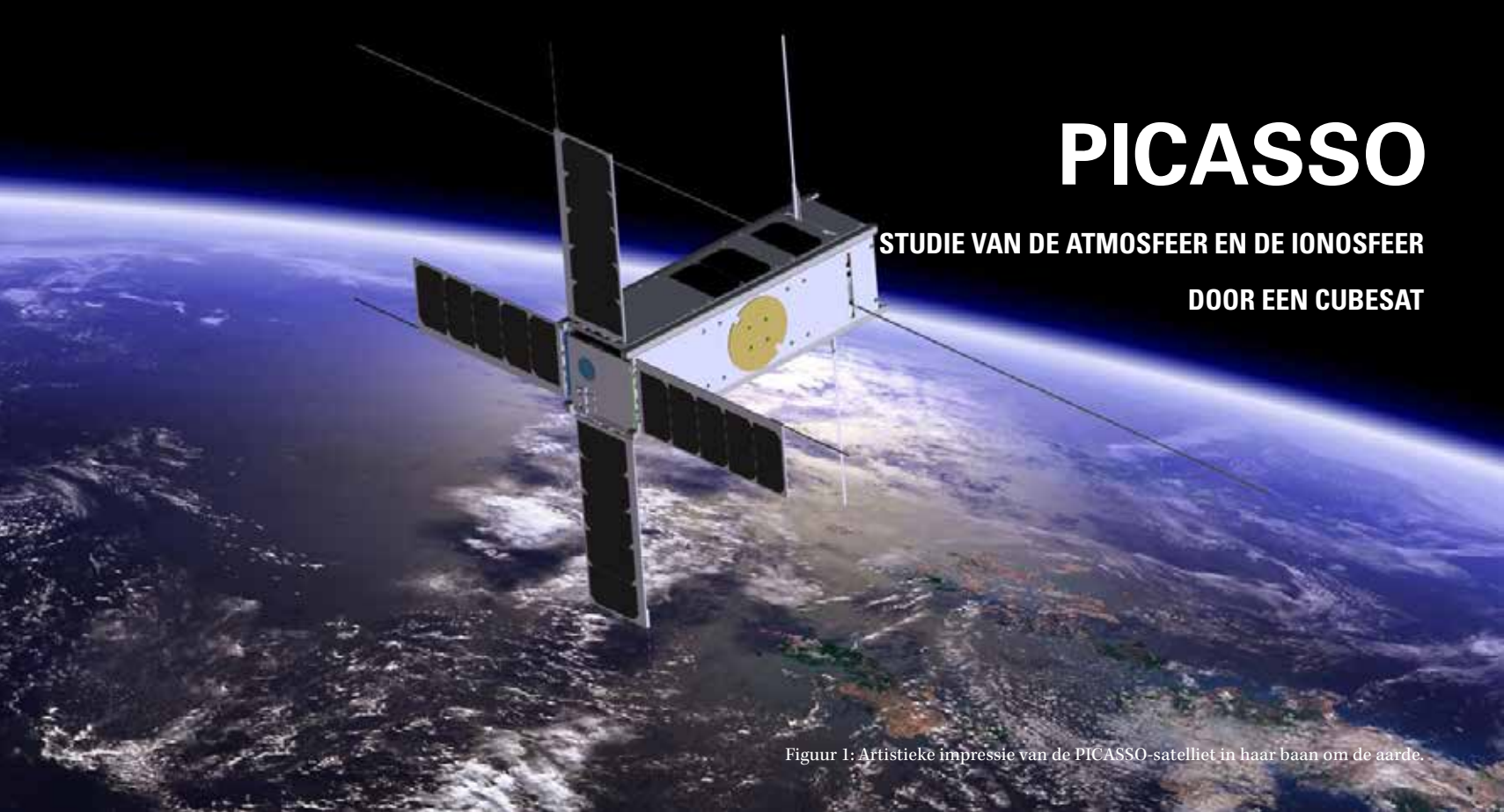


# PICASSO

STUDIE VAN DE ATMOSFEER EN DE IONOSFEER

DOOR EEN CUBESAT



Figuur 1: Artistieke impressie van de PICASSO-satelliet in haar baan om de aarde.

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

De PICASSO-missie wil aantonen dat goedkope nanosatellieten in staat zijn om, zowel remote (vanop afstand) als in situ, wetenschappelijke metingen van de fysicochemische eigenschappen van de aardatmosfeer uit te voeren. Daarnaast wil PICASSO de instrumenten en de dataverwerkingscomponenten aan boord tot een hoog niveau van technologische maturiteit brengen, om ze later met een verlaagd risico te kunnen gebruiken in toekomstige wetenschappelijke missies. Om deze doelstellingen te bereiken, zal de satelliet in 2017 in een lage baan met hoge inclinatie rond de aarde gebracht worden, en met een levensduur van minstens één jaar. De satelliet zal een geminiaturiseerde beeldspectrometer (VISION) met zich meedragen, voor het waarnemen van zonneoccultaties, evenals een instrument (SLP, Sweeping Langmuir Probe) voor het vastleggen van de plasmakarakteristieken in de ionosfeer.

## Inleiding

PICASSO (*PICo-satellite for Atmospheric and Space Science Observations*) is een wetenschappelijk CubeSat-project dat door het Koninklijk Belgisch Instituut voor Ruimte-Aeronomie (BIRA) in 2010 opgestart werd. Het project werd met succes voorgesteld aan het Federaal Wetenschapsbeleid (BELSPO) en aan ESA als in orbit demonstratie-instrument van een wetenschappelijke CubeSat.

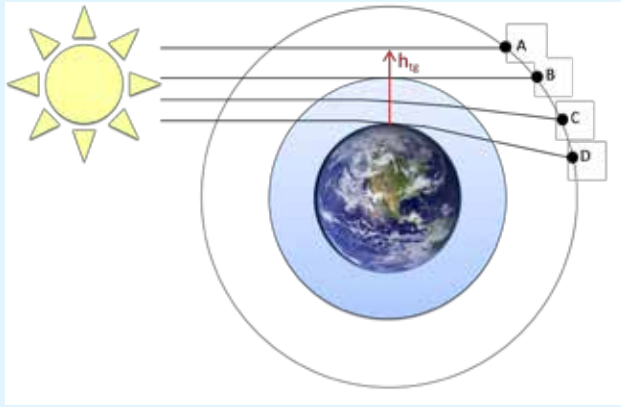
Behalve het BIRA, dat projectcoördinator en wetenschappelijke verantwoordelijke is voor de twee instrumenten aan boord, bestaat het PICASSO-consortium verder uit drie andere Europese partners:

- Clyde Space Ltd (Verenigd Koninkrijk), verantwoordelijk voor de ontwikkeling van het platform, de integratie van de nuttige lading, het grondstation, en de controle en opvolging van de satelliet;
- VTT (Finland), verantwoordelijk voor de ontwikkeling van het VISION-instrument;
- Centre Spatial de Liège (België), verantwoordelijk voor de technische coördinatie en de aspecten m.b.t. de kwaliteitscontrole van het project.

Het platform van de satelliet is een drievoudige (3U) CubeSat<sup>1</sup> van 32 x 10 x 10 cm, met vier uitklapbare zonnepanelen (Figuur 1), een UHF/VHF- en S-band-communicatiesysteem, twee boordcomputers, een hoogperformant systeem voor het bepalen en controleren van de attitude van de satelliet.

Het doel van de twee wetenschappelijke instrumenten aan boord is:

- (i) om de ozonconcentratie in de stratosfeer en de luchttemperatuur tot in de mesosfeer te meten, met een geminiaturiseerde beeldspectrometer (*VISION, Visible Spectral Imager for Occultation and Nightglow*), ontwikkeld door VTT (Finland);
- (ii) om het plasma (elektronendichtheid en -temperatuur) in de bovenste atmosfeer te karakteriseren, door metingen met een Langmuir-sonde met 4 kanalen (*SLP, Sweeping Langmuir Probe*), ontwikkeld aan het BIRA.



Figuur 2: Principe van de zonneoccultatie.



Figuur 3: Afplatting van het beeld van de zon tijdens een zonsondergang. Foto's: EPOD 6 december 2013.

### VISION

De beeldspectrometer VISION kan beelden registreren op eender welke golflengte in het visueel en nabij-infrarood deel van het optisch spectrum, tussen 430 en 800 nm, met een openingshoek van  $2,5^\circ$ . De selectie van de golflengtes gebeurt met behulp van een Fabry-Perot<sup>2</sup> interferometer, waarvan de afstand tussen beide spiegels aanpasbaar is via een piëzo-elektrisch systeem.

VISION zal de occultatie van de zon doorheen de aardatmosfeer observeren. Uit de absorptie van het licht kunnen verticale profielen van de ozonconcentratie afgeleid worden. Het instrument zal ook de zonnenschijf observeren, die door de breking in de aardatmosfeer vervormd wordt, om zo de temperatuur van de stratosfeer en de mesosfeer te bepalen.

### Zonneoccultatie

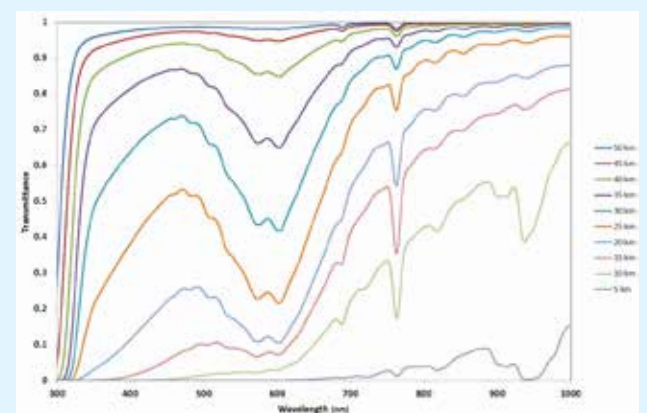
Figuur 2 illustreert het algemene principe voor het meten van zonneoccultaties. De atmosfeer van de aarde wordt aangeduid door de lichtblauwe zone rond de foto van de aarde, de satellietbaan door de zwarte cirkel en de zon door het gele symbool. De tangentiële hoogte  $h_{tg}$  wordt gedefinieerd als de kortste afstand tussen de beschouwde lichtstraal en het oppervlak van de aarde.

Tijdens een zonsondergang, bijvoorbeeld, bevindt de satelliet zich in het punt A in zijn baan en het instrument is gericht naar de zon. De zonnestraal passeert boven de atmosfeer langs een pad zonder absorptie. De zonne-intensiteit buiten de atmosfeer wordt gemeten op vooraf bepaalde golflengtes, vóór de satelliet het punt B bereikt, waar de lichtbundel met de atmosfeer begint te interageren.

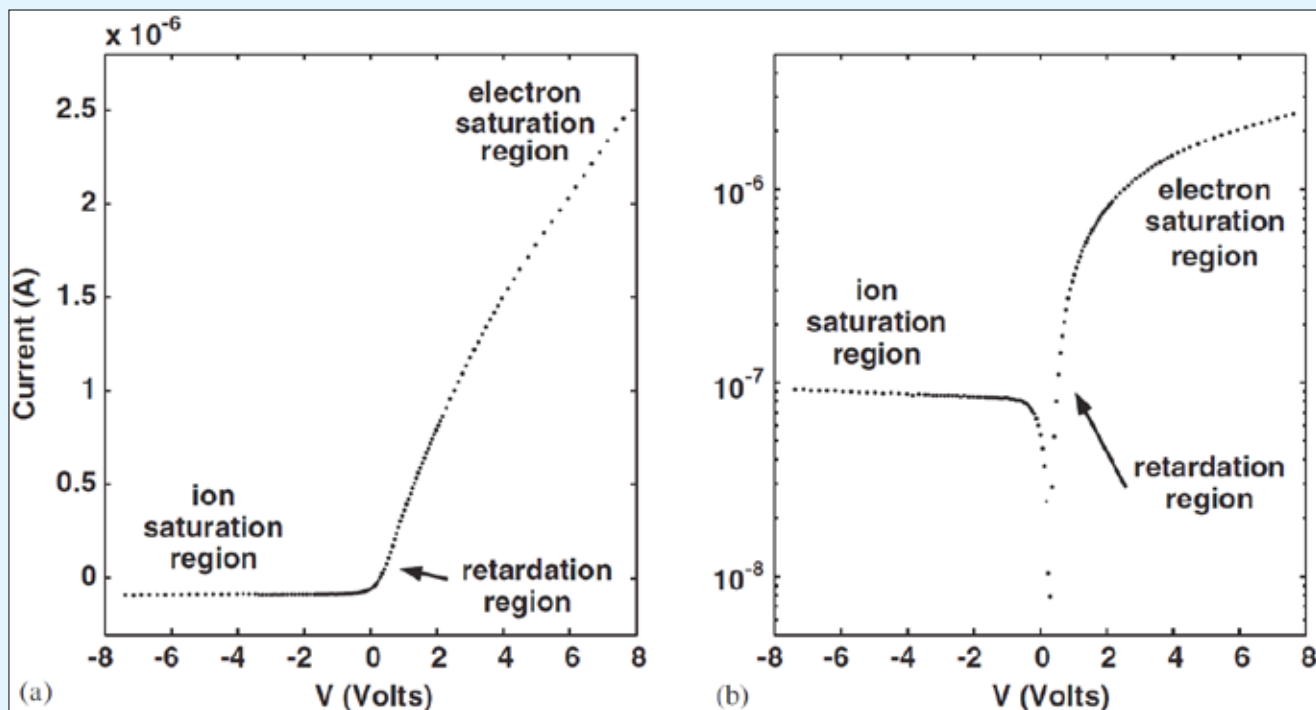
De satelliet vervolgt zijn weg rond de aarde, het zonlicht wordt verzwakt door de atmosfeer en wordt op verschillende posities langs de baan gemeten, zoals bijvoorbeeld op locatie C. Vooral eer het instrument te bereiken, reist het zonlicht doorheen een atmosfeer die steeds dikker en dikker wordt: enerzijds neemt de totale lengte van het pad doorheen de atmosfeer toe, anderzijds stijgt de luchtdichtheid bij kleinere tangentiële hoogte. Tenslotte bereikt de satelliet punt D, waarna hij in de schaduw van de aarde terechtkomt.

### Temperatuursmeting

In de atmosfeer worden de zonnestrallen gebroken en afgebogen naar de aarde toe. Gevolg: vanuit de beeldspectrometer gezien, lijkt de zon hoger te staan dan in werkelijkheid. Deze verplaatsing is maximaal in punt D, net vóór de zon achter de aarde verdwijnt. Zoals weergegeven in Figuur 3 trekt de schijnbare vorm van de zonnenschijf verticaal samen. Deze vervorming treedt op omdat de stralen afkomstig van de onderkant van de zonnenschijf door dichtere luchtlagen voortbewegen dan die van bovenaf. Refractie is afhankelijk van de temperatuur van de verschillende atmosferelagen. De temperatuurprofielen in de mesosfeer en de stratosfeer kunnen dus afgeleid worden uit de analyse van de vorm van de zon in functie van de hoogte.



Figuur 4: Transmissiefactor van de atmosfeer als functie van de golflengte voor verschillende tangentiële hoogtes: de bovenste curve correspondeert met een hoogte van 50 km, de daaropvolgende curven met hoogten dalend in stappen van 5 km tot een hoogte van 5 km (laagste curve). De vermindering van de transmissie rond 600 nm is het gevolg van de absorptie van fotonen door atmosferisch ozon, in de zogenaamde Chappuis-band.



Figuur 5: Kenmerken van de typische stroom-spanning van een Langmuir-sonde, met de lineaire (links) en logaritmische (rechts) as voor de stroom (uit: Mero et al., Proceedings of the AIAA / USU Conference on Small Satellites, 2015).

### Ozonmetingen

De intensiteit van de zonnestraling wordt langs zijn reis door de atmosfeer afgezwakt door diffusie- en absorptieprocessen. Door de verzwakking bij verschillende golflengten te bestuderen, kan de concentratie van de atmosferische bestanddelen afgeleid worden. Figuur 4 toont een numerieke simulatie van de verzwakking van de zonnestraling op verschillende tangentiële hoogtes. De afname van het signaal rond 600 nm komt overeen met de absorptie van het licht door atmosferisch ozon: het betreft hier de zogenaamde Chappuis-absorptieband.

Om de hoeveelheid ozon ( $O_3$ ) te meten, zullen we de zonne-intensiteit meten op drie verschillende golflengten: één rond 600 nm, in het midden van de Chappuis-band, waar de absorptie door  $O_3$  maximaal is, en op twee andere golflengten aan elke kant van de Chappuis-band, waar de absorptie door  $O_3$  verwaarloosbaar is: de verhouding tussen deze golflengten levert de hoeveelheid  $O_3$  aanwezig langs het optische pad.

### SLP

Het tweede instrument op PICASSO is SLP, een Langmuir-sonde met 4 kanalen, die in situ metingen in de ionosfeer zal uitvoeren. Het meetprincipe van SLP is gebaseerd op de klassieke theorie van de Langmuir-sonde<sup>3</sup>. Door de elektrische potentiaal van de sondes ten opzichte van de plasmapotential te laten variëren, registreert het apparaat tijdens het meten van de stroom in elke sonde een stroom-spanningskarakteristiek waaruit de elektronendichtheid en -temperatuur, de ionendichtheid en de elektrische potentiaal van de satelliet kan worden afgeleid. De metingen worden in drie gebieden uitgevoerd: het ionenverzadigingsgebied en de gebieden van vertraging en van

verzadiging in elektronen. Typische stroom-spanningskarakteristieken van een dergelijke sonde zijn weergegeven in Figuur 5.

De ionendichtheid wordt berekend uit het ionenverzadigingsgebied, waar de potentiaal van de sondes voldoende negatief is om de elektronen af te weren en enkel nog positieve ionen aan te trekken. De elektronentemperatuur en de potentiaal van de satelliet worden afgeleid uit het elektronvertraginggebied, waar de potentiaal van de sondes dicht bij die van het plasma zit, zodat zowel de ionen en de elektronen worden aangetrokken. De elektronendichtheid ten slotte wordt afgeleid uit het elektronverzadigingsgebied, waar de potentiaal van de sondes voldoende positief is om de ionen af te weren en alleen de elektronen aan te trekken.

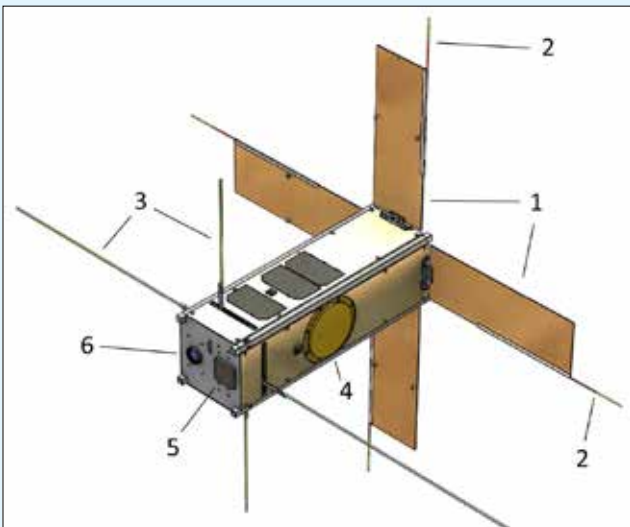
In nominale modus laat SLP de potentiaal van de sondes periodiek variëren van -5 V tot 13 V ten opzichte van de potentiaal van het plasma, om op die manier de elektronendichtheid en -temperatuur te meten, evenals de potentiaal van de satelliet en de ionendichtheid (indien deze groot genoeg is). In een andere modus meet het instrument enkel het elektronverzadigingsgebied, maar met een hogere snelheid (duizenden keren per seconde), waardoor de elektronendichtheid met een ruimtelijke resolutie van ongeveer een meter kan geschat worden.

De sondes zijn dunne cilindrische staafjes van titaan, aangebracht op de vier zonnepanelen. Naast het verschaffen van redundante metingen garandeert een dergelijke configuratie dat er zich op elk moment minstens één sonde buiten het kielzog van de satelliet bevindt.

### Bepaling en controle van de satelliet-attitude

De attitude van een satelliet is zijn oriëntatie in de ruimte rond zijn zwaartepunt. Een fundamentele voorwaarde voor de PICASSO-missie is dat het VISION-instrument naar de zon gericht blijft tijdens de duur van een occultatie. Dit vereist een richtnauwkeurigheid van VISION naar de zon van beter dan een graad. Om aan deze voorwaarde te voldoen, moet het systeem dat instaat voor de bepaling en controle van de attitude van de satelliet tegelijkertijd heel precies de richtpositie kennen, en in staat zijn om deze voldoende nauwkeurig te corrigeren. Het systeem omvat reactiewielen, een gevoelige zonnensensor, ruwe zonnensensoren, een star tracker, magnetometers, magneto-koppelingen, een GPS-ontvanger en een moederbord met twee processoren om deze verschillende subsystemen te beheren.

De reactiewielen worden gebruikt om de oriëntatie van het ruimtetuig te wijzigen. Ze zijn voorzien van een elektromotor en een snel draaiend vliegwiel (tot 7500 toeren per minuut). De elektromotor wordt gebruikt om op commando de snelheid van het vliegwiel te variëren. Wanneer deze verandert, roteert het ruimtetuig in de richting tegengesteld aan de draairichting (door behoud van impulsmoment). PICASSO bevat drie reactiewielen waarvan de assen loodrecht op elkaar staan, waardoor het ruimtetuig in om het even welke richting kan geheroriënteerd worden.



Figuur 6: Achteraanzicht van PICASSO: (1) de opengeklapte zonnepanelen van 20 bij 10 cm, met langs elk paneel de Langmuir-sondes (2) van het SLP-experiment; (3) de VHF/UHF-antennes en (4) de vlakke antenne van de S-bandzender die zich aan de kant van de satelliet bevindt die naar de aarde toe gericht is; (5) de GPS-ontvanger en (6) de star tracker.

De gevoelige zonnensensor wordt geplaatst op de kant van de satelliet die gericht is naar de zon, en wordt gebruikt als een primaire sensor op het deel van de baan dat door de zon belicht wordt, terwijl de *star tracker* gebruikt wordt om de oriëntatie van de satelliet te bepalen in het schaduwgedeelte. De magnetometers worden gebruikt om de grootte en de richting van het magnetisch veld rond de CubeSat te detecteren.

Magneto-koppelingen zijn elektromagnetische spoelen die in de zonnepanelen geïntegreerd werden. Ze produceren een magnetisch veld dat interageert met het magnetisch veld van de aarde, waardoor een mechanisch koppel ontstaat. Deze apparatuur wordt gebruikt om de residuele rotatie van het ruimtetuig te elimineren, om de satelliet ruwweg te richten en om de 'verzadiging' van de reactiewielen tegen te gaan (d.w.z. hun rotatiesnelheid verhogen of verlagen zonder daarom de oriëntatie van de satelliet te wijzigen).

### Commando en data management

Er zijn twee computers aan boord van PICASSO: de primaire boordcomputer, die de werking van het platform beheert, en de computer van de nuttige lading, die de wetenschappelijke instrumenten controleert en tevens de VISION-data analyseert om alleen het strikt nuttige deel ervan te weerhouden. Dit instrument levert meer dan 9 GB aan data op per occultatie; het integraal doorsturen van deze ruwe metingen naar de aarde is niet haalbaar, gezien de beperkingen van de beschikbare bandbreedte.

### Communicatie

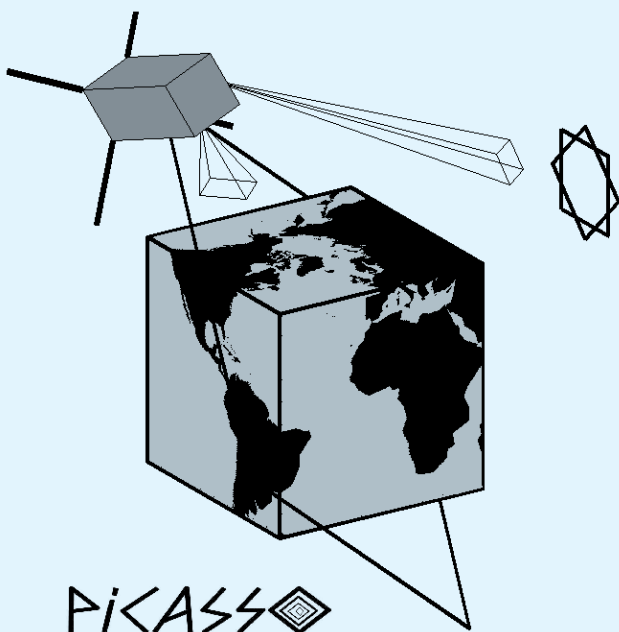
De satelliet communiceert met de grond via een VHF/UHF-zendontvanger voor de besturing van het platform. Zolang hij niet aan het verzenden is, zet dit systeem zich in een morse-stand, waarbij hij een identificatiecode stuurt, en beknopte gegevens voor de controle van de gezondheidstoestand van de satelliet. Een tweede zender, in S-band, wordt gebruikt voor de snelle datatransfer van de nuttige lading (Figuur 6). Het systeem kan minstens 50 MB per dag verzenden. Het ontvangststation is gelegen bij Clyde Space Ltd, Glasgow (Verenigd Koninkrijk).

### Conclusie

PICASSO is een ambitieus CubeSat-project: een wetenschappelijke missie bedoeld voor de studie van ozon in de stratosfeer, het profiel van de luchttemperatuur tot in de mesosfeer en de elektronendichtheid en -temperatuur in de ionosfeer.

Zijn beeldspectrometer, VISION, heeft aanzienlijke eisen m.b.t. het satellietontwerp omdat het heel precies naar de zon moet gericht zijn, zelfs wanneer het uit de aardschaduw tevoorschijn komt, om waarnemingen van de atmosfeer op verschillende hoogten te verrichten. Dit vereist dat het systeem waarmee de attitude bepaald en gecontroleerd wordt zeer efficiënt is, en in staat is om het ruimteschip op 3 assen te controleren, en tegelijkertijd een goede richtnauwkeurigheid te bereiken, zowel in omstandigheden van volle zonlicht als occultatie. De nuttige lading produceert ongeveer 50 MB aan gegevens per seconde, die aan boord moeten verwerkt worden alvorens naar de grond te worden verzonden. Bovendien moet deze kleine CubeSat op zijn baan een gemiddeld vermogen van meer dan 10 W produceren om de doelstellingen van de missie te vervullen.

Naast de belangrijkste wetenschappelijke doelen van de missie wil PICASSO ook laten zien dat dergelijke kleine satellieten wel degelijk in staat zijn om echte wetenschappelijke experimenten te realiseren. Demonstratie van de mogelijkheid om belangrijke wetenschappelijke doelstellingen te bereiken op een zeer lage-kost platform, kan de deur openen naar het gebruik van deze klasse van ruimtevaartuigen voor toekomstige missies en toepassingen.



## Dankwoord

Het PICASSO-platform werd gefinancierd dankzij een Lotto-subsidie. De nuttige lading en de integratie worden financieel ondersteund door ESA en BELSPO. De ontwikkeling van SLP wordt gesponsord door het STCE (Solar-Terrestrial Centre of Excellence).

## Noten

<sup>1</sup> CubeSat duidt op een gestandaardiseerd formaat voor nanosatellieten, bedoeld om de kosten van heel kleine satellieten te beperken om zo ook universiteiten de kans te geven hun eigen ruimtevaartuig te ontwikkelen en in een baan te brengen. De eenvoudigste satellieten die aan deze standaard voldoen, hebben de vorm van een kubus met zijden van 10 cm (volume van 1 liter). Ze mogen niet meer dan 1,33 kg wegen en gebruiken doordeweekse elektronische componenten. Satellieten kunnen samengesteld worden uit meerdere CubeSats: per conventie wordt de basis CubeSat aangeduid met de afkorting 1U (1 unit). Er bestaan ook 2U (twee 1U die aan elkaar vastgeschroefd werden), 3U (massa < 4 kg), 1,5 U en 6U. PICASSO is een 3U-CubeSat.

<sup>2</sup> Een Fabry-Perot interferometer is een optische interferometer samengesteld uit 2 vlakke en parallelle semi-reflecterende spiegels met een hoge reflectiecoëfficiënt. Het licht dat in de interferometer binnenvalt, wordt in deze optische caviteit meerdere malen heen en weer gereflecteerd. Bij elke reflectie verlaat een fractie van het licht de caviteit. De vertrekkende stralen interfereren met elkaar en slechts enkele golflengtes worden doorgestuurd.

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

## De auteurs

Didier Fussen, Emmanuel Dekemper, Philippe Demoulin, Didier Pieroux, Filip Vanhellemont, Sylvain Ranvier, Michel Ancaux, Sabrina Bonnewijn, Pepijn Cardoen, Emmanuel Gamby en Johan De Keyser zijn onderzoekers aan het Koninklijk Belgisch Instituut voor Ruimte-Aeronomie.