier l'ozone dans la stratosphère, le profil de température de l'air jusqu'à la mésosphère et les densité et température électroniques dans l'ionosphère.

Son spectromètre imageur, VISION, a imposé des exigences importantes lors de la conception du satellite, car il doit être pointé précisément vers le Soleil même quand il sort de l'ombre de la Terre, afin de réaliser des observations de l'atmosphère à différentes altitudes. Cela nécessite un système de détermination et de contrôle d'attitude très performant, capable de contrôler le vaisseau spatial sur 3 axes, tout en assurant un pointage fin à la fois dans les conditions d'éclipse et de lumière du Soleil. En outre, la charge utile génère près de 50 Mo de données par seconde, qui doivent être traitées à bord avant d'être envoyées vers le sol. Plus encore, ce petit CubeSat doit générer sur son orbite une puissance moyenne de plus de 10 W, puissance nécessaire pour remplir les objectifs de la mission.

En plus des buts scientifiques clés de la mission, PICASSO vise à démontrer la capacité des petits satellites à réaliser des expériences scientifiques réelles. Démontrer qu'il est possible d'atteindre des objectifs scientifiques importants sur une plate-forme à très faible coût, ouvrira la porte à l'utilisation de vaisseaux spatiaux de cette classe pour des missions et des applications futures.



Remerciements

La plateforme de PICASSO a été financée grâce à un don du Lotto. La charge utile et l'intégration sont soutenues financièrement par l'ESA et par BELSPO. Le développement de SLP est sponsorisé par le STCE (Solar-Terrestrial Centre of Excellence).

Notes

¹ CubeSat désigne un format standardisé de nano-satellites, défini afin de réduire les coûts de lancement des très petits satellites et ainsi permettre aux universités de développer et de placer en orbite leurs propres engins spatiaux. Les satellites les plus simples répondant à ce standard ont la forme d'un cube d'un décimètre de côté (volume d'un 1 litre), doivent peser moins de 1,33 kg et utilisent des composants électroniques banalisés. Les satellites peuvent être constitués de l'assemblage de plusieurs CubeSats : par convention le CubeSat de base est désigné par l'abréviation 1U. On trouve également des 2U (deux 1U mis bout à bout), 3U (masse < 4 kg), 1,5 U et des 6U. Picasso est un CubeSat 3U.

² L'interféromètre de Fabry-Perot est un interféromètre optique constitué de deux miroirs semi-réfléchissants plans et parallèles à haut coefficient de réflexion. La lumière entrant dans l'interféromètre effectue de multiples allers-retours à l'intérieur de cette cavité optique et ressort partiellement à chaque réflexion. Les rayons sortants interfèrent entre eux et seuls quelques pics de longueurs d'onde sont transmis.

³ Merlino R. L. 'Understanding Langmuir probe current-voltage characteristics'. Am. J. Phys. 75(12), 1078-1085, DOI: 10.1119/1.2772282, 2007.

Les auteurs

Didier Fussen, Emmanuel Dekemper, Philippe Demoulin, Didier Pieroux, Filip Vanhellemont, Sylvain Ranvier, Michel Anciaux, Sabrina Bonnewijn, Pepijn Cardoen, Emmanuel Gamby et Johan De Keyser sont chercheurs à l'Institut Royal d'Aéronomie Spatiale de Belgique.