

# MISE EN ORBITE D'UN BOLOMÈTRE ÉLABORÉ À L'OBSERVATOIRE ROYAL DE BELGIQUE

## 3ÈME PARTIE : PREMIERS RÉSULTATS OBTENUS PAR LE BOS EMBARQUÉ SUR LE SATELLITE PICARD

Ping Zhu, Michel Van Ruymbeke et Jean-Philippe Noël  
Observatoire Royal de Belgique

### Résumé

Les enregistrements obtenus depuis le 28 juin 2010 par le capteur bolométrique BOS embarqué à bord du satellite PICARD ont pris fin en même temps que la mission du même nom le 4 mars 2014.

En complément aux deux premiers articles publiés dans *Ciel et Terre*, sont en cours de rédaction deux articles supplémentaires présentant les premiers résultats obtenus par le bolomètre : le premier concernant l'observation du rayonnement en provenance du Soleil, le second abordant l'observation des rayonnements d'origine terrestre.

### Rappels concernant les objectifs de la mission PICARD

La mission PICARD vise une meilleure compréhension de l'héliophysique, notamment par l'observation et l'étude des variations de l'irradiation solaire totale (TSI pour *Total Solar Irradiance*). Elle offre également une approche spécifique permettant la mesure du diamètre et de l'aplatissement solaire à haute résolution. Pour ce faire, plusieurs modules d'observation ont été embarqués à bord du satellite PICARD : le principal module nommé SODISM, réalisé sous la responsabilité du LATMOS (Guyancourt, France), principalement destiné à la mesure du diamètre solaire dans différentes bandes spectrales et le deuxième PREMOS, préparé par l'Observatoire de Physique

et Météorologie – WRC (Davos, Suisse).

La plate-forme SOVAP, qui représente la participation belge dans le projet PICARD, comprend le radiomètre DIARAD réalisé à l'Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM) et le capteur bolométrique BOS mis au point à l'Observatoire Royal de Belgique (ORB). Une analyse détaillée de la mission a été présentée par Thuillier et al., (2008).

### Rappel des principes du BOS (*Bolometric Oscillation Sensor*)

Les aspects techniques du senseur BOS ont été présentés dans deux numéros de *Ciel et Terre* [Vol.126 n°6 (2010) et Vol.127 n°1 (2011)].

On rappellera très brièvement que le BOS contient deux surfaces sensibles : l'une noire dont l'absorption serait d'environ 96% à la longueur d'onde correspondant à la température régnant à la surface du Soleil et l'émission de 85% à la température prévue du satellite (*Fig 1*), l'autre blanche caractérisée par un coefficient d'absorption d'une valeur comprise entre 13 et 16% pour une émission de 90%. Cette hétérogénéité des coefficients induit dans un shunt placé entre les deux surfaces un flux thermique qui, à l'équilibre, est proportionnel à la différence de température entre les surfaces et à sa conduc-

tibilité thermique.

Deux thermistances T1 et T2 sont placées aux extrémités du shunt. La première se situe contre la surface d'une masse  $m_1$  de 0,8 gramme dont le temps de réponse doit être du même ordre de grandeur que le rythme d'acquisition de dix secondes choisi pour l'enregistrement des températures. L'autre extrémité du shunt est vissée dans la masse  $m_2$  de cent soixante grammes qui constitue le corps principal du capteur. Cette masse  $m_2$  a un temps de réponse nettement plus long que la masse  $m_1$  beaucoup plus petite. La différence de température entre les deux masses  $m_1$  et  $m_2$  sera mesurée aux bornes du shunt. Les thermistances sont placées en série avec des résistances fixes limitant strictement les effets d'échauffement maximum induits par les courants qui les parcourent. Deux canaux d'acquisition enregistrent simultanément les variations thermiques. Le premier de faible sensibilité mesure en absolu la température T1 dans une large plage de travail s'étalant de 10° à 60° C. Le second reprend le même signal que T1 mais le compare à T2 en mode différentiel. Lorsque la température de  $m_2$  augmente lentement, T1 augmente d'une façon similaire et le gradient (T1-T2) ne change pas. Il ne dépend ainsi que du flux dans le shunt. Ceci permet d'appliquer un gain 3,6x plus important limitant la plage d'excursion de -5° à +9° C. La résolution sur la mesure du flux en fonction de

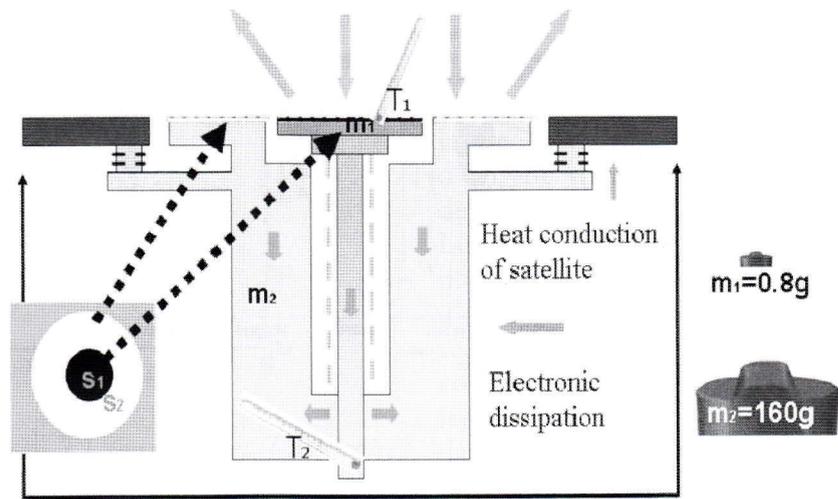
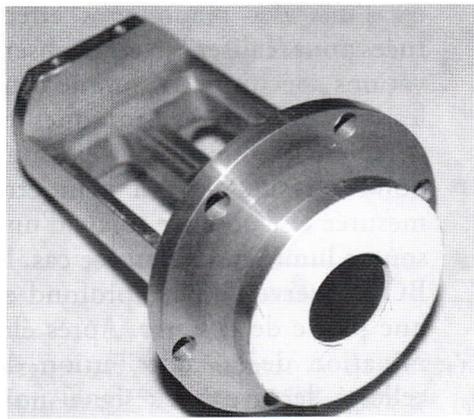


Fig 1: (Gauche) Photo du corps central du BOS présentant les deux surfaces de couleurs blanche et noire. (Droite) Géométrie du shunt équipé des deux thermistances T1 et T2. La fixation du capteur sur la face avant de PICARD comprend des rondelles isolantes de VESPEL qui limitent les flux entre le BOS et le satellite.

(T1-T2) s'en trouve améliorée. D'une manière plus générale, on rappellera que la très grande dynamique du BOS résulte de l'expertise acquise par l'Observatoire Royal de Belgique dans les mesures de variations thermiques à très haute résolution dans le domaine des observations géophysiques [Ciel et Terre, Vol.122 n°2 (2006)].

### Le flux thermique mesuré par le BOS

Le flux thermique (F) s'obtient à partir des températures enregistrées, de la conductivité thermique du shunt et des coefficients d'absorption et d'émission des surfaces S1 (noire) et S2 (blanche) dans les domaines du rayonnement visible et infrarouge. Chaque paramètre étant connu, on peut convertir les températures en flux thermique F ( $W/m^2$ ). Cela requiert que le shunt entre les deux thermistances soit complètement isolé de son environnement afin de ne prendre en considération que le flux thermique entre  $m_1$  et  $m_2$ .

Le flux thermique F dépend principalement :

- de l'énergie absorbée qui comprend l'énergie reçue du Soleil (TSI), de l'énergie du rayonnement solaire réfléchi par la Terre dans le visible (albédo) et de l'énergie de la radiation infrarouge réémise par la Terre ;
- de l'énergie émise par les surfaces S1 et S2 qui est fonction notamment des températures de ces surfaces, de la constante de Stefan-Boltzmann  $\beta$  et des coefficients d'émissivité de la peinture noire et de la peinture blanche.

On doit dès lors utiliser les spécificités des fluctuations des signaux dans diverses situations rencontrées afin de séparer les différentes sources contributives.

Parmi ces situations diverses, on citera entre autres :

- les éclipses du Soleil par la Lune (dans ce cas, la source solaire décroît en fonction de l'orbite de PICARD et de l'ombre lunaire) ;
- les éclipses du Soleil par la

Terre (dans ce cas, la seule source qui subsiste est la radiation infrarouge de la surface terrestre) ;

- les modulations de l'albédo terrestre en fonction de la position de PICARD sur son orbite par rapport à la Terre.

### Le traitement du signal utilisé pour le BOS

Lors de la réception des signaux et après avoir éliminé les quelques perturbations existantes, la première étape consiste à transformer les données brutes en données physiques. On applique des algorithmes mathématiques caractérisant les fonctions de transfert des deux voies d'enregistrement que comprend le BOS. On notera que l'algorithme de traitement des signaux en termes de TSI absolu requiert une comparaison entre les signaux du BOS et par exemple ceux de SOVAP. Les deux interfaces électroniques du BOS sont branchées aux ponts de thermistances qu'elles alimentent par des signaux alternatifs. Après l'étage préamplifi-

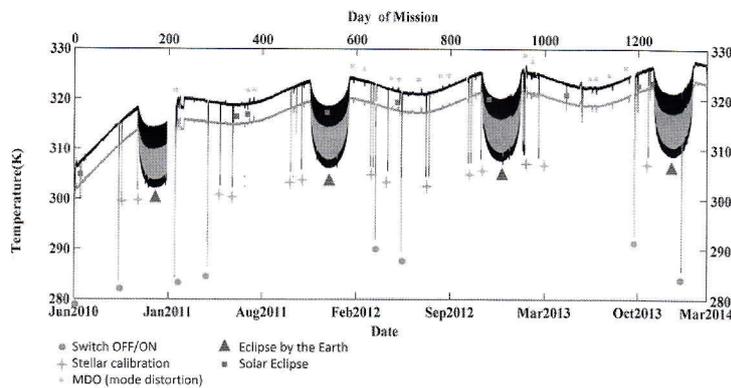


Fig 2 : Les observations effectuées par l'instrument BOS s'étendent du 28 juin 2010 au 4 mars 2014. La figure reprend les enregistrements des températures T1 et T2 par le BOS. Le canal supérieur T1 est plus chaud que le canal inférieur T2. Diverses situations sont reportées dans les commentaires.

cateur, on utilise une détection synchrone permettant de rejeter efficacement les effets du mode commun. Leurs deux signaux de sortie en Volt sont convertis en modulation de fréquence. Cela permet de disposer par comptage au rythme d'acquisition de 10 secondes, d'une dynamique supérieure à 100 dB, des signaux fonctions des températures sans nécessiter de filtrage analogique. Cette dynamique pour des périodicités de quelques minutes permet d'atteindre une résolution de l'ordre du million de points soit de quelques microdegrés.

### Le satellite et son orbite

Pour rappel, le satellite PICARD a été mis sur orbite le 15 juin 2010 par un lanceur russe. La stabilisation des températures du capteur n'a pris que quelques heures et les niveaux de bruits de fond étaient cohérents avec les prévisions. Le premier signal du BOS qui a pu être analysé le 28 juin correspondait aux attentes (Fig 2).

Afin de profiter d'une fenêtre d'observation maximale, le satellite se meut sur une orbite héliosynchrone dont l'excentricité est

de 0,001! Son altitude moyenne est de 710 km. Le plan de l'orbite est incliné de 98,21° sur l'équateur et reste invariable par rapport au Soleil. Ses nœuds ascendant et descendant exprimés en heure locale se situent respectivement vers 06:00 et 18:00. Cela signifie qu'il survole les différentes régions du globe approximativement à la même heure locale. Il ne vole jamais à une latitude au-delà de 82°, de sorte que l'on ne possède pas de données relatives aux régions polaires extrêmes.

On dérive la valeur du flux à partir des signaux T1 et T2 (Fig 3). L'absence de données en janvier 2011 correspond à une interruption opérationnelle du satellite.

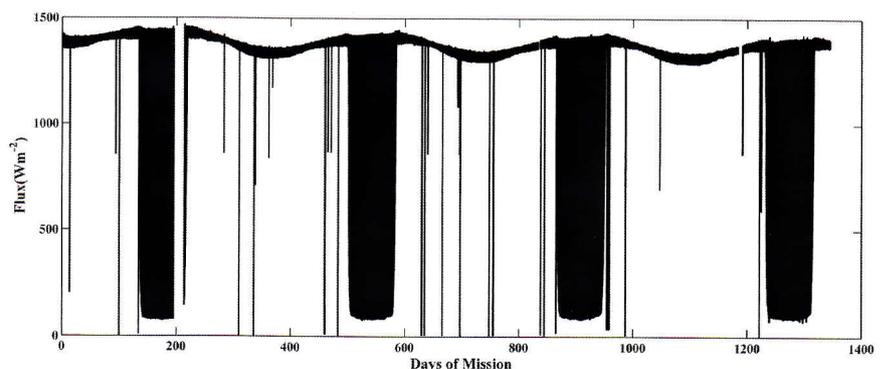


Fig 3 : Flux thermique absorbé par la surface blanche du BOS.

### Pointages stellaires

Le pointage stellaire du satellite est l'une des manœuvres effectuées pour réaliser certaines observations spécifiques. Comme tous les instruments électroniques et détecteurs, le signal contient une donnée résiduelle qui peut être mesurée en l'absence totale d'une source lumineuse. Dans ce cas, le BOS observe l'espace profond et une partie de la Terre. Après élimination de la contribution de celle-ci, le niveau du signal noir est mesuré avec précision. Le niveau de bruit des mesures du flux est établi de cette façon.

Lorsque le satellite était orienté vers un champ d'étoiles choisi, la température de la surface peinte en noir a diminué rapidement. La température T2 au fond du shunt suit presque la même tendance que T1. Lorsque le satellite est orienté vers l'étoile, (T1-T2) atteint son minimum et l'entrée d'énergie est au niveau le plus bas.

La valeur  $1/\beta$  de (T1-T2) est de 0,0083 K. Les incertitudes ( $1/\beta$ ) des mesures du flux thermique F s'étendent autour de 1,2 W/m². Ces deux valeurs se situent au même niveau que celles obtenues durant les mesures en laboratoire.

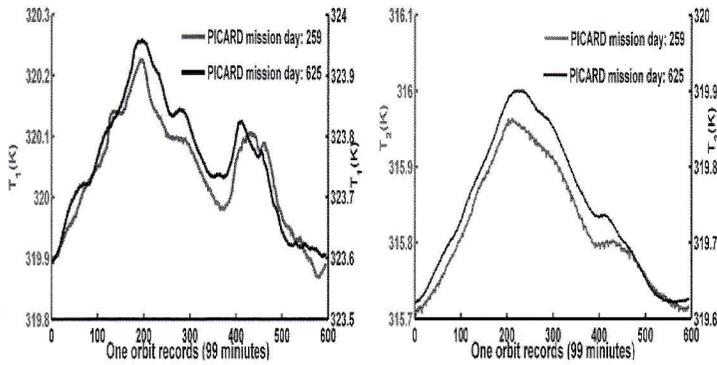


Fig 4 : Enregistrement de la température  $T_1$  (gauche) et  $T_2$  (droite) pour les 259<sup>ème</sup> et 625<sup>ème</sup> jours de mission. A une année d'intervalle, les variations sont semblables dans des conditions similaires. L'écart d'environ 4°C correspond à l'échauffement du satellite et est éliminé par la soustraction  $T_1 - T_2$  donnant le flux dans le shunt.

### Les performances du BOS dans l'espace

Afin de caractériser la stabilité du BOS, deux séquences de mesures à un an d'écart dans des conditions considérées comme similaires ont été sélectionnées (Fig 4). Les modulations observées de la température orbitale présentent une grande similitude. Cela signifie que les contributions de l'atmosphère inférieure de la Terre enregistrées par le BOS sont significatives.

D'autre part, les données permettent de déterminer la présence de quelques fréquences typiques, telles que le balayage diurne (à 0,0115 mHz), le balayage semi-diurne (à 0,023 mHz), et la fréquence orbitale à 0,18 mHz qui comporte certaines harmoniques.

Bien que l'instrument soit construit principalement pour l'observation des variations de l'irradiance, sa stabilité permettrait, après correction d'un terme de dérive ajusté sur les tendances à long terme, d'enregistrer des phénomènes ayant des périodicités plus longues. Comparons à titre d'exemple, l'évolution de la TSI obtenue par TIM, VIRGO/SOHO et le BOS (Fig 5).

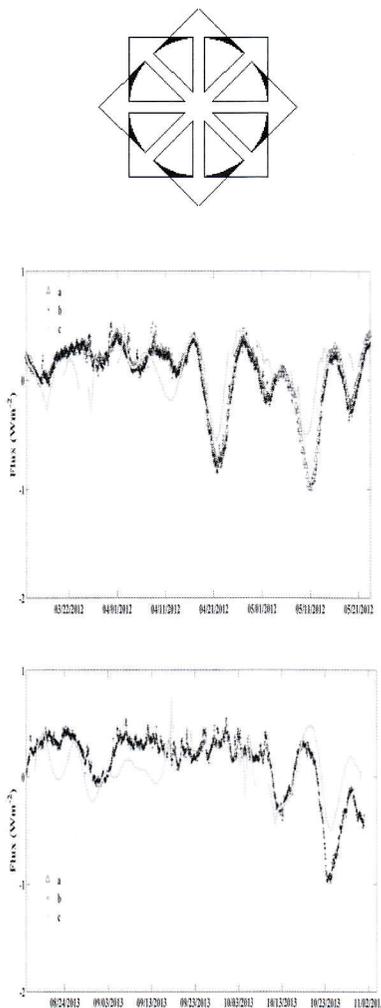


Fig 5 : Irradiance solaire totale (TSI) enregistrée à deux époques différentes par (a) TIM, (b) VIRGO/SOHO et (c) le BOS. Les écarts peuvent s'expliquer par des différences de modes d'observation.

### Le rayon du Soleil

En cas d'éclipses, le senseur BOS peut enregistrer la modulation de l'intensité lumineuse d'origine solaire lors du passage de PICARD dans l'ombre de la Lune. Le satellite traverse en moins de vingt minutes la zone d'ombre à une vitesse de 7,4 km/sec. Ce qui correspond à un parcours de neuf mille km. Par ailleurs, il peut passer plusieurs fois dans le cône d'ombre lors d'une même éclipse.

En première approche, un modèle simple a été développé en ayant adopté (Fig 6) une valeur de rayon lunaire  $AOM = 1737,15 \pm 0,14$  km connue avec précision grâce aux occultations d'étoiles par la Lune et à des mesures de distance fondées sur des méthodes utilisant des tirs laser sur des miroirs placés à la surface lunaire (Soma and Kato, 2002).

Le terme  $\beta$  est défini comme le rapport des rayons angulaires apparents du Soleil  $AO_s$  et de la Lune  $AOM$  à un instant donné, déterminés à partir des variations d'intensité  $B(t)$  enregistrées pendant ces éclipses.

Étant donné que les trois corps (Soleil, Lune et satellite) se déplacent dans le temps de façon connue, le rapport  $B(t)$  entre la zone visible et la surface du

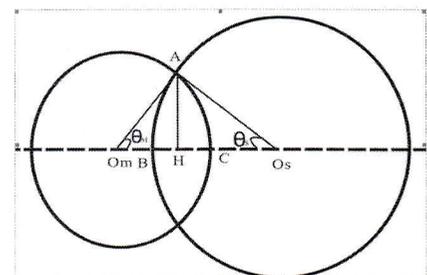


Fig 6 : Durant une éclipse de Soleil par la Lune, le satellite ne reçoit qu'une partie  $B(t)$  de l'irradiance totale.

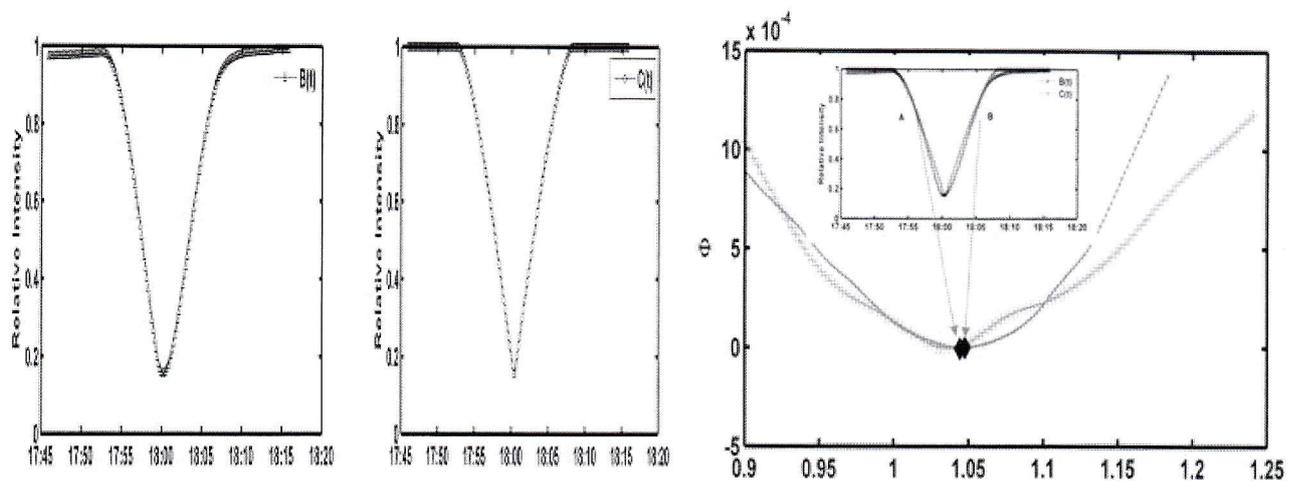


Fig7: (gauche): Signal observé par le BOS ; (centre): Modèle calculé de l'effet de l'éclipse ; (droite) : Pour différentes valeurs de  $\beta$ , évolution de l'écart-type pour les intervalles A et B.

disque complet peut être calculé à partir des éphémérides astronomiques, en fonction de la distance entre les centres de la Lune et du Soleil pour une série de valeurs du terme  $\beta$ .

Pour chaque valeur de  $\beta$ , on détermine pour des intervalles de temps A (diminution de l'intensité) et B (augmentation de l'intensité) un écart quadratique moyen entre l'ajustement par moindres carrés de l'enregistrement et le modèle théorique représentant les variations d'intensité  $B(t)$ . Les intervalles A et B ont été choisis

afin de couvrir uniquement les zones de forte variabilité de l'intensité.

La figure 7 (gauche) et (centre) présente le signal enregistré et un exemple de modèle théorique établi pour une valeur déterminée de  $\beta$ . Pour chacune des valeurs de  $\beta$  reprise en abscisse, on obtient pour les intervalles A et B, une valeur de l'écart-type (fig 7 droite). On assume que les valeurs les plus probables de  $\beta$  pourraient être celles qui minimisent les écarts. On notera que

les courbes d'écart pour A et B ne sont pas identiques mais que leurs minimums ont des valeurs de  $\beta$  très similaires.

La contribution de la Terre doit être soustraite. A cette fin, juste avant l'éclipse, en utilisant la TSI mesurée indépendamment par les radiomètres embarqués, on déduit les contributions de la Terre que sont l'albédo et le rayonnement infrarouge.

Finalement, en tenant compte des observations pendant dix

Table 1: Date de l'éclipse- B(t) correspond au % maximum d'occultation - durée de l'éclipse - Rapport  $\beta$  entre rayon lunaire et rayon solaire apparent -  $R_{\text{Soleil}}$  normalisé pour une distance égale à une unité astronomique (ua)

Dates	B(t) (%)	Durée (s)	$\beta=RL/RS$ ( $^{\circ}$ )/( $^{\circ}$ )	RS ( $^{\circ}$ )
07/11/2010	15,57	460	0,9717	959,3460
	85,53	330	0,9716	959,4626
	25,62	500	0,9718	959,2974
01/04/2011	95,46	250	0,9718	959,3168
06/01/2011	59,64	450	0,9716	959,4821
	53,24	480	0,9717	959,3363
07/01/2011	86,75	290	0,9717	959,3946
11/25/2011	82,99	320	0,9716	959,4334
	24,61	440	0,9715	959,5696
	65,90	410	0,9715	959,5404

éclipses partielles (Table 1), et en calculant des moyennes, les mesures du BOS ont permis de trouver une valeur de  $959,406 \pm 0,107''$  (arcseconds) pour le demi-diamètre du Soleil.

Connaissant le demi-diamètre apparent du Soleil et sa distance moyenne, on peut finalement déterminer son diamètre.

### Les facteurs d'incertitude dans la détermination du diamètre solaire

On se contentera ici d'estimer les incertitudes affectant la détermination du diamètre solaire exprimée en mas (c-à-d. millisecondes de degré). Le bruit affectant les mesures du BOS induit une incertitude de l'ordre de 28 mas en utilisant la méthode des moindres carrés.

Les incertitudes relatives à la position du satellite et à l'orientation seraient de 10 mas correspondant à une précision du pointage de Picard de  $\pm 0,01''$  avec une position connue à  $\pm 7$  km.

L'écart entre un modèle de Lune parfaitement circulaire et la forme réelle de la Lune génère une incertitude de 70 mas induite par les erreurs d'orbite et d'altitude.

L'intensité solaire peut ne pas

$960''.12 \pm 0''.09$ ,  
M. Emilio, et al, 2012

$959''.406 \pm 0''.107$  Value derived with 10  
transits of solar eclipse recorded by the BOS.

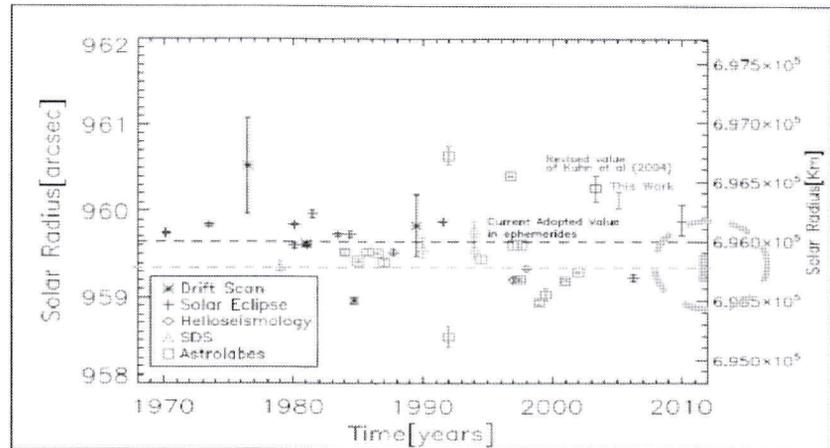


Fig 8 : Les différentes valeurs du rayon apparent du Soleil. normalisé à une unité astronomique (Emilio M. et al.[2012])

être homogène. Les images enregistrées par SODISM ont été examinées afin de vérifier qu'il n'y avait pas de région active, ce qui aurait pu affecter les résultats. A noter que la plupart des mesures ont été effectuées pendant la période calme de l'activité solaire. Le modèle prend en compte une incertitude d'environ 28 mas résultant de facteurs tels que l'irradiance du Soleil et de la Terre, la position du satellite par rapport au Soleil et à la Lune, la présence de régions solaires actives, la pénombre, la variation centre-bord (CLV) et le profil lunaire. Les émissions chromosphériques pourraient contribuer aux signaux enregistrés par le BOS et augmenter le rayon solaire. Leur contribution est toutefois négligeable en terme d'énergie.

En conclusion, le traitement des éclipses a abouti à dix déterminations du rayon solaire avec une erreur quadratique moyenne (RMS) de 107 mas. Chaque détermination recèle une contribution d'incertitude systématique et aléatoire. En raison de leur nature, les incertitudes aléatoires sont combinées géométriquement et fournissent un total de 76 mas, consistant avec la RMS des diverses déterminations du rayon solaire indiquées dans la Table 1.

On rappellera que nos résultats ont été obtenus en utilisant le rayon moyen de la Lune estimé à 1.737,15 km par Araki et al. (2009).

Finalement, les mesures du BOS ont permis de trouver une valeur de  $959,406 \pm 0,107''$  pour le demi-diamètre du Soleil. Ce résultat est cohérent avec les valeurs du diamètre du Soleil données par différents auteurs utilisant diverses approches instrumentales soit à partir de la Terre soit depuis l'espace. Les différences, au-delà des incertitudes estimées affectant les valeurs du rayon, peuvent être expliquées par les différences de longueur d'onde des rayonnements, la définition

Table 2 : Estimation des sources d'indétermination

Origine	Incertitude (mas)	Nature
CLV	26	Systématique
Rayon lunaire	50	Systématique
Forme de la Lune	2	Systématique
Pointage et position du satellite	10	Aléatoire
Bruits présents sur les signaux	28	Aléatoire

des seuils d'algorithmes, la date des mesures et d'autres différences instrumentales systématiques.

## Conclusions

En conclusion, l'analyse des signaux fournis par le BOS est conforme aux attentes de ses concepteurs. L'environnement spatial n'a pas altéré de façon dommageable l'instrument. La modélisation théorique n'a pas requis de corrections imprévues. Lors de situations exceptionnelles, les modulations de signaux correspondent de façon satisfaisante aux prévisions. Ces premiers résultats confirment que le BOS, par ses spécificités, est un capteur miniaturisé particulièrement bien adapté à l'utilisation dans des satellites de type CubeSat.

Le prochain article présentera certaines observations des rayonnements d'origine terrestre obtenues avec cet instrument.

## Remerciements

PICARD est une mission organisée, guidée et soutenue par le Centre national d'Études spa-

tiales français (CNES). Cette mission est le fruit d'une forte coopération entre la France, la Belgique et la Suisse.

Les instruments qui l'équipent ont été conçus et réalisés sous la responsabilité de différentes institutions. Le SODISM a été préparé par le Laboratoire LATMOS (Guyancourt, France), le PREMOS par PMOD-WRC (Suisse), le SOVAP par l'Institut Royal Météorologique de Belgique (IRMB) et le BOS par l'Observatoire Royal de Belgique (ORB).

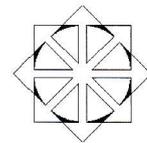
Les auteurs remercient particulièrement les différentes personnes qui ont contribué à la réussite du projet BOS, notamment Gérard Thuillier dont les contributions ont été essentielles dans la question de la mesure du diamètre solaire.

L'Observatoire Royal de Belgique a mis à la disposition des auteurs les moyens nécessaires au projet. Le système d'acquisition du BOS a été réalisé par A. Chevalier and C. Conscience (IRMB). Les opérations de contrôle et de gestion des enregistrements ont été assumées par le Centre de Mission Scientifique PICARD (CMSP)

localisé au Pôle Espace à Uccle avec le support de BELSPO.

Le contrat PRODEX n°4000103202 a permis de disposer à l'ORB des ressources humaines nécessaires au traitement des signaux du BOS.

Fr.-X. Kremer a contribué à la rédaction du texte à partir des documents préparés en anglais.



## Bibliographie

Emilio M., Kuhn J.R., Bush R.I, and Scholl I.F. : *Measuring the solar radius from space during the 2003 and 2006 Mercury transits*. *Astrophys.J.*, v.750, 135, 2012

Thuillier G., Dewitte S., Schmutz W., and the PICARD team : *Simultaneous measurement of the total solar irradiance and solar diameter by the PICARD mission*. *Adv. Sp. Res.* **38**, 8, 1792-1806, 2008

Van Ruymbeke M., Rasson J. et Tuts G. : *La Thermométrie Géophysique à l'ORB de 1970 à nos jours*, *Ciel et Terre* Vol.122 n°2, 47-55, 2006

Van Ruymbeke M., Renders Fr., Noël J.Ph., Van Ruymbeke Fr., Lopez-Martinez D. et Zhu Ping : *Mise en orbite d'un Bolomètre élaboré à l'Observatoire Royal de Belgique 1<sup>re</sup> partie : Description du dispositif*, *Ciel et Terre* Vol.126 n°6, 173-179, 2010

Van Ruymbeke M., Zhu Ping, Renders Fr. et Noël J.Ph. : *Mise en orbite d'un Bolomètre élaboré à l'Observatoire Royal de Belgique 2e partie : Présentation d'observations de divers phénomènes enregistrés en orbite par le BOS*, *Ciel et Terre* Vol.127 n°1, 14-20, 2011