

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

4ÈME PARTIE: OBSERVATION PAR LE BOS DE LA RADIATION THERMIQUE ÉMISE PAR LA TERRE

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

Résumé

Le bolomètre décrit dans les articles précédents enregistre simultanément le rayonnement émis par le Soleil complété d'une composante radiative d'origine terrestre. Le traitement mathématique des signaux permet, à partir des spécificités des modulations pour chacune des deux parties, de séparer les effets induits par le Soleil de ceux induits par la Terre. Dans cet article sont introduits les premiers résultats concernant le rayonnement émanant de notre planète.

Introduction

L'énergie solaire induit en grande partie des phénomènes climatiques terrestres. A l'équilibre, la radiation solaire est égale à la somme de l'énergie radiative réfléchie dans la partie visible du spectre et de l'émission en infrarouge au sommet de l'atmosphère (TOA pour *Top Of the Atmosphere*). L'écart par rapport à l'équilibre joue un rôle important dans l'évaluation des processus observés. Celui-ci peut être déduit à partir des mesures satellitaires de la température des océans et du rayonnement terrestre. Un écart systématique évalué à $0,6 \pm 0,4$ Watt/m² semble confirmé [Stephens & al., 2012]. La détermination de ce paramètre constitue un défi dont la maîtrise prévaut dans celle du budget du rayonnement de la Terre.



Figure 1: L'orbite du satellite permet d'observer le Soleil sans interruption pendant une large part de l'année. Cependant durant une période centrée sur le solstice d'hiver, le BOS passe dans l'ombre de la Terre. Seul le rayonnement infrarouge terrestre est alors perceptible.

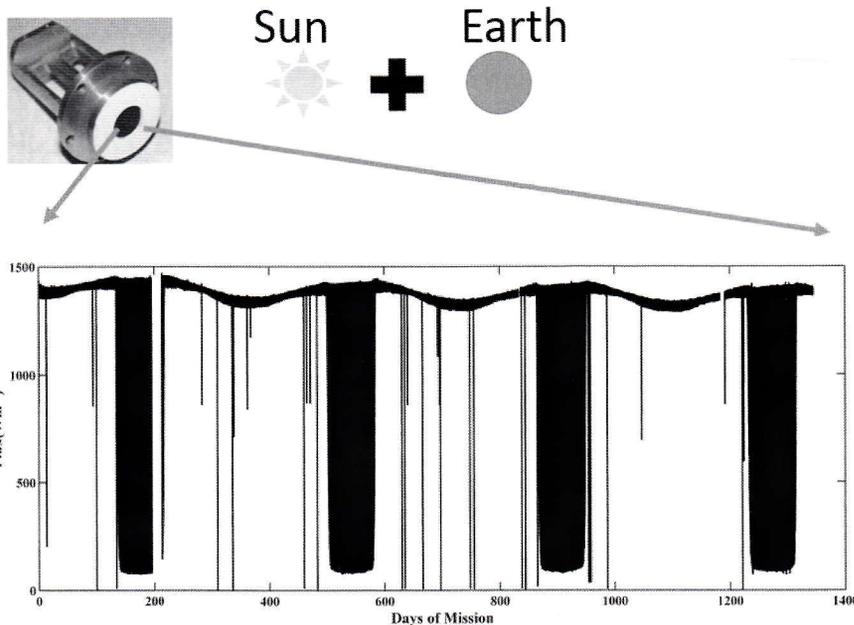


Figure 2: Enregistrement brut du BOS. Les périodes d'occultations apparaissent clairement ainsi que les pointages stellaires et les éclipses du Soleil par le passage dans l'ombre de la Lune.

L'expérience acquise lors de la période active du capteur *Bolometric Oscillation Sensor* (BOS) placé sur la plateforme SOVAP du satellite PICARD ouvre la voie à de nouvelles approches instrumen-

tales dans la problématique de la balance énergétique terrestre. Le BOS met en œuvre une approche calorimétrique et non optique. Cet article, qui complète la série traitant du BOS, entrevoit les po-

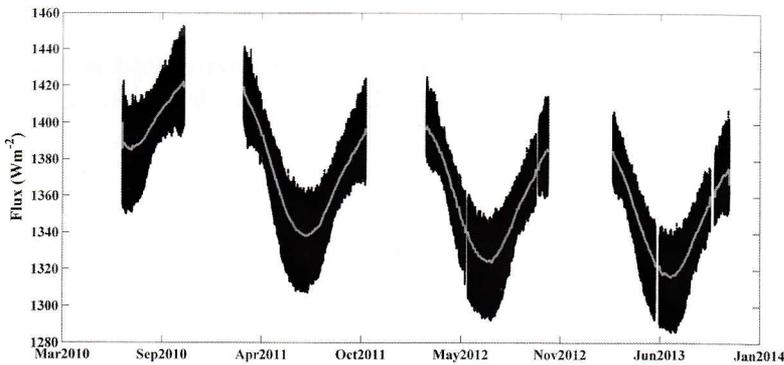


Figure 3: Les enregistrements durant les périodes d'occultation ont été supprimés. Une légère dérive est induite par le vieillissement des matériaux recouvrant le capteur. La courbe centrale est obtenue par le filtre glissant. La modulation liée à l'ellipticité de l'orbite de la Terre apparaît clairement.

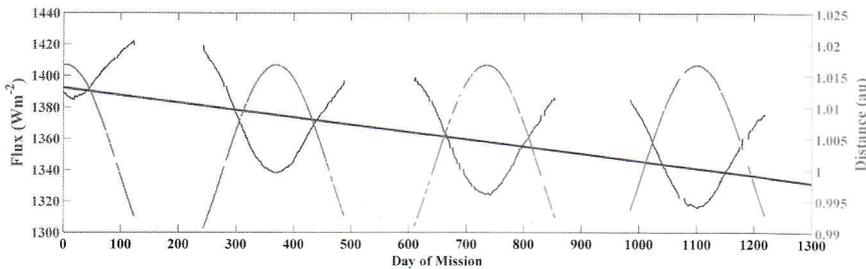


Figure 4: Après application d'un filtrage par moyenne glissante sur une période de 7 jours, on rejette les modulations d'origine terrestre. La comparaison entre la modulation théorique du flux solaire en fonction de la position du satellite et les signaux du BOS permet de déterminer le coefficient de corrélation à appliquer pour soustraire les effets solaires.

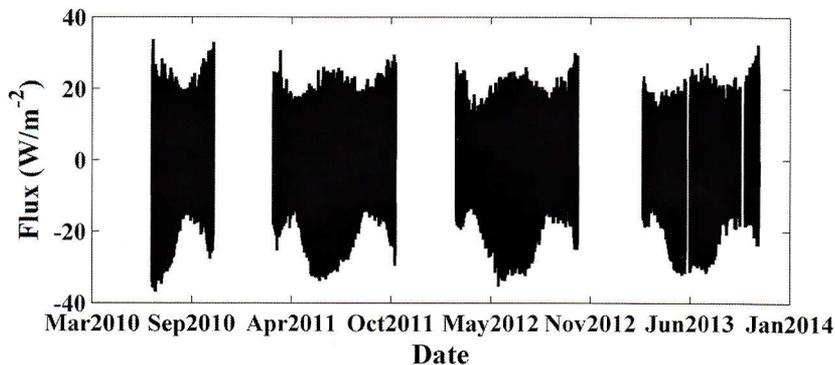


Figure 5: Rayonnement d'origine terrestre après soustraction des effets solaires

tentialités de notre approche instrumentale [Ciel et Terre, Vol.126 n°6, Vol.127 n°1 et Vol.130 n°5]. Le capteur présente une dynamique très importante d'une part-par-million (1ppm) et un rythme d'acquisition de dix se-

condes. Cela permet de mesurer simultanément les radiations solaires et terrestres avec un seul système. Les modulations spécifiques des signaux permettent de séparer les diverses composantes qui les constituent.

PICARD dispose d'un système de pointage qui maintient sa face avant perpendiculaire à la direction du Soleil avec une précision de $0,1^\circ$. Son orbite quasi circulaire est caractérisée par une période moyenne de 99,4 minutes avec un périhélie de 733,9 km et un apogée de 735,5 km.

Mesure des rayonnements captés par le BOS

Rappelons que le BOS comporte deux surfaces aux caractéristiques d'absorption et d'émission variant en fonction des longueurs d'onde des rayonnements. Son temps de réponse est d'environ vingt secondes, adapté au rythme d'acquisition d'une mesure chaque dizaine de secondes.

La surface absorbante du BOS reçoit simultanément les rayons solaires et les rayonnements d'origine terrestre (Figure 1). Le signal (Figure 2) enregistré pendant toute la période active de PICARD sera converti en flux thermique absorbé (Watt/m^2).

Diverses étapes s'imposent pour extraire la composante terrestre du rayonnement. On commence par supprimer les périodes d'occultation (Figure 3). Un premier filtrage par moyenne glissante permet de bien mettre en valeur la modulation induite par l'ellipticité de l'orbite de la Terre qui est parfaitement connue. L'intervalle de temps de ce filtrage par moyenne glissante est choisi en fonction de la qualité des corrélations pour différentes fenêtres. Un intervalle sur sept jours s'avère le mieux adapté (Figure 4). On peut alors soustraire du signal la composante solaire.

Notons qu'il existe également une dérive probablement d'origine instrumentale. Celle-ci peut être évaluée entre le 370^{ème} et le

1.100^{ème} jour à 25 W/m² pour un total de 1.360 W/m², soit de l'ordre de 1 % de dérive par année. Cette faible dérive constitue un des atouts majeurs de l'approche calorimétrique de nos mesures avec le BOS.

Après soustraction de la composante solaire et de la correction de dérive du capteur, on obtient l'enregistrement du rayonnement terrestre (Figure 5). Celui-ci présente des modulations importantes de l'ordre de 60 Watt/m² à mettre en relation avec les diverses origines susceptibles de l'influencer.

Le rayonnement en provenance du fond du ciel peut être considéré comme négligeable. Il est le seul à agir lors des pointages stellaires.

Traitement des observations du rayonnement terrestre.

Analysons les conditions d'enregistrement du BOS placé sur le satellite PICARD. Celui-ci survole la Terre à une vitesse de 7,5 km/sec tandis que la Terre à l'équateur défile à la vitesse de 0,5 km/sec par rapport à son plan orbital. Après environ un jour, le BOS retrouve les mêmes conditions d'observation de la surface de la Terre. A chaque instant, la surface de mesure est de 1,3 %

du total de celle de la Terre. Il est très difficile de déduire une information à partir d'une résolution aussi faible. Heureusement, la cadence d'acquisition de données de dix secondes correspond à un déplacement moyen de la surface observée de 1500 km². Si on opère des moyennes par recouvrements en tenant compte des éléments orbitaux de PICARD, la résolution en surface augmente avec le temps d'observation (Figure 6).

Variations des rayonnements terrestres en fonction du temps et des positions du BOS.

Le signal radiatif émis par la Terre subit des variations saisonnières et diurnes qui dépendent de divers paramètres. Citons la couverture nuageuse, le type de paysage ou la distribution des aérosols. La réflexion des radiations solaires dans la bande du visible varie avec la densité et la couverture nuageuse au sommet de l'atmosphère. La nature de la surface de la Terre a une influence directe sur les émissions et les réflexions radiatives. Les aérosols peuvent également réduire le transfert vers l'espace des ondes infrarouges de grandes longueurs d'onde. Ils sont entre autres d'origine volcanique ou proviennent de la pollution de l'air. En plus des effets saisonniers, les variations diurnes induites par la rotation

de la Terre influencent de façon significative les enregistrements. Ce phénomène rend très difficile la détermination en temps réel du budget des divers rayonnements terrestres. Généralement cet effet diurne est modélisé par une sinusoïde établie sur la base d'une comparaison de mesures obtenues par des satellites polaires comme PICARD et des satellites géostationnaires [Loeb & al., 2009].

L'orbite de PICARD (Figure 7) venant de l'Antarctique traverse le plan équatorial à 6 h du matin en temps local. Le BOS enregistre alors le rayonnement matinal de la Terre qui, à ce moment-là, a dissipé une partie de son énergie au cours de son cycle nocturne. Après avoir survolé le Nord, le BOS retransverse le plan équatorial à 18 h en fin de journée. Il survole alors une portion de Terre ayant emmagasiné le rayonnement solaire diurne.

La comparaison des signaux des déplacements Nord-Sud et Sud-Nord fournit des informations sur la dissipation thermique liée à la rotation de la planète (Figure 8).

Deux cartes différentes du rayonnement moyen sont établies à partir des données des demi-cercles allant du Nord vers le Sud (DESCendant) et du Sud vers le Nord (ASCendant).

La moyenne entre les deux cartes DES et ASC donne une représentation de la radiation émise par la Terre. Cette moyenne inclut l'énergie thermique infrarouge et la réflexion dans le domaine visible (Figure 9).

La différence entre (ASC-DES) correspond par contre aux variations de rayonnements entre le jour et la nuit (Figure 10). Elle dépend de la distribution des

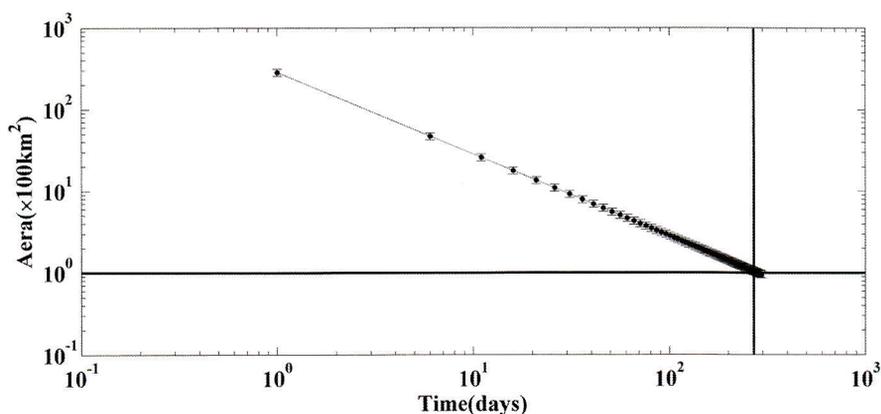


Figure 6: Une analyse sur un intervalle de 270 jours permet en principe d'atteindre une résolution rapportée à la surface de la Terre de 100 km².

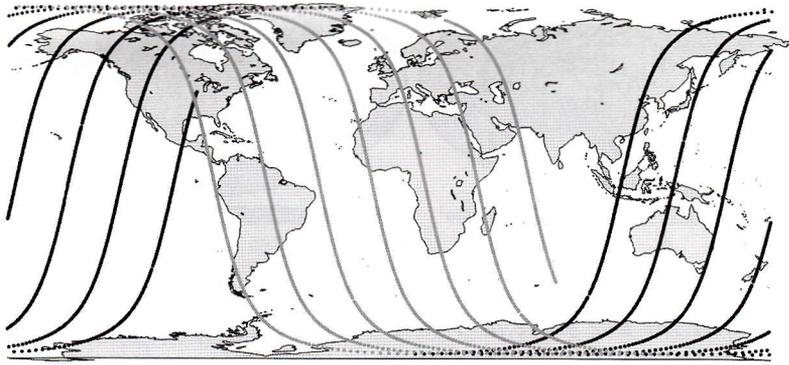


Figure 7: Projection des orbites de PICARD rapportée à la surface de la Terre. En noir les passages descendant du Nord vers le Sud et en gris, les passages remontant du Sud vers le Nord.

nuages tropicaux. De plus l'effet des océans se différencie par rapport à celui des continents.

Parmi les 3,5 années d'activité du BOS à bord du satellite PICARD reprises à la figure 5, on sélectionne trois périodes d'enregistrement de mars à octobre en 2011, 2012 et 2013. Les périodes d'occultation ne sont pas utilisables car elles présentent des variations trop importantes susceptibles de générer des signaux non significatifs lors du traitement par moyennes glissantes.

Une normalisation des données en fonction de la distance entre le BOS et le sommet de l'atmosphère doit être appliquée avant de déterminer les moyennes de rayonnement émis.

Le découpage retenu pour présenter les résultats d'analyse utilise un assemblage de carrés de $1^\circ \times 1^\circ$ de surface.

Séparation du rayonnement infrarouge du rayonnement total

La détermination du rayonnement IR de la Terre constitue un des objectifs du programme ERB (*Earth Radiation Budget*).

Ce projet utilise les équipements CERES. Ceux-ci sont constitués de deux canaux d'observation couvrant respectivement la totalité du spectre et uniquement sa partie visible. Cela permet, par soustraction du visible, de connaître l'énergie rayonnée dans l'infrarouge. Les caméras sont à faible et large ouverture. La résolution spatiale est donc très supérieure à ce que le BOS peut prétendre.

Le BOS enregistre simultanément les effets solaires et terrestres. PICARD décrivant une orbite polaire héliosynchrone est en permanence très proche du terminateur qui sépare les parties éclairées et non éclairées de la pla-

nète. On établit l'histogramme, pour PICARD, de l'angle entre la verticale passant par le satellite et le vecteur passant par le point de cette verticale sur la surface terrestre et le Soleil (Figure 11). Un angle de 90° correspond à un Soleil sur l'horizon. Les valeurs sont comprises entre 60° et 120° . Les écarts sont principalement induits par les orbites de PICARD et le mouvement du Soleil dans le repère terrestre. Par abus de langage, on parlera d'angle zénithal.

PICARD reçoit la radiation solaire en permanence alors que le rayonnement provenant de la Terre est fonction de la position du nadir du BOS par rapport au terminateur. Si l'angle zénithal dépasse 90° , le sol n'est plus éclairé. En comparant les enregistrements en fonction de cet angle, on peut extraire les valeurs du rayonnement terrestre. La figure 12 reprend les profils radiatifs de la Terre. Pour la période comprise entre mars et novembre 2011, on compare le profil Nord-Sud du rayonnement IR terrestre à partir des données de BOS-PICARD avec celui déterminé par CERES [Loeb & *al.*, 2009].

Rappelons que les observations du BOS sont réalisées à 6h ou à 18h (temps local) depuis une altitude constante de 735 km.

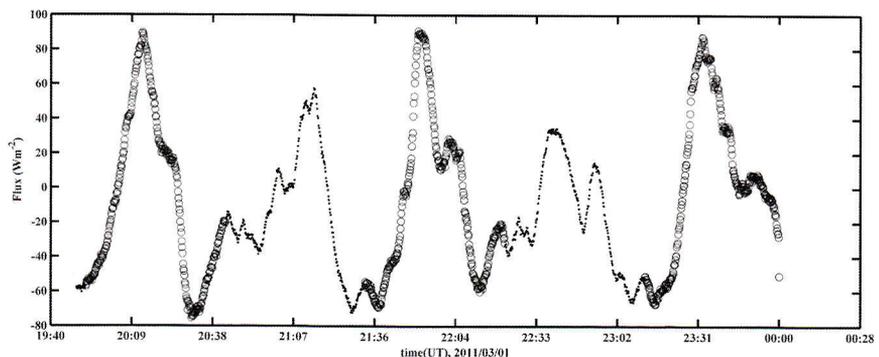


Figure 8: Un enregistrement du flux terrestre, correspondant à 2,5 orbites selon une séquence Sud-Nord-Sud-Nord-Sud-Nord (Petits cercles pour ASCendant Sud-Nord et pointillés pour DESCendant Nord-Sud).

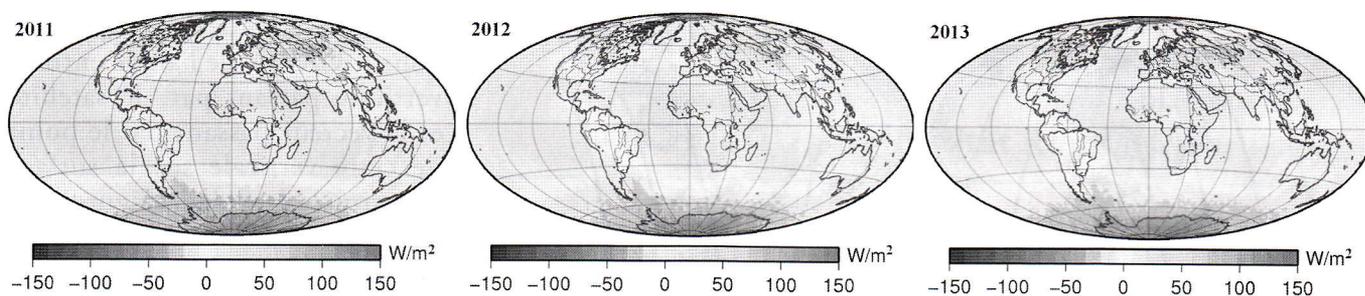


Figure 9 : Détermination, à partir des données du BOS, du rayonnement moyen (DES+ASC) de la Terre dans les spectres IR et visible. Le flux résiduel est projeté sur une grille de $1^\circ \times 1^\circ$: (gauche) Mars à Octobre 2011, (centre) Mars à Octobre 2012, (droite). Mars à Octobre 2013 (voir également la page de garde pour une version en couleurs)

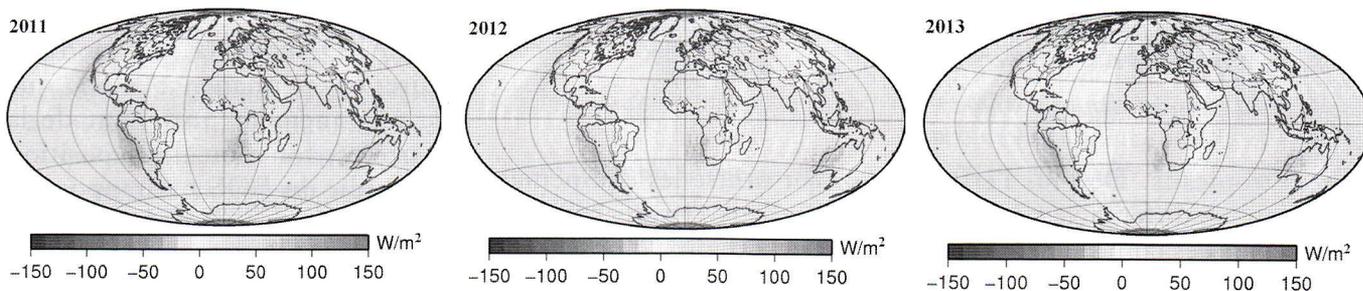


Figure 10 : Détermination, à partir des données du BOS, de la différence de rayonnement (ASC-DES) de la Terre dans les spectres IR et visible. Le flux résiduel est projeté sur une grille de $1^\circ \times 1^\circ$: (gauche) Mars à Octobre 2011, (centre) Mars à Octobre 2012, (droite). Mars à Octobre 2013 (voir également la page de garde pour une version en couleurs)

Par contre, les observations de CERES modélisées à 20km d'altitude sont obtenues par une combinaison d'informations provenant de satellites géostationnaires et de satellites en orbites polaires.

Conclusion et discussions

Nous avons présenté la contribution de la Terre dans le rayonnement enregistré par le système bolométrique BOS mis au point à l'Observatoire Royal de Belgique. Afin de séparer la radiation terrestre de la radiation totale, trois étapes ont été nécessaires. Il a fallu d'abord extraire la composante solaire par un filtrage glissant ayant une fenêtre de sept jours. On évalue ainsi quel est le rapport entre cette composante solaire et le rayonnement solaire théorique établi à partir de l'irradiance solaire et des paramètres orbitaux de la Terre. Ensuite, la deuxième étape a consisté à soustraire, du

signal du BOS, la contribution du Soleil. L'avantage de cette approche provient du fait qu'on élimine ainsi les effets de dérive instrumentale et les effets saisonniers, pour ne garder que la composante terrestre du rayonnement.

Enfin, la troisième étape a concerné l'établissement d'une carte divisée en carrés de $1^\circ \times 1^\circ$ rapportant les valeurs de rayonnement. On a montré que pareille résolution peut être atteinte avec un enregistrement de 270 jours.

Les flux résiduels occupent à la fois le spectre infrarouge et le visible. On a dès lors traité séparément les données obtenues lorsque PICARD se déplaçait du pôle Sud vers le pôle Nord et le cas inverse. La moyenne des deux séries correspond au rayonnement moyen de la Terre. La différence entre les deux séries reflète la dissipation

thermique de la surface de la Terre pendant son exposition nocturne à l'espace. Elle est corrélée avec la distribution des nuages dans les zones tropicales ainsi qu'avec la dissipation des océans.

Suivant sa position par rapport au terminateur, le BOS reçoit ou non la réflexion dans le visible du rayonnement solaire. A partir de cette différenciation, un profil en latitude du rayonnement IR de la Terre peut être établi. Avec un coefficient de corrélation de 0,97, ce profil confirme remarquablement celui produit par CERES.

Malgré une grande simplicité de conception, les spécificités du capteur bolométrique BOS permettent des approches intéressantes de la problématique des mesures de rayonnement. L'absence d'optique réduit le vieillissement des composants. L'ajout d'une source stable dis-

sipant de l'énergie thermique connue ouvrirait la voie vers une calorimétrie quasi absolue. A l'avenir, le BOS pourrait encore être miniaturisé en vue de rencontrer les limitations de microsattelites.

Pour de plus amples informations, on peut renvoyer à la publication [*Geosci. Instrum.*, 2014].

Remerciements

Les auteurs sont infiniment reconnaissants aux nombreuses personnes qui ont contribué à la réussite de ce projet. Différentes institutions y ont apporté leur concours à des titres divers. Les auteurs remercient en particulier Francis Renders pour la réalisation des prototypes et des modèles de vol du BOS à l'atelier de l'ORB. Le Dr Ping Zhu a assumé le traitement des données du BOS grâce au support du projet PRODEX n° 4000103202.

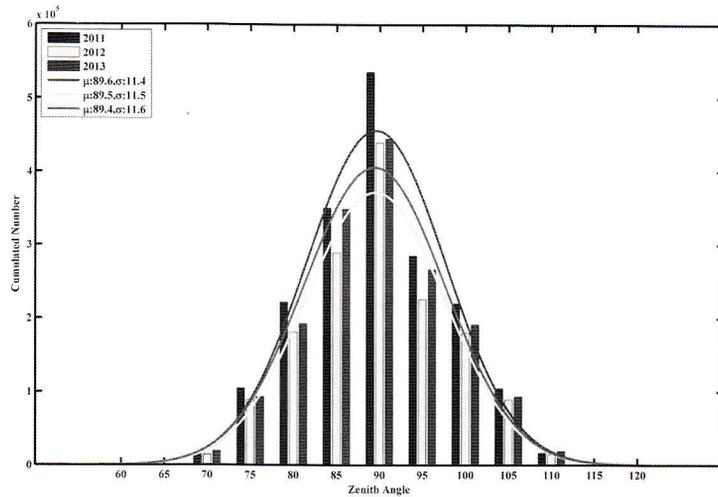
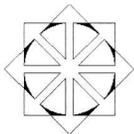
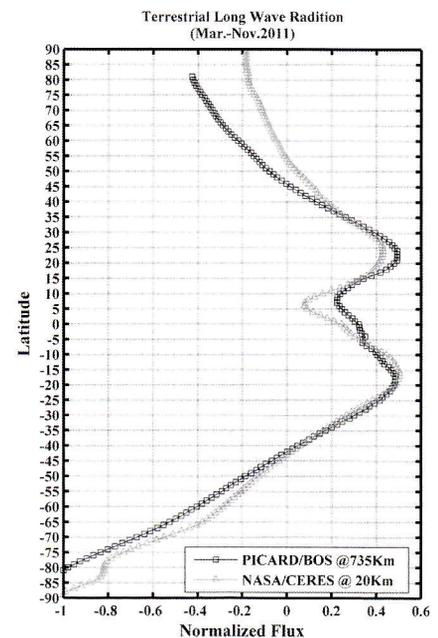


Figure 11: Histogrammes pour les années 2011, 2012 et 2013 des distances zénithales entre la position de PICARD et le Soleil. Les moyennes sont quasi égales à 90°.

Figure 12: Profils Nord-Sud du rayonnement de la Terre obtenus par CERES (triangles) et le BOS (carrés).



Références :

1. Graeme L. Stephens, Juilin Li, Martin Wild, Carol Anne Clyason, Norman Loeb, Seiji Kato, Tristan L'Ecuyer, Paul W. Stackhouse Jr, Matthew Lebsock and Timoth Andrews, *An update on Earth's energy balance in light of latest global observations*, Nature Geoscience, Vol.5, 691-395, 2012
2. Norman G. Loeb, Bruce A. Wielicki, David R. Doelling, G. Louis Smith, Dennis F. Keyes, Seiji Kato, Natividad Manalo-Smith and Takmeng Wong, *Toward Optimal Closure of the Earth's Top-of-Atmosphere Radiation Budget*, Journal of Climate, Volume 22, 748-766, 2009
3. Geosci. Instrum. Method. Data Syst. Discuss., 3, 1-25, 2014, www.geosci-instrum-method-data-syst-discuss.net/3/1/2014/ doi:10.5194/gid-3-1-2014