

Mise en orbite d'un bolomètre élaboré à l'Observatoire Royal de Belgique (ORB)

1^{ère} partie : Description du dispositif

Michel van Ruymbeke, Francis Renders, Jean-Philippe Noël, Frédéric van Ruymbeke, David Lopez Martinez et Zhu Ping

<u>Résumé:</u> L'instrument bolométrique BOS fait partie du module SOVAP embarqué à bord du satellite PICARD. Le principe de l'utilisation d'un senseur de flux rayonnant basé sur l'enregistrement de microvariations de température aux bornes d'un shunt thermique constitue une alternative originale. L'utilisation du comptage de signaux à fréquence modulée permet une dynamique de 120dB au rythme d'acquisition de 10 secondes. Une seconde partie dans le prochain Ciel&Terre traitera de premiers exemples d'observations réalisées avec le BOS.

<u>Abstract:</u> The bolometric part of the SOVAP instrument (SOVAP-BOS) embarked on the PICARD satellite will be a space premiere. Its sensing element is based on the monitoring with micro-temperature differential thermometers placed on a thermic shunt. A 120dB dynamical range could be achieved with a ten seconds sampling rate integrator based on the counting of frequency modulated output. A second paper published in the next "Ciel & Terre" will overview some preliminary examples of observation achieved with the BOS.

HISTORIQUE du projet BOS

Le concept EDAS mis en place à l'ORB pour la surveillance géophysique environnementale constitue l'ancrage des travaux de mise au point de nos prototypes.[van Ruymbeke & al., 2001]. A partir de ce concept, l'Observatoire Royal de Belgique a acquis une expertise dans les mesures de variations thermiques à très haute résolution mises en place dans des sites souterrains. Un article [van Ruymbeke, al., 2006] décrit divers aspects de nos recherches entreprises dès 1970. Le choix des composants et des activateurs électroniques fut grandement facilité grâce au fait de disposer de conditions exceptionnelles de stabilité dans le Laboratoire souterrain de Géodynamique de Walferdange (G-D.de Luxembourg) (Fig 1).

Ces travaux confirment la qualité des thermistances [van Ruymbeke, al., 1999] réalisées avec des matériaux semi-conducteurs. Les méthodes développées pour l'interfaçage des gravimètres d'observation des marées terrestres nous ont permis de maîtriser la problématique des interfaces électroniques transformant la valeur des résistances en signaux enregistrables. En effet une thermistance ne présente qu'une variation d'environ 5% de sa valeur pour une excursion de un degré. Le microdegré correspond ainsi à une dynamique de 20.000.000 de points de résolution.



Fig 1: Enregistrement à Walferdange, par un thermomètre équipé d'un pont de thermistances. Le site d'installation est le fond d'un forage d'un mètre de profondeur dans le gypse de la mine en bout de galerie. Après une période de stabilisation de plus d'une année, le niveau du bruit de fond du signal thermométrique a atteint le microdegré. Un bref échauffement par un courant dans une résistance a induit une variation de treize microKelvin.

Ces acquis technologiques ouvrirent la voie à une collaboration avec le laboratoire de l'Institut Royal Météorologique de Belgique (IRMB) en charge de la mise au point de l'instrument SOVAP destiné au satellite PICARD qui fait partie de la filière des microsatellites MYRIADE (Fig 2) préparés par le CNES et qui gravite sur une orbite (Fig 3) adaptée à l'observation solaire. Son altitude moyenne de 710 Km et une inclinaison sur le plan équatorial de 98,21° lui permet de rester constamment centré sur le Soleil en gardant pour son nœud ascendant une valeur de 18h \pm 30m exprimée en heure locale,.



Fig 2 : Photo du satellite PICARD. Les trois modules d'observation se situent sur la partie supérieure.

Les objectifs principaux de PICARD visent à la fois une meilleure compréhension de l'héliophysique tout autant que de ses implications sur la climatologie terrestre. Notre contribution consiste à compléter l'observation toutes les dix secondes à très haute résolution des variations de l'irradiation solaire totale (TSI pour Total Solar Irradiance) (Fig 4). Le capteur BOS (Bolometric Oscillation Sensor) se réfère au principe de mesure fondé sur le concept du bolomètre qui consiste à mettre en œuvre des mesures thermométriques modulées par le rayonnement reçu.



Figure 3: Caractéristiques orbitales du satellite PICARD. La face avant du satellite reste en permanence perpendiculaire aux rayonnements solaires.



Figure 4: Le coefficient qui caractérise le rayonnement solaire est l'Irradiation solaire totale (TSI), le terme «total » correspondant à la couverture complète du spectre électromagnétique de celui-ci.

L'actuel cycle solaire d'environ 11 années vient de dépasser le point de son minimum d'activité. La TSI devrait croître durant le temps de vie de PICARD qui est de trois à quatre années. Un des équipements embarqués nommé SODISM (pour Solar Diameter Meter) devrait permettre de mesurer avec une précision inégalée le diamètre du disque solaire et ses infimes variations. Cela permettrait d'établir une relation éventuelle entre activité et diamètre moyen. La clé métrologique à maîtriser pour atteindre cet objectif ambitieux tient entre autres choses à la parfaite connaissance de l'état thermique de SODISM. Le module SOVAP fait partie des différents capteurs complétant cet équipement sophistiqué afin d'atteindre la précision souhaitable.

Approche théorique de la conception du bolomètre BOS

Sur la figure 5 qui présente le module SOVAP, on distingue en noir et blanc les deux surfaces concentriques du BOS. Leurs caractéristiques d'absorption et d'émission n'étant pas semblables, un gradient thermique s'établit en fonction des rayonnements reçus et de la réémission vers l'espace.



Fig 5 :Le module SOVAP. Sur sa face avant qui reçoit le rayonnement solaire, on aperçoit le BOS placé audessus du capteur de l'IRMB. Cette surface est pointée en permanence vers le Soleil.

L'absorptivité d'un corps ne dépend pas de sa température alors que l'émissivité, suivant la loi de Stephan-Boltzmann, est une fonction de la quatrième puissance de celle-ci.



Fig 6 : L'équilibre thermique du BOS est atteint lorsque les diverses températures du capteur correspondent à l'identité entre les rayonnements absorbés et réémis.

Fondamentalement, le BOS (Fig 6) consiste en une première surface recouverte de peinture noire dont l'absorption serait de 98% 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. La seconde surface aurait comme coefficient d'absorption une valeur comprise entre 13 et 16% pour une émission de 90%. Si nous plaçons un shunt entre les deux surfaces, cette hétérogénéité des coefficients induit dans le shunt un flux thermique qui, à l'équilibre, est

proportionnel à sa conductibilité thermique et à la différence de température entre les surfaces. Remarquons que le gradient thermique ainsi généré n'est pas fonction de la température des surfaces. Comme pour la loi d'Ohm en électricité, le courant passant dans une résistance ne dépend que de la différence de potentiel à ses bornes et de sa conductibilité électrique. Les deux thermistances T1 et T2 sont placées aux extrémités du shunt. La première se situe contre la surface dans une masse m1 de un gramme (Fig 7) 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 m2 de deux cents grammes qui constitue le corps principal du capteur. Cette masse m2 a un temps de réponse nettement plus long que la masse m1 beaucoup plus petite.



Fig7 : Photo du corps principal m2 et du shunt recouvert de jupes thermiques dont l'extrémité supporte m1.

La thermistance T2 qui dépend de la température de m2 ne réagit ainsi qu'aux variations lentes du flux dans le 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 m2 augmente lentement, T1 augmente de 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 3,6 fois plus important limitant la plage d'excursion de -5° à $+9^{\circ}$ C. La résolution sur la mesure du flux en fonction de T1-T2 s'en trouve améliorée.

Validation en laboratoire du BOS

Le capteur et son double de réserve ont été réalisés dans les ateliers de l'ORB et de l'IRMB. Avant la confirmation des choix technologiques rencontrant le cahier de charge spécifique au projet PICARD, la simulation en conditions réalistes a permis de maîtriser les divers problèmes concevables. L'adaptation de nos méthodes d'interfaçage des ponts de thermistances a requis de motoriser un potentiomètre résistif dont l'excursion totale ne correspond qu'à un millième de degré (Fig 8). L'utilisation de signaux périodiques ayant une parfaite stabilité en phase et en amplitude, donne la possibilité d'extraire ces signaux de longues séries d'événements en utilisant une méthode de « stacking » [van Ruymbeke, al., 2007]



Fig 8: (Gauche) Mesures thermiques par changement de résistance électrique. (Droite) Les interfaces électroniques à placer dans le couvercle du BOS ont nécessité beaucoup de précautions afin de remplir les critères de spatialisation.

Les circuits ainsi validés en terme de linéarité et de rapport signal/bruit ont été ensuite branchés sur un prototype du BOS placé sous vide dans une cuve étanche (Fig 9).

Cela s'impose pour éliminer les effets convectifs. Une source de rayonnement contrôlée par un microprocesseur délivre des signaux très peu bruités. Son asservissement à la fois en courant et en voltage garantit un contrôle très précis de l'énergie rayonnée.



Fig9 : (Gauche) Prototype du BOS et de son électronique de contrôle prête à être placé sous vide pour les tests de validation.(Droite haut) Microprocesseur de commande de la source de rayonnement et d'enregistrement des signaux T1 et T1-T2. (Droite bas) Exemple de source basée sur une lampe à haute température ayant un spectre proche du rayonnement solaire.

Les aspects métrologiques du BOS sont ainsi réellement évalués en conditions similaires à celles qui seront rencontrées en orbite. Notons que le dispositif est conçu pour l'étude des variations de TSI augmentées d'effets entre autres liés à la présence de la Terre (albédo et infrarouge). La détermination absolue de la TSI nécessiterait de connaître parfaitement les

coefficients d'absorption et d'émission des peintures des surfaces S1 et S2. L'évolution, sous l'effet des rayons UV importants dans l'espace, est une des causes des indéterminations.

Par contre, la très grande dynamique du BOS ouvre la voie à l'étude de modes vibratoires divers qui sont à la limite de la détectabilité. Un facteur d'échelle moins précis suffit dans ce type d'enregistrement. Inversement, l'algorithme de traitement des signaux bruts en terme de TSI absolu requiert une comparaison entre les signaux du BOS par exemple et ceux de SOVAP.

Les simulations réalisées en laboratoire (Fig 10) confirment les hypothèses qui ont prévalu à la mise au point du bolomètre. La dynamique pour des périodicités de quelques minutes est de l'ordre du million de points de résolution. La linéarité sur les mesures de flux dans le shunt suffit pour les études de microvariations (Fig 11).

En principe si les stabilités des peintures et des thermistances sont acquises, des mesures en absolu de rayonnements seraient envisageables par notre approche.



Fig10: (Gauche) Simulation du passage de 0% à 100% de la TSI. Des modulations surimposées correspondent à des excursions de 5% et 1% de l'irradiation totale. (Droite) Différentielle seconde avec un filtre glissant sur cinq données successives appliqué à un extrait de signal correspondant à 1% de variation. Le bruit de fond de 0,1Hz donne par rapport aux 500Hz d'amplitude un rapport Signal/Bruit de 5.000 pour 1%. La TSI serait ainsi enregistrée avec 2 ppm (part par million). Une analyse spectrale présenterait une dynamique largement supérieure.



Fig11: Simulation du passage par escaliers de 0% à 100% de la TSI. Des modulations surimposées correspondent à des excursions de 1% de l'irradiance. Le premier canal présente la modulation de l'irradiation synthétisée par le microprocesseur. Le second correspond au changement de température T1. Le troisième canal reprend l'enregistrement du gradient T1-T2 fonction du flux dans le shunt. Le quatrième canal présente à la fois T1 et T2.

Le Module de Vol SovaP a subi les essais de qualification suivants:

Mesures physiques Vibration 1 (Mecano ID): du 26 au 29 mai 2008 /05 EMC (Intespace): du 11 au 13 juin 2008 Vide thermique 2 : du 23 juin au 2 juillet 2008 EMC couplage SovaP_MV/PF : le 05 septembre 2008 Recettes complémentaires post rétrofit (octobre 2008) Vibration 2 (Mecano ID) : 28 octobre 2008 Balance thermique : avril 2009

La figure 12 qui termine ce texte illustre la complexité des travaux préparatifs d'une expérience à embarquer à bord d'un microsatellite.



Fig12 : Trois aspects de la mise en place du BOS dans le module SOVAP à placer sur le satellite PICARD.

Remerciements

Les auteurs remercient le Dr Ronald Van der Linden, Directeur de l'Observatoire Royal de Belgique pour la mise à disposition des moyens nécessaires à la réalisation du BOS. Le partenariat avec l'IRMB pour la spatialisation de notre prototype s'est avéré nécessaire pour atteindre dans les temps impartis les exigences définies par les maîtres d'œuvre de PICARD. Les auteurs remercient ici tout particulièrement le Dr Steven Dewitte, ses collaborateurs les Ing. A.Chevalier et Ch. Conscience ainsi que le Dr D.Crommelink qui sans compter leurs peines et avec un maximum d'efficacité, ont accepté de nous aider dans la totalité de nos démarches.

Les auteurs tiennent également à remercier en particulier André Somerhausen, François Beauducel, Eric de Kerchove et Geneviève Tuts pour leur respectives contributions à la mise en place du concept EDAS [van Ruymbeke, M., al.,2001].

Bibliographie

van Ruymbeke M., Beauducel M., Somerhausen A., 2001 The Environmental Data Acquisition System (EDAS) developed at the ROB Journal of the Geodetic Society of Japan, Vol 47 n°1, pp 40-46

van Ruymbeke, M., al.

La thermométrie géophysique à l'ORB de 1970 à nos jours, Ciel & Terre Volume 122 N°2 mars- avril 2006.

van Ruymbeke, M.. & Somerhausen, A., 1999

Experiments in Laboratory and field with Precise Thermometry, presented during the Seminar 192 der (WE-Heraeus-Stiftung) « Microtemperature Signals of the Earth's Crust », Bad Honnef,Germany, 25-27 March, 1998, pp 23-35, ISBN 3-89720-287-5, 1999

van Ruymbeke, M., Zhu, P., Cadicheanu, N., and Naslin, S. Very Weak Signals (VWS) detected by stacking method according to different astronomical periodicities (HiCum), Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 7, 651-656, 2007.



Mise en orbite d'un bolomètre élaboré à l'Observatoire Royal de Belgique (ORB)

2ème partie : Présentation d'observations de divers phénomènes enregistrés en orbite par le BOS Michel van Ruymbeke, Zhu Ping, Francis Renders & Jean-Philippe Noël.

<u>Résumé:</u> L'instrument bolométrique BOS fait partie du module SOVAP embarqué à bord du satellite PICARD. Ce deuxième article illustre ses caractéristiques métrologiques par les enregistrements de divers phénomènes tels que des pointés stellaires, une éclipse de Soleil, des occultations par la Terre, etc. Le lecteur peut ainsi appréhender la spécificité de notre approche instrumentale. Dés que l'état d'avancement des travaux d'analyse le permettront un troisième article sera publié

<u>Abstract:</u> The bolometric part of the SOVAP instrument (SOVAP-BOS) is embarked on the PICARD satellite. This second paper introduces metrological patterns of the BOS with signals obtained for different events like star pointing, solar eclipse, and occultation by Earth, etc. When results of data analysis will justify it, a third paper will be published.

Objectifs de cet article

Cet article aborde l'illustration des aspects métrologiques du BOS en orbite. Rappelons que le dispositif est conçu pour l'observation des variations des rayonnements absorbés par sa face avant (*Fig. 1*). Ceux-ci comportent principalement l'irradiance solaire combinée aux effets entre autres liés à la présence de la Terre (\pm 5% pour l'albédo et le rayonnement infrarouge).



Fig. 1 : Face avant du module SOVAP lors de sa préparation avant le transfert vers Grosny (Russie) pour son installation sur le lanceur prévu pour la satellisation. On notera pour le BOS, la surface absorbante en noir et la surface émissive blanche.

La mise en orbite de PICARD le 15 juin 2010 a été assumée par une équipe russe opérant sur la base de Grosny au nord de la frontière du Turkménistan. Après son installation et celle du satellite suédois PRISMA sur un lanceur DNEPR, le lancement eut lieu suivant la procédure prévue. L'émotion lors de ce baptême de l'espace pour un dispositif original élaboré dans notre laboratoire à l'Observatoire Royal a comblé les auteurs d'une joie mêlée d'une certaine appréhension en face des nouvelles tâches qui devraient ensuite leur incomber. Le suspense durera cependant le temps nécessaire aux diverses manœuvres requises avant l'activation de l'alimentation de chaque instrument. Le premier signal qui a pu être analysé le 28 juin, correspond bien aux attentes (*Fig. 2*). La stabilisation des températures du capteur n'a pris que quelques heures et les niveaux de bruits de fond sont cohérents avec les prévisions.



Fig. 2: Premiers signaux bruts obtenus après la mise en route de l'alimentation de SOVAP.

Cette première impression se confirme et les différents événements qui influenceront notre capteur s'avèrent importants à la fois pour la validation des méthodes métrologiques choisies et pour l'intérêt scientifique du projet.

Aspect général des enregistrements

Lors de la réception des signaux et après avoir éliminé les rares 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. Disposant de la température T1 de la face noire de la masse m1 et de la différence de température T12 aux bornes du shunt, on peut établir la valeur de la température T2 du corps principal de masse m2. Lors de la préparation de cet article, les auteurs disposaient d'un enregistrement sur un intervalle de temps de 195 jours dont 96% étaient utilisables (*Fig. 3*).

On peut reconstituer la valeur de l'irradiance captée par le BOS si on détermine le flux circulant dans le shunt ainsi que les flux radiatifs réémis vers l'espace par m1 et m2 à partir de leurs températures T1 et T2. Le modèle théorique utilisé doit tenir compte des coefficients des peintures.



Fig. 3: Transformation des signaux du BOS en variables physiques exprimées en °C. La courbe supérieure correspond à la face absorbante m1 tandis que la courbe du milieu correspond au corps massif m2 dans lequel l'extrémité du shunt diffuse le flux de chaleur qui le parcourt. Sur la courbe du bas, on peut observer l'écart de températures aux extrémités du shunt. On remarque la réjection du mode commun et la seule prise en compte du flux thermique dans le shunt.

On observe sur le graphique de la figure 3 les différents événements qui vont être traités. Cela permettra de découvrir les spécificités du capteur lorsqu'il opère en orbite.

Enregistrement d'une éclipse solaire

Le premier phénomène particulier sur l'enregistrement du BOS correspond à la traversée à trois reprises de la zone d'ombre de l'éclipse totale de Soleil du 11 juillet 2010 (*Fig. 4*). L'orbite de PICARD est judicieusement optimale au vu des caractéristiques de cette éclipse (*Fig. 5*). Le premier contact intervient vers 17h50 lorsque PICARD quitte l'Antarctique. Il va traverser la zone de pénombre sans croiser le cercle de totalité. La chute de température aux bornes du shunt correspondant au premier pic est de l'ordre de cinq degrés. Pour la deuxième orbite, on se trouve à 18h41 au nord de l'Europe. Après avoir longé l'Afrique, on survole à nouveau l'Antarctique entre 19h16 et 19h31 tandis que l'ombre de l'éclipse se trouve à une distance maximale. La chute de température est inférieure à un degré! Le troisième passage dans l'ombre s'opère après 20h40 lorsque l'orbite passe à proximité de la fin de la zone de totalité située à l'extrémité de l'Amérique du Sud. Bien qu'inférieur au premier passage, la température diminue cependant de plus de quatre degrés (*Fig. 6*).



Fig. 4: Projection orthographique des caractéristiques des zones de pénombre et de totalité de l'éclipse totale de Soleil du 11 juillet. [Espenak & Anderson,2010].



Fig. 5: Projection des trois orbites de PICARD et de la ligne de centralité de l'éclipse totale de Soleil. On observe le déplacement induit par la rotation de la Terre des orbites vers l'ouest.



Fig. 6: Enregistrement des signaux du BOS lors du passage dans l'ombre lunaire lors de l'éclipse totale de Soleil du 11 juin 2010. Les courbes du haut montrent les variations des températures T1 et T2 aux bornes du shunt thermique. La courbe du bas présente l'évolution de la différence de température T12 exprimée en degré centigrade.

Notons que le signal enregistré peut être analysé en relation étroite avec les orbites de PICARD par rapport aux positions respectives du Soleil et de la Lune.

Enregistrements de pointés stellaires

Les opérations de recette en vol comportent diverses manipulations spécifiques aux contrôles et évaluations d'usage. Les pointages stellaires en font partie. Au cours de ce type d'action, le satellite ne vise plus le Soleil, mais une direction opposée. On dispose ainsi pour le BOS d'une modulation des signaux dont l'amplitude peut être comparée à la valeur en absolu fournie par d'autres instruments. Ceci permet par comparaison de valider les fonctions de transfert caractéristiques du système.



Fig. 7: Enregistrement des signaux du BOS lors de pointages stellaires les 6 octobre et 9 novembre 2010.

Deux pointages stellaires apparaissent sur les enregistrements respectivement le 6 octobre et le 9 novembre (*Fig.* 7). Le gradient thermique aux bornes du shunt s'inverse lors de la visée opposée car l'énergie thermique de la masse m2 va se dissiper vers l'espace au travers de m1 (*Fig.* 8).



Fig 8: Enregistrement des pointages stellaires par le BOS. Sur les courbes supérieures, le tracé en gras correspond à la température T1 et le tracé fin à la température T2 exprimées en Kelvin. Les graphiques du bas représentent l'évolution du gradient T12 aux bornes du shunt. Les petites variations visibles sur la partie supérieure sont induites par le rayonnement infrarouge et l'albédo terrestre (\pm 5%).

Enregistrement des occultations

Le satellite PICARD occupe une orbite inclinée d'environ 8° par rapport à l'axe de rotation de la Terre, avec le passage dans le plan équatorial vers le Nord à environ six heures du matin. De ce fait, son altitude étant de l'ordre de 750 Km, des occultations par la Terre apparaissent durant l'hiver lorsque la position du Soleil se trouve sous l'horizon vu depuis le satellite (*Fig. 9, droite*).

Une phase intermédiaire d'environ une semaine est nécessaire avant d'entrer totalement dans l'ombre terrestre (*Fig. 9, gauche*).

Notons que les signaux sont ici exprimés en Watt/m². Le facteur d'échelle est ajusté par un modèle théorique des fonctions de transfert de chacun des éléments intervenant dans la chaîne de mesure. Cette procédure a été validée en laboratoire.



Fig. 9: (Gauche) Après le pointage stellaire, on observe le développement des chutes de température induites dans le shunt par les occultations terrestres.

(Droite) Les premières atténuations apparaissent le 9 novembre. Après huit jours, l'amplitude se stabilise légèrement au-dessus de la valeur de 0°C obtenue pendant le pointage stellaire du 9 novembre. Les signaux sont exprimés en Watt/m² en fonction du temps.

A partir du 15 novembre, PICARD traverse complètement le cône d'ombre de la Terre. L'amplitude des variations devient alors quasi constante avec une légère modulation fonction des irradiances d'origine terrestre (*Fig 10*). Cependant la durée des occultations augmente pour atteindre un maximum de vingt minutes au solstice d'hiver ! Ensuite le Soleil se rapproche du plan équatorial et les éclipses diminuent en durée. En février, elles disparaissent avant de recommencer un cycle en fin d'année.



Fig10: Enregistrement de quelques occultations par le BOS. Les amplitudes sont relativement constantes. Les signaux sont exprimés en Watt/m² en fonction du temps.

Signaux d'origine terrestre

Une observation des variations des minimums du rayonnement lors des occultations montre des variations significatives qui refléteraient la variabilité des effets d'origine terrestre en absence du rayonnement d'origine solaire (*Fig. 11*). Par rapport aux valeurs obtenues durant les pointages stellaires, on a environ 80 Watt/m² de différence. Cette valeur doit être normalisée en fonction de divers paramètres tels que les coefficients d'absorption des peintures et les angles de vue de la Terre par rapport à la face avant du BOS.



Fig 11: Enregistrement des minimums de l'irradiance enregistrée par le BOS lors des occultations.

La séparation en différentes composantes du signal du BOS est complexe (*Fig. 12*). Seule une séparation en bandes spectrales définies pour chaque type de mécanisme permet de les isoler.



Fig 12 : Caractéristiques orbitales du satellite PICARD. La face avant du satellite reste en permanence perpendiculaire au rayonnement solaire. Le coefficient qui caractérise le rayonnement absorbé est l'irradiation solaire augmentée des rayonnements d'origine terrestre. Ceux-ci dépendent des zones survolées.

Une représentation des valeurs de T1 et T2 reportée sur la surface de la Terre, illustre l'influence des zones survolées (*Fig. 13*).



Fig13: Enregistrement des signaux T1 et T2 du BOS rapportés à la zone survolée.

Une modélisation systématique de chaque effet doit être mise en place avant de pouvoir maîtriser les signaux en phase de routine. Cette tache, qui est en cours, s'avère complexe si on tient compte de la grande dynamique du capteur et de son mode opératoire original. Divers paramètres peuvent influencer les mesures telle l'altitude aux dessus des continents (*Fig. 14*). Si nous désirons évaluer la nécessité de tenir compte de cet effet, nous devrons modéliser l'impact sur les signaux avant d'envisager d'appliquer une correction théorique de ceux-ci.



Fig 14: Mise en parallèle du signal T12 et de l'altitude du satellite.

Conclusions

Les objectifs principaux de PICARD visent à la fois une meilleure compréhension de l'héliophysique tout autant que de ses implications sur la climatologie terrestre. Notre contribution consiste à compléter l'observation toutes les dix secondes à très haute résolution des variations de l'irradiation solaire totale (TSI pour Total Solar Irradiance).

Le capteur BOS (Bolometric Oscillation Sensor) se réfère au principe de mesure fondé sur le concept du bolomètre qui consiste à mettre en œuvre des mesures thermométriques modulées par le rayonnement reçu.

La dynamique pour des périodicités de quelques minutes est de l'ordre du million de points de résolution. En principe, si les stabilités des peintures et des thermistances sont acquises, des mesures en absolu de rayonnements seraient envisageables par notre approche.

Leur évolution sous l'effet des rayons UV semble importante dans l'espace. Cela constitue est une des causes des indéterminations.

Par contre, la très grande dynamique du BOS ouvre la voie à l'étude de modes vibratoires divers qui sont à la limite de la détectabilité. Un facteur d'échelle moins précis suffit dans ce type d'enregistrement. Inversement, l'algorithme de traitement des signaux bruts en termes de TSI absolu requiert une comparaison entre les signaux du BOS par exemple et ceux de SOVAP.

L'activité solaire modulée sur une période d'environ onze années est à ce jour en augmentation. La TSI devrait croître durant le temps de vie de PICARD qui est de trois à quatre années. Un des équipements embarqués nommé SODISM (pour Solar Diameter Meter) doit permettre de mesurer avec une précision inégalée le diamètre du disque solaire et ses infimes variations. Cela permettrait d'établir une relation éventuelle entre activité et diamètre moyen.

La clé métrologique à maîtriser pour atteindre cet objectif ambitieux tient entre autres choses à la parfaite connaissance de l'état thermique de SODISM. Le module SOVAP fait partie des différents capteurs complétant cet équipement sophistiqué afin d'atteindre la précision souhaitable.



Remerciements

Tout en réitérant les remerciements présentés lors du premier article, les auteurs souhaitent remercier les personnes qui ont contribué depuis le placement du satellite en orbite, à la maîtrise des situations rencontrées. Cette expérience s'avère passionnante à bien des égards et les relations scientifiques nouées à ce propos nous confirment dans notre idéal de chercheurs. Les supports reçus en particulier des responsables des projets PRODEX nous ont permis de concrétiser nos engagements dès le principe des travaux de conception et de validation du BOS.

Bibliographie

van RUYMBEKE,M., RENDERS, Fr., NOËL, J.Ph., van RUYMBEKE Fr., LOPEZ-MARTINEZ, D. & Zhu Ping, Mise en orbite d'un bolomètre élaboré à l'Observatoire Royal de Belgique (ORB) Ciel&Terre Volume 126, N°6 novembre-décembre 2010, pp 173-179

Espenak, F. & Anderson, J., 2008 Annular and Total eclipses of 2010 NASA/T6P-2008-214171