



**HAL**  
open science

# Nouveau regard sur quelques caractéristiques physiques du Soleil

Mustapha Meftah

► **To cite this version:**

Mustapha Meftah. Nouveau regard sur quelques caractéristiques physiques du Soleil. Astrophysique stellaire et solaire [astro-ph.SR]. Université Paris Saclay (COMUE), 2017. Français. NNT : 2017SACLV021 . tel-01593476

**HAL Id: tel-01593476**

**<https://theses.hal.science/tel-01593476>**

Submitted on 26 Sep 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Nouveau regard sur quelques caractéristiques physique du Soleil

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay  
préparée à L'Université de Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines

École doctorale n°579 : Sciences mécaniques et énergétiques,  
matériaux et géosciences - SMEMAG  
Spécialité de doctorat : Structure et évolution de la terre  
et des autres planètes

Thèse présentée et soutenue à Guyancourt, le 28 juin 2017, par

**Mustapha MEFTAH**

Composition du Jury :

Slimane Bekki Directeur de recherche, LATMOS (Guyancourt)	Président
Thierry Dudok de Wit Professeur, LPC2E (Orléans)	Rapporteur
Didier Fussen Professeur, Institut royal d'Aéronomie spatiale de Belgique	Rapporteur
Jean-Marie Malherbe Astronome, Observatoire de Paris	Examineur
Alain Hauchecorne Directeur de recherche de classe exceptionnelle, LATMOS	Directeur de thèse

**Titre :** Nouveau regard sur quelques caractéristiques physiques du Soleil

**Mots clés :** Soleil, Diamètre Solaire, Eclairement Solaire, Climat, Instrumentation, Satellite

**Résumé :** Cette thèse a pour objectif d'apporter un regard nouveau sur les principales caractéristiques physiques du Soleil. Avant le développement de l'astrophysique, l'étude d'un astre concernait surtout ses propriétés géométriques. La mesure précise du diamètre du Soleil a été entreprise dès l'antiquité et représente un des plus vieux problèmes en astrophysique. Une partie de cette thèse est consacrée à l'étude du diamètre solaire et de ses variations au cours du temps. Un des objectifs est de déterminer si le diamètre du Soleil varie en fonction de l'activité solaire. Les données acquises par les instruments de la mission PICARD ont été utilisées afin d'essayer de répondre à cette question. Cette thèse porte aussi sur la détermination absolue de l'aplatissement solaire et de ses variations au cours du cycle 24. Cette étude s'est basée sur l'exploitation des mesures acquises par deux télescopes spatiaux (PICARD/SODISM et SDO/HMI). Les mesures de l'aplatissement solaire sont importantes et permettent de valider les hypothèses physiques mises en œuvre dans les modèles du Soleil. Cette thèse consiste aussi à déterminer la valeur absolue de l'éclairement solaire total et de sa variabilité au cours du temps.

L'éclairement solaire total représente une entrée essentielle pour tous les modèles climatiques. Sa détermination précise est donc fondamentale. La valeur absolue de l'éclairement solaire total a été obtenue à partir des mesures réalisées par le radiomètre PICARD/SOVAP. Le dernier chapitre de cette thèse est dédié à l'étude de l'éclairement solaire dans l'ultraviolet et de ses variations au cours du cycle 24. Cette étude s'appuie sur les mesures réalisées par le spectromètre SOLAR/SOSLPEC à bord de la station spatiale internationale. La variabilité du rayonnement ultraviolet au cours d'un cycle solaire (~10% à 200 nm) est beaucoup plus élevée que celle de l'éclairement solaire total (~0.1%). La détermination précise de la variabilité dans l'ultraviolet est donc très importante. Il est aussi de plus en plus évident que les variations de l'éclairement solaire dans l'ultraviolet jouent un rôle significatif au niveau de la chimie de l'atmosphère et du climat de la Terre. Les résultats obtenus au cours de cette thèse montrent l'intérêt de réaliser des mesures précises dans l'ultraviolet au cours d'un cycle solaire de 11 ans.

**Title:** New lights on some characteristics of the Sun

**Keywords:** Sun, Solar Diameter, Solar Irradiance, Climate, Instrumentation, Satellite

**Abstract:** This thesis aims to highlight a new vision on the main physical characteristics of the Sun. Before the development of astrophysics, the study of a star mainly concerned its geometrical properties. The accurate measurement of the solar diameter was carried out since the antiquity and represents one of the oldest problems in astrophysics. Part of this thesis is devoted to the study of the solar diameter and its variation over time. One of the objectives is to determine whether the diameter of the Sun varies with the solar activity. Data acquired by the PICARD mission instruments were used to try to answer this question. This thesis also deals with the absolute determination of the solar oblateness and its variation during the cycle 24. This study was based on the use of the measurements acquired by two space-based telescopes (PICARD/SODISM and SDO/HMI). The solar oblateness measurements are important and allow to validate the physical hypotheses implemented in the solar models. This thesis also consists to determine the absolute value of the total solar irradiance and its variability over time. The total solar irradiance is an essential parameter for all climate models.

Its accurate determination is therefore fundamental. The absolute value of the total solar irradiance was obtained from the measurements carried out by the PICARD/SOVAP radiometer during the solar cycle 24. The last chapter of this thesis is devoted to the study of the solar irradiance in the ultraviolet and its variation during the solar cycle 24. This study is based on the measurements carried out by the SOLAR/SOSLPEC spectrometer on board the International Space Station. The variations of the ultraviolet radiation during a solar cycle (~10% at 200 nm for a strong solar cycle) are much higher than the variations of the total solar irradiance (~0.1%). The accurate determination of the ultraviolet solar irradiance is therefore very important. It is also increasingly evident that the variations of the solar irradiance in the ultraviolet play a significant role in the chemistry of the Earth's atmosphere and climate. The results obtained during this thesis show the interests to perform accurate measurements in the ultraviolet during a solar cycle of about 11 years. Through this work, we bring a new perspective with respect to the absolute value of the main solar parameters.



# Remerciements

*Cette thèse de recherche effectuée au LATMOS a été pour moi une expérience extrêmement enrichissante tant sur le plan scientifique que sur le plan personnel. Je tiens à remercier du fond du cœur toutes les personnes qui m'ont aidé, et qui ont contribué à faire de ces trois années une formidable aventure faite de rencontres et de voyages, mais aussi de beaucoup de travail dans l'analyse et l'exploitation des données issues des instruments au sol et des expériences spatiales.*

*Je tiens particulièrement à remercier mon Directeur de thèse, Alain Hauchecorne, pour l'immense soutien qu'il m'a apporté tout au long de ces trois années passées à ses côtés, pour son enthousiasme, ses connaissances, ses encouragements, et à sa patience sans lesquels ce travail n'aurait pu aboutir. Je lui en suis pleinement reconnaissant.*

*Je suis aussi très reconnaissant envers les rapporteurs (Thierry Dudok de Wit et Didier Fussen) qui ont accepté d'examiner et de corriger mon travail, ainsi que les examinateurs (Slimane Bekki et Jean-Marie Malherbe) qui ont accepté de participer au jury de ma soutenance.*

*J'adresse mes remerciements à Monsieur Philippe Keckhut, Directeur du LATMOS, de m'avoir accueilli au sein du Laboratoire dans le cadre de cette thèse de Recherche Scientifique.*

*Je saisis cette occasion pour remercier tous les membres du département de recherche SHTI (Stratosphère, Haute Troposphère, et leurs Interfaces). Il s'agit d'un des groupes les plus ouverts dans lequel j'ai été amené à travailler. Je suis extrêmement reconnaissant à tout ceux qui y font vivre l'esprit d'émulation et d'ouverture qui y règne. Je remercie les différentes personnes du Laboratoire qui ont eu un rôle déterminant dans l'avancement de mon travail. Je remercie également mes collègues de l'Observatoire de la Côte d'Azur (Thierry Corbard, Frédéric Morand, Catherine Renaud, Rabah Ikhlef, etc.) pour l'excellent partenariat que nous avons mis en place dans le cadre de la mission PICARD SOL.*

*Enfin, je remercie toute ma famille pour son soutien tout le long de cette thèse. Je conclurai en remerciant de tout cœur mon épouse et mes enfants.*

Le mot « Soleil » provient du latin populaire *soliculus*, dérivé du latin classique *sol*, *solis* désignant l'astre et la divinité.

Le symbole astronomique du Soleil est un cercle avec un point en son centre :  $\odot$ .

**Définition du grand Larousse illustré :**

*« Le Soleil est l'une des quelque 100 milliards d'étoiles de la Galaxie. Il présente la double caractéristique d'être une étoile extrêmement proche (Proxima du Centaure, l'étoile la plus proche du Système solaire, est 270 000 fois plus lointaine) et du type le plus courant. Son étude constitue de ce fait un moyen d'information permettant d'accéder aux processus fondamentaux d'évolution des étoiles et de vérifier certaines hypothèses et méthodologies utilisées en astrophysique stellaire. L'essentiel de ce que l'on sait du Soleil vient de l'étude de son rayonnement ; toutefois, depuis les années 1970, l'héliosismologie (ou sismologie solaire), qui étudie les modes d'oscillation du Soleil, favorise la connaissance de sa structure interne. Par ailleurs, les observations spatiales viennent désormais utilement compléter celles faites au sol, en autorisant l'étude du Soleil dans des domaines du spectre correspondant à des rayonnements arrêtés par l'atmosphère terrestre : rayonnements  $\gamma$ , X et ultraviolet. »*

*A Béatrice ...*

*A toute ma famille ...*

# Table des matières

<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Le Soleil</b>	<b>11</b>
1.1 La naissance du Soleil . . . . .	13
1.2 Le Soleil tel que nous le connaissons aujourd’hui . . . . .	15
1.3 Les réactions nucléaires et l’avenir du Soleil . . . . .	17
1.4 La structure interne du Soleil et l’héliosismologie . . . . .	19
1.5 L’atmosphère solaire . . . . .	23
1.5.1 La photosphère . . . . .	24
1.5.2 La chromosphère . . . . .	25
1.5.3 La couronne . . . . .	27
1.6 Les caractéristiques générales du Soleil . . . . .	28
1.7 Les modèles de l’intérieur et de l’atmosphère solaire . . . . .	29
1.8 Le spectre solaire et l’éclairement solaire total et spectral . . . . .	38
1.9 L’activité solaire . . . . .	41
1.10 Les relations Soleil-Terre . . . . .	44
1.11 Les moyens d’observation et les instruments étudiés . . . . .	47
1.11.1 Les moyens d’observation du Soleil . . . . .	47
1.11.2 Les instruments en orbite étudiés . . . . .	49
1.11.3 Les instruments au sol étudiés . . . . .	53

<b>2</b>	<b>Le diamètre du Soleil et ses variations au cours du cycle 24</b>	<b>55</b>
2.1	Historique des mesures . . . . .	57
2.1.1	Détermination absolue du diamètre solaire et bilan d'erreur . . . . .	60
2.1.2	Variations du diamètre solaire au cours du temps . . . . .	61
2.2	Impact de l'atmosphère sur les mesures au sol . . . . .	61
2.2.1	Impact de la réfraction . . . . .	62
2.2.2	Impact de la turbulence atmosphérique . . . . .	65
2.3	Détermination absolue du diamètre solaire . . . . .	70
2.3.1	Passage de Vénus du 5 et 6 juin 2012 . . . . .	70
2.3.2	Détermination de la position de Vénus et de son rayon apparent . . . . .	73
2.3.3	Détermination de la position du Soleil et de son rayon apparent . . . . .	77
2.3.4	Détermination du facteur d'échelle de l'instrument SODISM . . . . .	78
2.3.5	Distorsion optique et déformation de l'image . . . . .	79
2.3.6	Profils d'assombrissement centre bord du Soleil et de Vénus . . . . .	80
2.3.7	Détermination du rayon solaire à 607.1 nm . . . . .	81
2.3.8	Détermination du rayon solaire pour d'autres longueurs d'onde . . . . .	83
2.4	Etude des variations du diamètre solaire . . . . .	85
2.4.1	Introduction . . . . .	85
2.4.2	Problématique liée à la mesure des instruments en orbite et au sol . . . . .	87
2.4.3	Compréhension des phénomènes observés par l'instrument en orbite . . . . .	90
2.4.4	Modèle thermique de la fenêtre d'entrée de l'instrument en orbite . . . . .	92
2.4.5	Modèle optique de l'instrument en orbite . . . . .	96
2.4.6	Evolution du rayon solaire des instruments en orbite et au sol . . . . .	96
2.5	Conclusions . . . . .	113
<b>3</b>	<b>La forme du Soleil et ses variations au cours du cycle 24</b>	<b>115</b>
3.1	Historique des mesures . . . . .	116
3.2	Expression de l'aplatissement solaire . . . . .	118
3.3	Détermination absolue de l'aplatissement solaire . . . . .	121
3.4	Etude des variations de l'aplatissement solaire . . . . .	121
3.5	Conclusions . . . . .	152

<b>4</b>	<b>La valeur absolue de la TSI et ses variations au cours du cycle 24</b>	<b>155</b>
4.1	Introduction . . . . .	156
4.2	Détermination absolue de l'éclairement solaire total . . . . .	157
4.3	Etude des variations de l'éclairement solaire total . . . . .	158
4.4	Conclusions . . . . .	182
<b>5</b>	<b>L'éclairement solaire dans l'UV et ses variations au cours du cycle 24</b>	<b>183</b>
5.1	Introduction . . . . .	184
5.2	Détermination d'un spectre solaire de référence dans l'UV (entre 165 et 400 nm) et étude de sa variation . . . . .	186
5.3	Conclusions . . . . .	208
<b>6</b>	<b>Conclusions et perspectives</b>	<b>211</b>
6.1	Conclusions . . . . .	211
6.2	Perspectives . . . . .	215
	<b>Publications</b>	<b>219</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>221</b>
<b>A</b>	<b>Caractéristiques d'un modèle de l'atmosphère solaire</b>	<b>231</b>
<b>B</b>	<b>Calcul des éphémérides</b>	<b>235</b>
B.1	Les données d'entrée . . . . .	235
B.2	Les équations utilisées dans le calcul des éphémérides . . . . .	236
B.2.1	Ephémérides de Vénus et du Soleil . . . . .	236
B.2.2	Calcul des coordonnées de Vénus vues depuis le satellite PICARD	238
<b>C</b>	<b>Polynômes de Zernike</b>	<b>243</b>
<b>D</b>	<b>Code du modèle optique de l'instrument SODISM</b>	<b>245</b>
	<b>Notations</b>	<b>249</b>



# Table des figures

1	Taches solaires observées par Galilée en 1610 . . . . .	2
1.1	Diagramme de Hertzsprung-Russell . . . . .	12
1.2	Cycle de vie du Soleil . . . . .	15
1.3	Structure du Soleil . . . . .	16
1.4	Structure du Soleil en coupe . . . . .	17
1.5	Température de l'intérieur solaire . . . . .	20
1.6	Profil de rotation solaire . . . . .	22
1.7	Température de l'atmosphère solaire . . . . .	24
1.8	Profils d'assombrissement centre-bord (mesure PICARD) . . . . .	25
1.9	Image en bande Ca II K de la chromosphère solaire . . . . .	26
1.10	Ejection de matières coronales . . . . .	27
1.11	Modèle de l'atmosphère solaire . . . . .	30
1.12	Profils d'assombrissement centre bord (modèles) . . . . .	32
1.13	Image de synthèse du Soleil et courbe d'assombrissement centre-bord . . . . .	33
1.14	Profils de limbes solaires, psf et convolution . . . . .	36
1.15	Retrait du point d'inflexion en fonction du diamètre de la pupille . . . . .	36
1.16	Images avec différentes conditions d'observation . . . . .	37
1.17	Spectre solaire . . . . .	39
1.18	Evolution de l'éclairement solaire total (modèle) . . . . .	40
1.19	Evolution de l'éclairement solaire spectral à 215 nm (modèle) . . . . .	40
1.20	Variation maximum de l'éclairement solaire spectral . . . . .	41
1.21	Evolution du nombre de taches solaires . . . . .	42

1.22	Diagramme papillon . . . . .	43
1.23	Variation de l'éclairement solaire total (cycles 23 et 24) . . . . .	43
1.24	Evolution de la TSI et de l'anomalie de température de la Terre depuis le minimum de Maunder . . . . .	44
1.25	Evolution de la TSI et de l'anomalie de température de la Terre depuis 1880 . . . . .	45
1.26	Evolution de la concentration de CO <sub>2</sub> et de l'anomalie de température de la Terre depuis 1880 . . . . .	45
1.27	Vues d'artiste ou photos des missions scientifiques étudiées . . . . .	48
1.28	Configuration optique de l'instrument SODISM . . . . .	49
1.29	Partie radiométrique de l'instrument SOVAP . . . . .	51
1.30	Configuration optique de l'instrument HMI . . . . .	52
1.31	Configuration optique de l'instrument SOLAR/SOLSPEC . . . . .	53
2.1	Coucher de Soleil et effet de la réfraction . . . . .	56
2.2	Eclipse solaire du 13 novembre 2012 . . . . .	57
2.3	Représentation schématique des angles d'observation du Soleil (modèle de réfraction) . . . . .	63
2.4	Impact de la réfraction sur la mesure du rayon solaire . . . . .	64
2.5	Evolution du rayon solaire corrigé de la réfraction . . . . .	64
2.6	Réponses impulsionnelles du système instrument-atmosphère . . . . .	68
2.7	Réponses impulsionnelles (psf) du système instrument-atmosphère en fonction du paramètre de Fried ( $r_0$ ) . . . . .	68
2.8	Profils d'assombrissement centre bord obtenus en fonction du paramètre de Fried ( $r_0$ ) . . . . .	69
2.9	Impact de la turbulence sur la mesure du rayon solaire . . . . .	69
2.10	Passage de Vénus de juin 2012 . . . . .	71
2.11	Image du Soleil acquise par l'instrument SODISM pendant le passage de Vénus de juin 2012 . . . . .	72
2.12	Méthode de détection de contours (filtre de Sobel) . . . . .	74
2.13	Accumulation dans l'espace de Hough permettant de localiser le centre de la planète Vénus . . . . .	76

2.14	Méthode de détection de contours (filtre de Canny) . . . . .	76
2.15	Facteur d'échelle de l'instrument SODISM à 607.1 nm . . . . .	79
2.16	Evolution du facteur d'échelle et de la distorsion optique du télescope à 607.1 nm . . . . .	80
2.17	Courbes d'assombrissement centre bord du Soleil et de Vénus . . . . .	81
2.18	Détermination absolue du rayon solaire à 607.1 nm . . . . .	82
2.19	Détermination absolue du rayon solaire pour plusieurs longueurs d'onde .	84
2.20	Dépendance en longueur d'onde du rayon solaire . . . . .	84
2.21	Evolutions de la variation du rayon solaire (SODISM et SODISM II) – aucune correction . . . . .	89
2.22	Evolution de l'intensité intégrée du disque solaire mesuré par l'instrument SODISM . . . . .	90
2.23	Champ de températures de la fenêtre d'entrée de l'instrument SODISM .	95
2.24	Température du Soleil en fonction de la longueur d'onde . . . . .	114
2.25	Evolution du rayon solaire au cours du cycle 24 (SODISM II) . . . . .	114
3.1	Forme du Soleil pour deux régions de l'atmosphère solaire (chromosphère et photosphère) . . . . .	115
4.1	Pyrhéliomètre développé par Claude Pouillet (« mesure de la constante solaire ») . . . . .	155
5.1	Schéma présentant le bilan radiatif de la Terre . . . . .	183
5.2	Evolution de l'éclairement solaire au cours du cycle 24 (mesure) . . . . .	209
B-1	Coordonnées différentielles – calcul des éphémérides . . . . .	240



# Liste des tableaux

1.1	Raies chromosphériques proéminentes . . . . .	26
1.2	Principales caractéristiques du Soleil . . . . .	28
1.3	Position du point d’inflexion pour différents modèles théoriques . . . . .	33
1.4	Impact des conditions d’observation sur la position du point d’inflexion . . . . .	37
1.5	Principales caractéristiques des télescopes étudiés . . . . .	54
2.1	Principales mesures du rayon solaire obtenues depuis plus de 2000 ans . . . . .	58
2.1	(suite) . . . . .	59
2.1	(suite) . . . . .	60
2.2	Principales mesures de la variation du rayon solaire . . . . .	61
2.3	Principaux événements du passage de Vénus de juin 2012 . . . . .	73
2.4	Budget d’erreurs associé à la détermination du facteur d’échelle du télescope SODISM . . . . .	79
2.5	Synthèse concernant la détermination du rayon solaire . . . . .	83
2.6	Objectifs des instruments de la mission PICARD . . . . .	88
3.1	Principales mesures de l’aplatissement solaire depuis plus de 100 ans . . . . .	116
3.1	(suite) . . . . .	117
3.2	Polynômes de Legendre – calcul de l’aplatissement solaire . . . . .	119
6.1	Principales caractéristiques du Soleil (synthèse des résultats) . . . . .	212
A-1	Principales caractéristiques d’un modèle de l’atmosphère solaire . . . . .	232
B-1	Positions et vitesses du satellite PICARD – calcul des éphémérides . . . . .	236
B-2	Coefficients de Tchebychev – calcul des éphémérides . . . . .	237



# Introduction générale

## Les prémices de l’astronomie et de l’étude du Soleil

Avec plus de 7000 ans d’histoire, l’astronomie est considérée comme la plus ancienne des sciences naturelles. L’Homme observait déjà le ciel il y a des dizaines de milliers d’années. Des phénomènes tels que le déplacement du Soleil dans le ciel ou les changements d’aspects de la Lune leur étaient familiers. A ses débuts, l’astronomie consistait à observer et à prédire le mouvement des objets célestes qui sont visibles à l’œil nu. L’observation des phénomènes périodiques naturels a été utilisée comme moyen de mesure du temps grâce à l’utilisation d’instruments dédiés (gnomon, cadran solaire, *etc.*). A juste titre, le Soleil est certainement l’astre qui a été le plus observé par l’Homme. En effet, le Soleil capte le regard, l’attention, l’observation, l’interrogation et l’imagination de l’Homme depuis toujours. Il a été vénéré par les Anciens qui lui ont voué de nombreux cultes au travers des âges, des civilisations (la Mésopotamie, l’Egypte Antique, la Grèce Antique, l’Empire Romain, les Olmèques, les Mayas, les Aztèques, les Incas, *etc.*) et des sites archéologiques (le site de Göbekli Tepe datant de la fin du Mésolithique, le site mégalithique de Stonehenge, le site celtique de Newgrange, la pyramide de Kukulcán sur le site de Chichén Itzá, *etc.*). Au niveau des observations, la plus ancienne éclipse solaire répertoriée date de 1223 av. J.-C [de Jong et van Soldt, 1989]. Cet événement astronomique a été représenté sur une table d’argile trouvée en 1948 dans les ruines du site d’Ougarit (Syrie). Vers 800 av. J.-C, les plus anciennes mentions d’observations visuelles de taches solaires ont été répertoriées dans le Livre des Mutations (Yi Jing), un des plus anciens écrits de la civilisation chinoise. Ces informations sont plausibles puisqu’il est possible d’observer de larges taches solaires à l’œil nu [Mossman, 1989; Schaefer, 1993] lorsque les conditions atmosphériques sont particulières (brilliance du Soleil atténuée par le brouillard ou les couches nuageuses). Vers 270 av. J.-C, la première détermination de la distance Terre-Soleil est réalisée par Aristarque de Samos (~310 à 230 av. J.-C). Par la même occasion, il propose la première estimation du diamètre solaire (1800 secondes d’arc) dans son unique ouvrage qui nous est parvenu (*Sur les grandeurs et les distances du Soleil et de la Lune*). Bien qu’approximatives, ces mesures

ont sans doute contribué aux premières réflexions d'Aristarque de Samos concernant le mouvement de la Terre autour du Soleil. Ainsi, il pose les bases d'une théorie héliocentrique qui sera proposée plus tard par Nicolas Copernic (1473–1543). Le modèle de Copernic aura de nombreux points communs avec la théorie de Nasir al-Din al-Tusi (1201–1274) [Veselovsky, 1973]. Bien que l'héliocentrisme ne fait plus aucun doute depuis le dix-huitième siècle, le débat scientifique concernant la valeur précise du diamètre solaire est toujours ouvert. Il s'agit d'un des plus anciens problèmes en astrophysique. Depuis les travaux initiés de Aristarque de Samos, plusieurs savants (Archimède de Syracuse (~287 à 212 av. J.-C), Claude Ptolémée (~90–168), Al-Battani (~855–923), Ibn al-Shatir (1304–1375), *etc.*) ont essayé de déterminer la valeur précise de cette quantité astrophysique. On note une effervescence de ces recherches à partir de la Renaissance. Ce mouvement fut permis grâce au perfectionnement de la lunette réalisée par Galilée en 1609. Même si Galilée (1564–1642) n'a pas été le premier astronome à observer les taches solaires, il l'a fait avec une précision inégalée à son époque et une rigueur remarquable. Ses travaux concernant le déplacement et la nature changeante des taches solaires sont archivés dans ses écrits et ses croquis (Figure 1). Ses observations permettaient d'étayer la théorie de Copernic. Cette période initiée par le développement des « télescopes » marque le début des séries chronologiques d'observation des taches solaires et de mesure du diamètre solaire. Jean Picard (1620–1682) est un des premiers à faire des observations régulières du diamètre solaire [Ribes *et al.*, 1987]. Il faut attendre les années 1990 pour obtenir les premières mesures du diamètre solaire hors atmosphère (ballons stratosphériques et satellites avec l'avènement de l'ère spatiale).

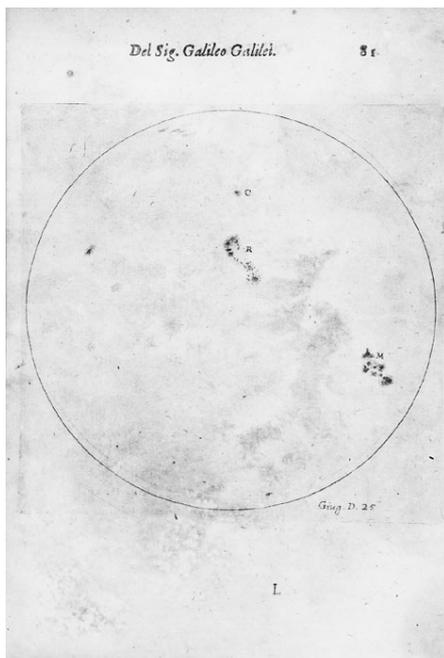


FIGURE 1 – Taches solaires observées par Galilée en 1610 (G. Galilei, *Sidereus Nuncius*). Thomas Harriot (1560–1621) est probablement le premier à les avoir observées. Johannes Fabricius (1587–1615) est le premier à publier et à donner une interprétation correcte du phénomène en 1611. Christoph Scheiner (1575–1650) publie ses lettres sur les taches solaires peu après. On note la démarcation très nette entre ombre et pénombre, et entre pénombre et atmosphère. Crédits : Bibliothèque de l'Observatoire de Paris.

## Le diamètre du Soleil

Avant le développement de l'astrophysique, l'étude d'un astre concernait surtout ses propriétés géométriques. C'est pourquoi la mesure du diamètre du Soleil a été entreprise dès l'Antiquité. Cette mesure a été réalisée à différentes époques par les différentes Ecoles d'Astronomie (grecque, arabo-musulmane, française, allemande, anglaise, américaine, *etc.*) sans pouvoir fournir une conclusion définitive quand à la valeur absolue du diamètre de notre astre. La valeur la plus communément admise aujourd'hui est celle déterminée par Arthur Auwers (1838–1915) lors des passages de Vénus de 1874 et 1882. La valeur canonique du demi-diamètre solaire<sup>1</sup> (ou rayon solaire  $R_{\odot}$ ) a été obtenue en utilisant un héliomètre et par le biais d'observations visuelles [Auwers, 1891]. Depuis plus de 2000 ans, différentes méthodes ont été développées afin de déterminer le diamètre de notre astre. On peut énumérer de manière non exhaustive les méthodes de mesure suivantes :

- Les temps de passage successifs des bords solaires à un repère donné,
- Les mesures angulaires (bâton de Jacob, secteur, quart de cercle, cercle répétiteur, lunette méridienne, sextant, *etc.*),
- Les mesures micrométriques (micromètre de William Gascoigne, *etc.*),
- Les éclipses solaires,
- Les passages de planète (Mercure ou Vénus).

Les avancées technologiques ont permis d'améliorer la précision des mesures. Cependant, les résultats obtenus ont fait l'objet de débats en raison de la grande dispersion des valeurs rapportées. Les différences obtenues dépendent principalement de la méthode de mesure, de l'instrumentation utilisée, des effets indirects affectant la mesure, et des différences entre les observateurs pour les méthodes visuelles. De plus, vouloir mesurer avec précision le diamètre d'une sphère gazeuse, dont l'enveloppe est en perpétuel changement, représente un réel défi. Et ceci d'autant plus que l'atmosphère terrestre, à travers laquelle les observations sont faites, constitue un gros handicap. A ces difficultés s'ajoute celle de la définition du bord solaire qui sert de repère géométrique pour délimiter la sphère solaire. Malgré ces obstacles, la mesure du diamètre solaire et de ses variations représente depuis très longtemps des programmes de Recherche dans de nombreux observatoires. Au cours de ces 40 dernières années, une des plus longues séries de mesure a été obtenue avec l'astrolabe de Danjon [Laclare *et al.*, 1996] installé sur le plateau de Calern (Observatoire de la Côte d'Azur). Les mesures réalisées semblent indiquer qu'il existe une anti-corrélation entre le diamètre solaire et l'activité solaire. Si cette anti-corrélation était confirmée, cela permettrait d'utiliser la mesure du diamètre comme traceur (proxy) de l'activité solaire tout comme les taches solaires.

---

1. On définit le diamètre solaire comme étant la distance entre les deux points d'inflexion du profil en intensité du disque solaire.  $R_{\odot} = 959.63 \pm 0.05$  secondes d'arc à une distance d'une unité astronomique.

Cependant, l'interprétation des observations au sol est controversée. Comme mentionné précédemment, les mesures de diamètre solaire sont sensibles aux effets de réfraction et de déformation du front d'onde par la turbulence atmosphérique et potentiellement par les effets de diffusion de la lumière par les aérosols qui dégradent la qualité des images. La seule façon de s'affranchir des effets atmosphériques est de pouvoir réaliser des observations hors atmosphère avec des instruments stables.

La détermination précise du diamètre solaire est considérée comme un des plus vieux problèmes en astrophysique. La valeur absolue du diamètre de notre astre représente aussi un intérêt en astronomie stellaire car le Soleil est le seul repère de dimension d'une étoile connu avec une bonne précision. De même, connaître le diamètre solaire avec la plus grande précision est indispensable pour savoir si notre étoile est stable dans le temps. En effet, une des motivations concernant l'observation du diamètre solaire au cours du temps est liée au fait qu'il puisse varier. Les variations du diamètre solaire présentent un intérêt scientifique par rapport à sa signification astrophysique et par rapport à sa potentielle relation avec le climat de la Terre. Enfin, le diamètre de notre astre correspond à un des paramètres utilisé au niveau des modèles de physique solaire. Pour les modèles ne faisant appel qu'au magnétisme de surface, le diamètre ne peut pas varier. Pour d'autres modèles faisant appel au magnétisme à la base de la zone convective, la variation du diamètre avec l'activité solaire dépend de la turbulence du plasma de la zone convective.

## La forme du Soleil

Le Soleil est une gigantesque boule de gaz de  $\sim 1.4$  millions de kilomètres de diamètre. Au premier ordre, il s'agit d'une sphère gazeuse en équilibre hydrostatique qui tourne lentement (un tour complet en environ 27 jours). Ainsi, la rotation du Soleil provoque un aplatissement des régions polaires. L'aplatissement d'un astre se définit comme la valeur arithmétique du rapport de la différence des deux axes (rayon équatorial et rayon polaire dans le cas du Soleil) sur le grand axe (rayon équatorial). Dans le cas d'une rotation rigide du Soleil (composition homogène et vitesse de rotation uniforme), l'aplatissement ( $\Delta_{\odot}$ ) peut être estimé théoriquement<sup>2</sup>. Mais le Soleil ne peut être considéré comme un corps rigide en rotation. En effet, la rotation différentielle de surface clairement identifiable par les taches solaires (25 jours à l'équateur et 35 jours aux pôles) complique la détermination théorique de l'aplatissement solaire. De même, l'aplatissement solaire est difficile à mesurer parce que sa valeur est très faible et parce qu'il peut être perturbé par l'activité magnétique superficielle, notamment par les taches solaires et les facules.

---

2. L'aplatissement solaire ( $\Delta_{\odot}$ ) est environ égal à  $10^{-5}$  dans le cas d'une rotation rigide du Soleil.

La problématique liée à l’aplatissement solaire (valeur théorique, mesure, *etc.*) a fasciné les astronomes à partir de la fin du dix-neuvième siècle. A cette époque, un des enjeux des astronomes était de pouvoir expliquer ainsi la précession du périhélie de Mercure. En effet, l’origine de cette quête est apparue lorsque Urbain Le Verrier (1811–1877) a mis en évidence que la précession observée de Mercure était « trop grande » [Le Verrier, 1859]. Il a montré que le point de l’orbite de Mercure le plus rapproché du Soleil (appelé périhélie) se déplaçait de 574 secondes d’arc par siècle. Or, selon la théorie de Newton, cette valeur devrait être de 531 secondes d’arc, soit une différence de 43 secondes d’arc entre l’observation et la théorie. Afin de justifier la légère perturbation de Mercure dans son mouvement par rapport au modèle prévu par la mécanique newtonienne, certains astronomes de l’époque sont allés jusqu’à imaginer l’existence d’une planète positionnée entre Mercure et le Soleil (Vulcain). D’autres ont suggéré une erreur grossière dans la masse acceptée de Vénus, un nuage de poussière zodiacale, ou un aplatissement solaire beaucoup plus important que prévu. Ainsi, Simon Newcomb (1835–1909) s’est demandé si l’aplatissement solaire ne pouvait pas expliquer la perturbation de la précession du périhélie de Mercure [Newcomb, 1895], valeur qu’il estima à  $5.2 \cdot 10^{-4}$ . A la fin du dix-neuvième siècle, Arthur Auwers a réalisé des observations solaires [Auwers, 1891] et il a fourni une des premières mesures de l’aplatissement solaire ( $\Delta_{\odot} \simeq -4.0 \cdot 10^{-5}$ ). Cette valeur de l’aplatissement solaire est assez faible et de surcroît négative (rayon polaire plus grand que le rayon équatorial) ; ainsi, elle ne permettait pas de justifier la précession du périhélie de Mercure. Cette anomalie sera expliquée en 1915 par Albert Einstein (1879–1955) avec la théorie de la relativité générale [Einstein, 1916]. En effet, la planète Mercure orbite près du Soleil (son périhélie se trouve à  $\sim 46$  millions de kilomètres du Soleil), et elle est particulièrement influencée par son champ de gravitation. Du point de vue la théorie d’Albert Einstein, Mercure circule dans une zone où, selon la relativité générale, la masse du Soleil courbe particulièrement l’espace-temps. Cette courbure entraîne une précession du périhélie nettement supérieure à celle prévue par la théorie de Newton. Ainsi, les travaux d’Albert Einstein ont permis de résoudre une énigme vieille de plus de soixante ans. Cependant, il n’a pas pris en compte la forme du Soleil dans ces travaux (effet du second ordre). Il faudra attendre la fin des années 1960 avec les travaux de Robert Henry Dicke (1916–1997) pour que l’on s’intéresse à nouveau aux mesures d’aplatissement solaire. En effet, Robert Henry Dicke met au point la théorie de Brans-Dicke, une alternative à la théorie d’Albert Einstein. Il effectue des mesures de l’aplatissement solaire ( $\Delta_{\odot} \simeq 4.4 \cdot 10^{-5}$ ) [Dicke et Goldenberg, 1967] qui sont utiles pour comprendre la précession du périhélie de Mercure, un des tests classiques de la relativité générale. Il posera ainsi les bases de « l’étude sur les paramètres de formes du Soleil » dès 1970. Dans les années 1990, des scientifiques se sont intéressés au problème de la forme

du Soleil, en mettant en avant les retombées physiques, principalement au niveau des moments gravitationnels. Ils ont déterminé la figure générale de l’astre, au-delà de son aplatissement « naturel » en montrant qu’elle permettait de déterminer de manière plus exacte les éphémérides des planètes (positionnement précis à des dates déterminées), et de bâtir éventuellement des théories alternatives de la gravitation. Les mesures acquises jusqu’à présent par différents auteurs depuis les années 1960, fournissent des valeurs proches de 8 millièmes de seconde d’arc (mas) pour la variation de rayon équateur–pôle ( $\Delta_{\odot}$  est environ égal à  $8.3 \cdot 10^{-6}$ ) avec des dispersions plus ou moins importantes. En effet, les observations directes de la forme du Soleil sont très difficiles à réaliser et représentent un défi encore très intéressant à relever aujourd’hui. Il y a un manque de séries chronologiques de mesure afin de pouvoir étudier la relation entre l’aplatissement solaire et l’activité solaire. Une des meilleures manières de pouvoir obtenir ces mesures est de pouvoir réaliser des observations hors atmosphère avec des instruments stables et sophistiqués.

Sur le plan scientifique, la mesure précise de l’aplatissement permet alors de valider les hypothèses physiques mises en œuvre dans les modèles. La mesure de l’aplatissement solaire donne des indications précieuses sur la rotation des couches internes du Soleil et sur le magnétisme de sous surface. Il faut savoir que la rotation solaire interne est une donnée fondamentale. C’est elle qui génère le champ magnétique qui crée la variabilité solaire. Pour cela, on doit aussi étudier la relation entre la valeur de l’aplatissement solaire et l’activité solaire. La forme exacte du Soleil permet aussi d’effectuer un des tests de la Relativité Générale d’Albert Einstein. En effet, la répartition exacte de la masse solaire détermine comment le Soleil affecte l’orbite de toutes les planètes, et en particulier celle de Mercure.

## L’éclairement solaire total

Le rayonnement solaire, première source d’énergie sur Terre, est constitué de l’ensemble du spectre électromagnétique, du rayonnement  $\gamma$  aux ondes radio. L’ensemble du spectre solaire varie avec des amplitudes différentes selon le domaine spectral considéré, et influe sur le système Terre-Atmosphère. L’éclairement solaire total (noté TSI pour « total solar irradiance ») exprime la quantité d’énergie solaire que recevrait une surface de 1 mètre carré située hors atmosphère terrestre à une distance d’une unité astronomique. L’éclairement solaire total est une entrée essentielle pour tous les modèles climatiques ; il représente une variable climatique essentielle. La première détermination sérieuse de la valeur absolue de l’éclairement solaire total date de 1838 [Pouillet, 1838]. Grâce à l’invention du pyréliomètre, Claude Pouillet (1790–1868) réalise les premières

mesures quantitatives de l'éclairement solaire total (appelé constante solaire jusqu'à l'avènement de l'ère spatiale et les premières mesures obtenues hors atmosphère à la fin des années 1970). L'estimation de la constante solaire était alors de  $1228 \text{ W m}^{-2}$  [Pouillet, 1838]; cette estimation est assez proche de la valeur actuellement admise<sup>3</sup>. Depuis 1838, d'autres physiciens ont estimé cette valeur tels que Jules Louis Gabriel Violle (1841–1923) ou encore Samuel Pierpont Langley (1834–1906). Charles Greeley Abbot (1872–1973) a affirmé que ses mesures ont montré des variations de la constante solaire, mais sans être en mesure de le démontrer. En effet, l'atmosphère de la Terre affecte les mesures au sol, ce qui rend très difficile la détermination absolue de la constante solaire. En particulier, la distribution du flux solaire spectral (lorsqu'il transite dans l'atmosphère de la Terre) est modifiée par des processus d'absorption et de diffusion. Par conséquent, la mesure de la constante solaire depuis l'espace fût nécessaire. Les premières observations réalisées hors atmosphère et en continu ont commencé à partir de 1978 grâce à l'utilisation de pyréliomètres spatiaux innovants [Hickey *et al.*, 1976; Willson et Hudson, 1981]. Elles ont mis en évidence la variabilité de ce qui était appelé jusqu'alors « la constante solaire ». En effet, la variation de l'éclairement solaire total au cours d'un cycle solaire (environ 11 ans) est d'environ 0.1% crête à crête (ces variations sont relativement faibles, néanmoins, elles ont été proposées comme un possible facteur de changement climatique [Willson et Hudson, 1991; Fröhlich et Lean, 1998]) avec des fluctuations de 0.3–0.4% autour des maxima d'activité solaire (observation de baisses notoires mais peu d'excursions positives). D'autres variations ont été détectées à partir de ces mesures (fréquences autour de 3 mHz, période de rotation solaire de 27 jours, *etc.*). En effet, l'éclairement solaire total varie sur une vaste gamme d'échelles temporelles. Les observations ont démontré que les variations de l'éclairement solaire total peuvent être expliquées par les variations de la couverture photosphérique de différentes structures magnétiques (taches solaires, facules, éléments du réseau supergranulaire, plages, régions éphémérales, trous coronaux, *etc.*). Par ailleurs, les mesures radiométriques de l'éclairement solaire réalisées depuis plus de 35 ans ont montré des désaccords vis à vis de la valeur absolue de l'éclairement solaire total qui peu à peu se sont réduits. Cependant, le débat reste ouvert et une détermination précise de la valeur absolue de l'éclairement solaire total est nécessaire; cette détermination nécessite un bilan d'erreur justifié lié à l'incertitude de la mesure. De même, la continuité des mesures calibrées d'éclairement solaire total doit être assurée avec des radiomètres spatiaux ultra-stables afin de mieux comprendre les relations avec les autres « proxies » d'activité solaire (taches solaires, indice du Ca II K, indice de flux radio solaire F10.7 cm,

---

3.  $\text{TSI} = 1361 \pm 1 \text{ W m}^{-2}$  à une distance d'une unité astronomique. Valeur recommandée par l'Union Astronomique Internationale lors de la XXIXe Assemblée Générale (2015).

indice Mg II, données sur les radionucléides cosmogéniques ( $^{10}\text{Be}$  et  $^{14}\text{C}$ ), *etc.*). En effet, la vision traditionnelle de l'activité solaire à long terme est basée sur l'enregistrement du nombre de taches solaires. Les mesures long-terme de l'éclairement solaire total permettent aussi de consolider les modèles de reconstruction de l'éclairement solaire total (SATIRE, NRLTSI, *etc.*). Cependant, les mesures présentent des incertitudes dans leurs tendances décennales. De même, pour les reconstitutions historiques, l'absence d'une compréhension physique complète de la relation entre l'éclairement solaire total et d'autres indicateurs de l'activité solaire laissent planer un doute dans les tendances multi-décennales. En effet, le lien entre l'activité solaire et l'éclairement solaire total doit être consolidé afin de valider les modèles de reconstruction de l'éclairement solaire total depuis le minimum de Maunder (modèle basé sur les taches solaires).

Les mesures de l'éclairement solaire total présentent aussi un intérêt vis à vis de l'influence du Soleil sur notre climat. Sur le long terme, la position astronomique de la Terre par rapport au Soleil (cycles de Milanković liés à l'excentricité, l'obliquité, et la précession) est le principal facteur de variabilité naturelle de la température globale de surface de la Terre, au travers de l'éclairement solaire total. L'activité solaire et la température globale de surface de la Terre semblent relativement corrélées aussi bien sur des échelles de temps courtes que longues. Cependant, le climat de la Terre ne dépend pas uniquement de la contribution solaire. Sur des échelles de temps allant jusqu'au millénaire, la température globale de surface est régie par les éruptions volcaniques, les forçages anthropiques (émissions de gaz à effet de serre, émissions d'aérosols, déforestation et plus généralement la modification des surfaces végétales), et maintes oscillations naturelles (variations de marée lunaire, *etc.*). Ainsi, il est nécessaire de connaître le poids des différents contributeurs (notamment d'origine solaire) afin de mieux comprendre les mécanismes associés au climat de la Terre et l'impact sur le réchauffement climatique.

## L'éclairement solaire spectral dans l'ultraviolet

Le Soleil est une étoile variable dont l'éclairement présente un grand nombre de périodes solaires allant de quelques minutes à plusieurs milliers d'années. L'activité solaire n'est ni stable ni désorganisée : il existe plusieurs cycles qui y sont liés tels que le cycle de Schwabe (de 8 à 13 ans), le cycle de Gleissberg (de 80 à 90 ans), le cycle de Suess (de 150 à 200 ans), ou encore le cycle d'Hallstattzeit (environ 2300 ans). Au cours d'un cycle solaire de 11 ans, l'amplitude de la variabilité solaire présente une forte dépendance avec la longueur d'onde. Ainsi, la mesure précise de l'éclairement solaire spectral hors atmosphère et de sa variabilité constituent une entrée fondamentale pour la physique solaire et la photochimie atmosphérique terrestre et les modèles climatiques.

En 1946, le premier spectre solaire s'étendant jusqu'à 210 nm dans l'ultraviolet est obtenu par l'équipe du physicien Richard Tousey (1908–1997) grâce à un tir fusée. Mais avant 1970, très peu de mesures fiables de l'éclairement solaire spectral sont disponibles. Un spectre solaire de référence issu des travaux de [Labs et Neckel](#) a commencé à être élaboré dès 1967 [[Labs et Neckel, 1967](#); [Labs et Neckel, 1968](#); [Neckel et Labs, 1984](#)]; il a été obtenu à partir de mesures au sol et à haute altitude. A partir de 1978, des mesures régulières de l'éclairement solaire spectral ont été initiées grâce au développement d'instruments spatiaux dédiés. Ainsi, quelques spectres de référence ont été élaborés (ATLAS-3, SIRS) [[Thuillier \*et al.\*, 2003](#); [Woods \*et al.\*, 2009](#)]. Par conséquent, il est nécessaire de réaliser un grand nombre de mesures hors atmosphère avec différents instruments spatiaux afin de valider un spectre solaire recommandé par l'Union Astronomique Internationale. L'obtention d'un spectre de référence fiable (lors d'un minimum d'activité solaire) est possible à partir du moment où l'on dispose d'une échelle radiométrique absolue avec une incertitude faible. L'instrument doit rester stable au cours du temps afin de pouvoir mesurer la variabilité spectrale de l'éclairement solaire. Ainsi, il a été nécessaire de développer un instrument adapté aux missions de longue durée avec une couverture spectrale étendue, un étalonnage absolu au sol (échelle radiométrique), et une très bonne stabilité en orbite (minimisation des effets thermiques au niveau des détecteurs, très peu de vieillissement des optiques en orbite, système d'étalonnage fiable en orbite pour suivre le vieillissement, *etc.*). La détermination de l'éclairement solaire spectral et sa variabilité présentent un intérêt majeur et tous les nouveaux résultats obtenus permettent d'alimenter le débat.

Un des enjeux scientifiques est de pouvoir déterminer la variabilité spectrale au cours du temps et avec une bonne précision. Le rôle de la variabilité solaire sur le changement climatique reste un sujet d'intérêt scientifique et sociétal fort. Comme l'indiquent de nombreux jeux de données, une grande partie de la variabilité naturelle de l'atmosphère et du climat est liée à la variabilité solaire. Aujourd'hui, cette contribution du forçage solaire à la variabilité climatique reste encore un sujet de discussions vives et de controverses. Pour pouvoir décomposer l'influence de différents forçages (naturels et anthropiques) sur l'évolution passée et future du climat, il est nécessaire de bien comprendre et de bien caractériser les mécanismes d'action de la variabilité solaire. L'impact du forçage solaire sur le climat de surface, notamment à l'échelle régionale, ne se résume pas à des variations du bilan d'énergie en surface. Les mécanismes sont nettement plus compliqués. L'un des mécanismes importants est le forçage solaire sur l'atmosphère moyenne de la Terre (stratosphère et mésosphère), notamment par l'intermédiaire de la variation de l'ozone. En effet, l'éclairement solaire dans l'ultraviolet est crucial pour la production photochimique d'ozone (autour de 200 nm); il varie au maximum de 10% au

cours d'un cycle solaire de 11 ans, alors que l'éclairement solaire total varie seulement de 0.1%. Les perturbations stratosphériques induites par ces variations solaires peuvent se propager vers le bas et influencer le climat de surface via des effets radiatifs et dynamiques. Il est déjà bien établi que la variabilité solaire dans l'ultraviolet impacte l'ozone dans la moyenne atmosphère à travers des processus photochimiques. Néanmoins, les estimations de la réponse de l'ozone à la variabilité solaire calculées à partir d'observations varient fortement d'une étude à l'autre selon la période considérée, l'origine des données ou la méthodologie d'analyse. Ainsi la mesure de la variabilité de l'éclairement solaire spectral dans le continuum de Herzberg (bande 200–242 nm) est fondamental. En effet, l'éclairement solaire autour de 215 nm peut être choisi comme indicateur quantitatif du forçage solaire sur l'ozone car il représente une variable clé dans la photodissociation de l'oxygène moléculaire, source de l'ozone dans la moyenne atmosphère.

## Plan de la thèse

Le premier chapitre présente le contexte scientifique dans lequel se situe ce travail. Il s'ouvre sur une description générale du Soleil, puis se poursuit par une description des instruments dont les données ont été utilisées tout au long de ce travail.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude du diamètre solaire. La méthode utilisée pour la détermination absolue du diamètre solaire et les résultats obtenus sont présentés. De même, les travaux mis en œuvre pour évaluer les variations du diamètre solaire sont présentés. Ces résultats s'insèrent dans la synergie sol-espace de la mission PICARD.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude de la forme du Soleil. La méthode utilisée pour la détermination absolue de l'aplatissement solaire et les résultats obtenus sont présentés. La deuxième partie de ce chapitre est dédiée à l'étude des variations de l'aplatissement solaire au cours du cycle 24. Ces travaux reposent sur l'utilisation des données des télescopes SODISM (PICARD) et HMI (SDO).

Le quatrième chapitre est dédié à l'étude de la valeur absolue de l'éclairement solaire total et de ses variations au cours de la phase ascendante du cycle 24. Les résultats proposés se basent sur les mesures du radiomètre SOVAP de la mission spatiale PICARD.

Le cinquième chapitre est consacré à l'étude de l'éclairement solaire spectral dans l'ultraviolet. Les résultats obtenus sont présentés ; ils se fondent sur l'utilisation des données du spectromètre SOLSPEC (station spatiale internationale).

Enfin, le dernier chapitre met en évidence les conclusions générales de cette thèse. Les principaux résultats et les nombreuses perspectives ouvertes par ce travail sont présentés.

# Chapitre 1

## Le Soleil

### Sommaire

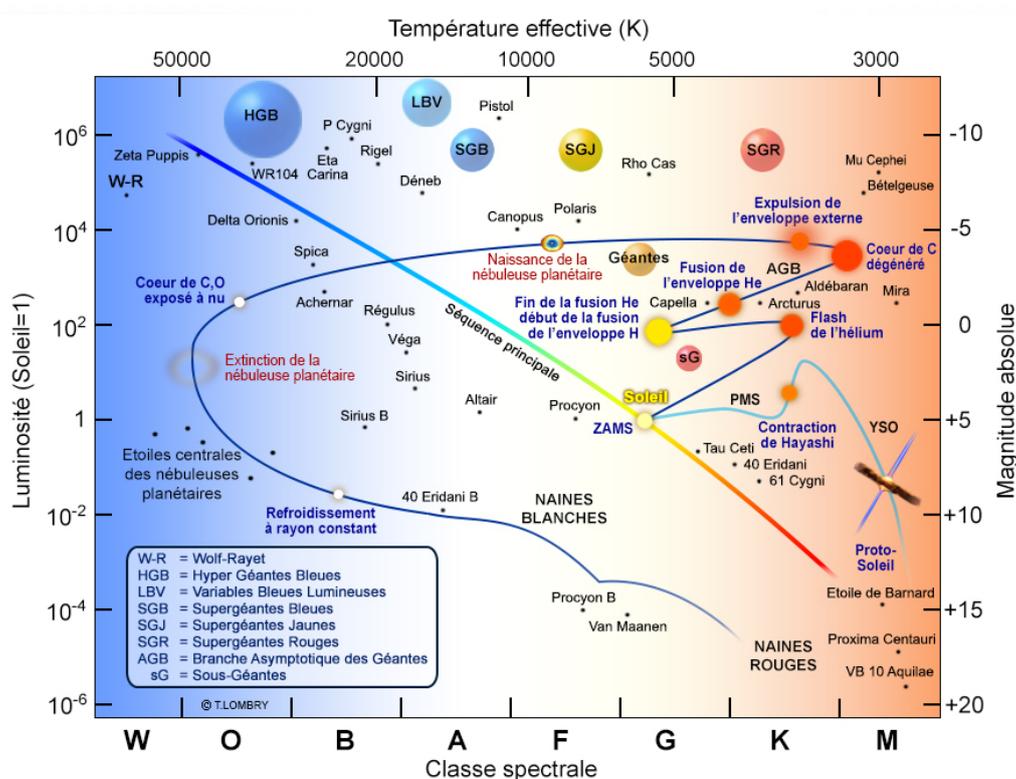
---

<b>1.1</b>	<b>La naissance du Soleil . . . . .</b>	<b>13</b>
<b>1.2</b>	<b>Le Soleil tel que nous le connaissons aujourd’hui . . . . .</b>	<b>15</b>
<b>1.3</b>	<b>Les réactions nucléaires et l’avenir du Soleil . . . . .</b>	<b>17</b>
<b>1.4</b>	<b>La structure interne du Soleil et l’héliosismologie . . . . .</b>	<b>19</b>
<b>1.5</b>	<b>L’atmosphère solaire . . . . .</b>	<b>23</b>
1.5.1	La photosphère . . . . .	24
1.5.2	La chromosphère . . . . .	25
1.5.3	La couronne . . . . .	27
<b>1.6</b>	<b>Les caractéristiques générales du Soleil . . . . .</b>	<b>28</b>
<b>1.7</b>	<b>Les modèles de l’intérieur et de l’atmosphère solaire . . . . .</b>	<b>29</b>
<b>1.8</b>	<b>Le spectre solaire et l’éclairement solaire total et spectral . . . . .</b>	<b>38</b>
<b>1.9</b>	<b>L’activité solaire . . . . .</b>	<b>41</b>
<b>1.10</b>	<b>Les relations Soleil-Terre . . . . .</b>	<b>44</b>
<b>1.11</b>	<b>Les moyens d’observation et les instruments étudiés . . . . .</b>	<b>47</b>
1.11.1	Les moyens d’observation du Soleil . . . . .	47
1.11.2	Les instruments en orbite étudiés . . . . .	49
1.11.3	Les instruments au sol étudiés . . . . .	53

---

*Au quatrième siècle avant Jésus-Christ, le philosophe grec Anaxagore (~ 500 à 428 av. J.-C) avait proposé une théorie selon laquelle le Soleil était une petite boule de feu de environ 60 kilomètres de diamètre qui flottait dans l’air à 6500 kilomètres. Il déclarait qu’il s’agissait d’une masse incandescente plus grande que le Péloponnèse.*

Un des objectifs de ce chapitre est de donner une description des principales caractéristiques de notre astre. Le Soleil [Stix, 2004; Foukal, 2013] est l'étoile la plus proche de la Terre parmi les milliards d'autres qui appartiennent à la Voie lactée. Malgré son rayon de 695 700 kilomètres et sa masse 330 000 fois plus importante que celle de la Terre, le Soleil est une étoile relativement petite. Bételgeuse, par exemple, est une étoile variable semi-régulière de type supergéante rouge dans la constellation d'Orion ; cette étoile a un rayon qui est environ mille fois supérieur à celui du Soleil. Ainsi, bien que le Soleil soit une étoile commune dans notre Galaxie, c'est sa proximité qui fait tout l'intérêt de son étude. Il s'agit d'une machine thermonucléaire extrêmement complexe. Dans la classification des étoiles, le Soleil est une étoile de type G2-V. Il évolue actuellement sur la séquence principale du diagramme de Hertzsprung-Russell (Figure 1.1).



**FIGURE 1.1** Diagramme de Hertzsprung-Russell dans lequel est indiqué la luminosité d'un ensemble d'étoiles en fonction de leur température effective. A partir de ce diagramme, l'étude des populations d'étoiles a été possible et la théorie de l'évolution stellaire a été établie. Crédits : T. Lombry.

Nous étudions le Soleil pour plusieurs raisons :

- 1) Le Soleil comme une étoile,
- 2) Le Soleil comme un laboratoire de physique,
- 3) Les relations entre le Soleil et la Terre,
- 4) La météo de l'espace.

## 1.1 La naissance du Soleil

Le Soleil et le système solaire proviennent d'un immense nuage moléculaire interstellaire froid et dense fait de gaz, d'hydrogène et d'hélium essentiellement, et de grains de poussière.

### Déstabilisation de la nébuleuse primitive

Il y a plus de 5 milliards d'années, un nuage de gaz et de poussières interstellaires (la nébuleuse primitive) en rotation très lente a erré dans la Voie lactée. Le nuage a grossi peu à peu sous l'effet des forces de gravitation. Sous l'impulsion d'une légère perturbation (explosion d'une supernova ou naissance d'une étoile à proximité), le nuage de gaz et de poussières s'est effondré lentement sous son propre poids. Le critère de Jeans ( $M_j$ ) fournit la condition d'effondrement d'un nuage. En prenant comme hypothèse que le nuage d'origine soit principalement constitué d'hydrogène, on peut déterminer la masse minimum ( $M_n$ ) qui conduit à l'effondrement initial (Equation 1.1). Cette équation dépend de la température du nuage ( $T$  en Kelvin), du nombre d'atomes d'hydrogène par mètre cube ( $n_H$ ), et de la masse actuelle du Soleil ( $M_\odot$ ).

$$M_n \geq M_j \simeq 6 \times 10^4 M_\odot \sqrt{\frac{T^3}{n_H}} \quad (1.1)$$

La masse minimum du nuage moléculaire qui conduit à l'effondrement initial est très supérieure à la masse d'une étoile. En effet, la masse typique des petits nuages moléculaires qui donnent naissance aux étoiles de masse comparable à celle du Soleil peut être de l'ordre de quelques milliers de  $M_\odot$ . Ces nuages ont une densité de l'ordre de  $10^8$  molécules de dihydrogène ( $H_2$ ) par mètre cube [Encrenaz, 2003] et une température ne dépassant pas 100 K. Ainsi, la masse du nuage de gaz et de poussières interstellaires dont est issu le Soleil était très grande. De même, il est possible d'estimer le temps caractéristique de chute libre ( $t_{cl}$  en années) qui correspond au temps que va prendre le nuage pour s'effondrer sur lui-même (Equation 1.2). Ainsi, ce processus est de l'ordre de quelques millions d'années.

$$t_{cl} \simeq \frac{3 \times 10^{10}}{\sqrt{n_H}} \quad (1.2)$$

### Fragmentation hiérarchique

Lorsque l'effondrement du nuage s'est amorcé, la densité au niveau du nuage a augmenté. Pendant l'effondrement, la masse de Jeans a diminué et le nuage s'est fragmenté en unités

plus petites. Cette fragmentation s'est poursuivie hiérarchiquement, les unités plus petites se sont fragmentées à leur tour. Au fur et à mesure que le nuage se fragmentait, son opacité et sa densité ont augmenté. Les diverses phases de la fragmentation hiérarchique se réalisent toutes dans le temps caractéristique de chute libre, adapté à la masse et au rayon de l'objet en contraction. A un moment, le milieu est devenu tellement opaque que l'énergie ne pouvait plus s'extraire. La fragmentation hiérarchique a fini par s'arrêter. D'isotherme, la contraction est devenue adiabatique (transition isotherme-adiabatique). Ainsi, les étoiles se forment dans les nuages moléculaires [Blitz, 1993], lorsque ceux-ci s'effondrent et se fragmentent pour former des cœurs denses protostellaires.

### Formation du protosoleil

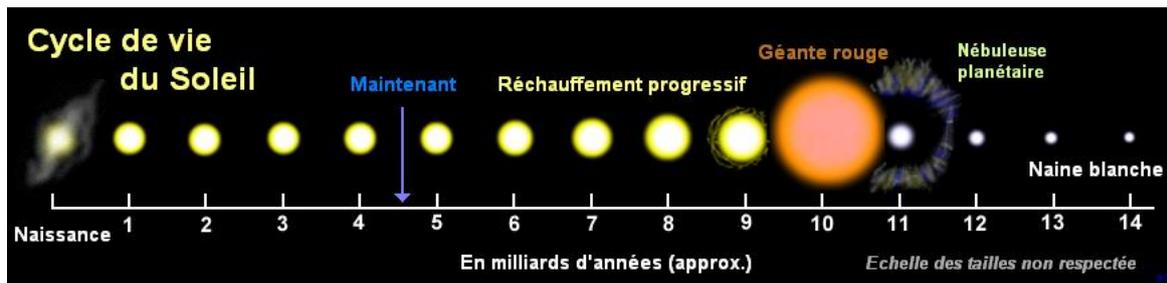
Le protosoleil est une masse instable où règne la convection turbulente. Sa température croît rapidement, et il se met à rayonner dans le spectre visible, avec un éclat qui sera fortement multiplié en quelques dizaines d'années. Lorsque son rayon atteint 60 fois la valeur du rayon solaire actuel ( $R_{\odot}$ ), il devient une étoile jeune de type T-Tauri, 1000 fois plus brillante qu'actuellement. Le protosoleil continue de se contracter rapidement (en 500 ans, son rayon passe de  $60 R_{\odot}$  à  $30 R_{\odot}$ ), avec des phases explosives qui peuvent s'accompagner d'une émission de flux intenses de particules. L'accélération de sa rotation ne peut être freinée que par un renforcement du couplage magnétique au disque nébulaire, auquel il transfère ainsi son énergie rotatoire (perte de moment angulaire). Le nuage de gaz s'est contracté jusqu'à l'obtention d'une température centrale de environ 10 millions de Kelvin (échauffement). La contraction s'achève après 60 millions d'années et s'accompagne d'un jet bipolaire de matière (qui permet la « recontraction »), lorsque la température interne devient suffisante pour amorcer les réactions thermonucléaires dans le noyau solaire (cycle proton-proton et cycle carbone-azote-oxygène). C'est à peu près au même moment que la formation des planètes telluriques. L'existence d'une source d'énergie au cœur du Soleil arrêta l'effondrement.

### Séquence principale

Il y a plus de 4.5 milliards d'années, les réactions thermonucléaires se sont initiées. Notre Soleil venait de naître. Aujourd'hui, le Soleil se trouve en situation d'équilibre hydrostatique sur la Séquence Principale d'Age Zéro (ZAMS au niveau du diagramme H-R). Sa luminosité ( $L_{\odot}$ ) dépend de sa température effective ( $T_{\odot}$ ) et de son rayon (Equation 1.3, loi de Stefan-Boltzmann).

$$L_{\odot} = 4 \pi R_{\odot}^2 \sigma T_{\odot}^4 \tag{1.3}$$

Le Soleil est dans sa phase linéaire, durant laquelle il épuise petit à petit ses réserves d'hydrogène ; sa luminosité augmente d'environ 7% par milliard d'années et son rayon augmente d'environ 3% par milliard d'années [Ribas, 2010]. Il s'agit de variations sur de longues périodes liées à l'augmentation du rythme des réactions de fusion par la lente contraction du cœur. Cet effet a un impact négligeable vis à vis de la variation de la luminosité et du rayon solaire lorsque la période de temps est faible (cycle de Schwabe (de 8 à 13 ans), cycle de Gleissberg (de 80 à 90 ans), cycle de Suess (de 150 à 200 ans)). Le Soleil est aujourd'hui arrivé au milieu de son existence et poursuit son cycle de vie (Figure 1.2). Le Soleil est une étoile âgée d'environ 4.57 milliards d'années.

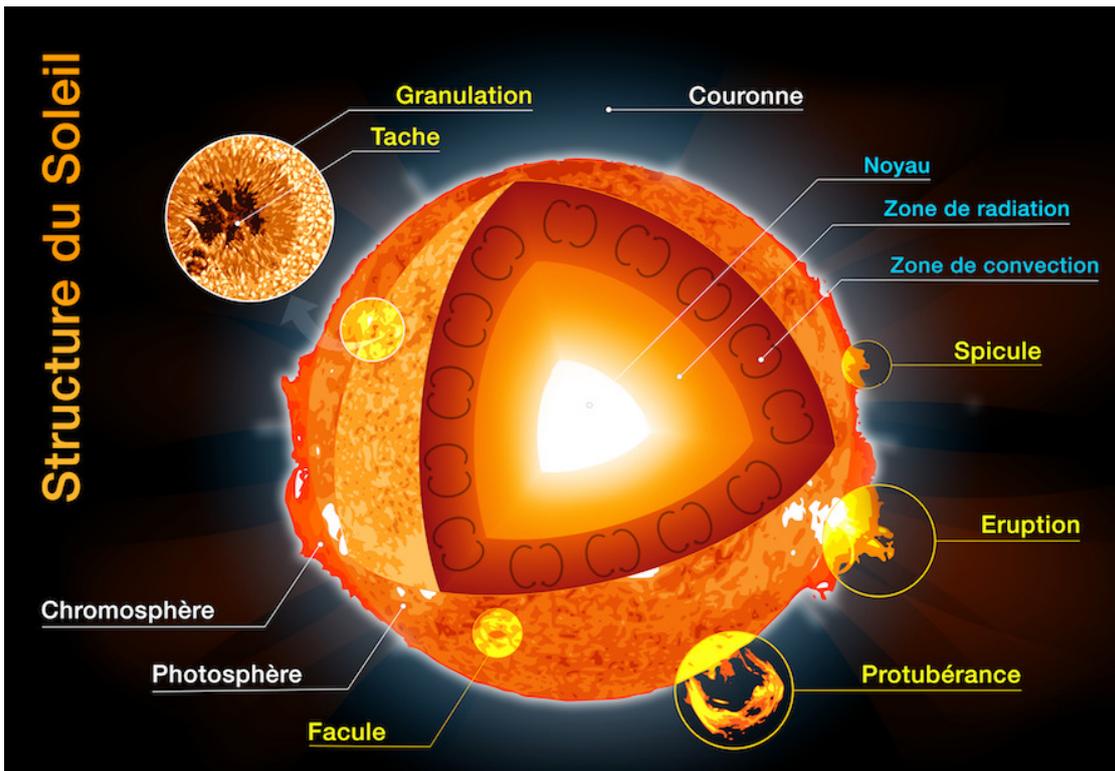


**FIGURE 1.2** Différentes étapes de la vie du Soleil, de sa naissance à sa mort, lorsqu'il ré-injectera sa matière dans l'espace intersidéral. L'âge actuel du Soleil est estimé à 4.57 milliards d'années. Source : Wikipédia.

## 1.2 Le Soleil tel que nous le connaissons aujourd'hui

Le Soleil tel que nous le connaissons, appartient à la séquence principale des étoiles. Il se trouve dans un état d'équilibre hydrostatique (gravitation/pression) et thermique (production d'énergie nucléaire/rayonnement), ne subissant ni contraction, ni dilatation continues. Le fonctionnement d'une étoile consiste à trouver un équilibre entre la gravité qui tend à l'écraser, et la pression développée par les réactions nucléaires internes. Cet équilibre peut être stable sur une très longue période (environ dix milliards d'années). Le Soleil est principalement composé d'éléments légers tels que l'hydrogène (92.1% du volume) et l'hélium (7.8% du volume). Il contient aussi, dans des proportions moindres, de nombreux autres éléments (oxygène, carbone, azote, néon, silicium, magnésium, soufre, *etc.*) [Lang, 2006]. Le Soleil possède une structure interne et une atmosphère (Figure 1.3). Une coupe de la structure du Soleil est représentée sur la Figure 1.4. La structure interne du Soleil est constituée de plusieurs zones (le noyau, la zone de radiation et la zone de convection). Au cœur du Soleil, se trouve le noyau où ont lieu les réactions nucléaires. La zone de radiation (ou zone radiative) s'étend approximativement entre  $\sim 0.25$  et  $\sim 0.7 R_{\odot}$ . La tachocline [Spiegel et Zahn, 1992] est la zone de

séparation entre la zone de radiation et la zone de convection. Elle se situe précisément à  $0.693 R_{\odot}$  [Charbonneau *et al.*, 1999]. Enfin, la zone de convection (ou zone convective) se situe entre  $\sim 0.7$  et  $1 R_{\odot}$ . L'atmosphère du Soleil est constituée de plusieurs régions (la photosphère, la chromosphère, la couronne et l'héliosphère). La chromosphère est séparée de la photosphère par la zone de température minimum et de la couronne par une zone de transition. L'héliosphère s'étend jusqu'aux confins du système solaire ; c'est une zone en forme de bulle allongée dans l'espace, engendrée par les vents solaires.



**FIGURE 1.3** Vue d'artiste de la structure interne du Soleil (le noyau ou cœur nucléaire jusqu'à  $\sim 0.25 R_{\odot}$ , la zone de radiation de  $\sim 0.25$  à  $\sim 0.7 R_{\odot}$ , et la zone de convection de  $\sim 0.7$  à  $1 R_{\odot}$ ) et de son atmosphère (la photosphère d'une épaisseur de  $\sim 500$  km, la chromosphère s'étend de  $\sim 500$  km à  $\sim 2000$  km, et la couronne s'étend jusque dans le milieu interplanétaire). Crédits : M. Meftah.

Le Soleil représente à lui seul 99.86% de la masse du système solaire ainsi constitué, Jupiter représentant plus des deux tiers du reste. Le Soleil est une étoile moyenne parmi les milliards d'autres qui composent notre Galaxie (la Voie lactée). Il est situé sur l'un des bras extérieurs, aux 3/5 du centre de la Galaxie (27 000 années-lumière). Le Soleil accomplit une orbite de la Galaxie en environ 226 millions d'années. Le Soleil se situe à environ 150 millions de kilomètres de la Terre. Cette proximité du Soleil lui donne un rôle tout à fait stratégique pour notre compréhension des mécanismes physiques qui

expliquent l'Univers. De plus, cette proximité permet d'effectuer des observations de grande qualité, caractérisées par :

- Une grande résolution spatiale : on peut étudier séparément le comportement de régions individuelles,
- Une grande résolution temporelle : il est possible d'observer la même région à des intervalles de temps très rapprochés,
- Une grande résolution spectrale : on peut disperser la lumière solaire comme il n'est pas possible de le faire pour les autres étoiles.

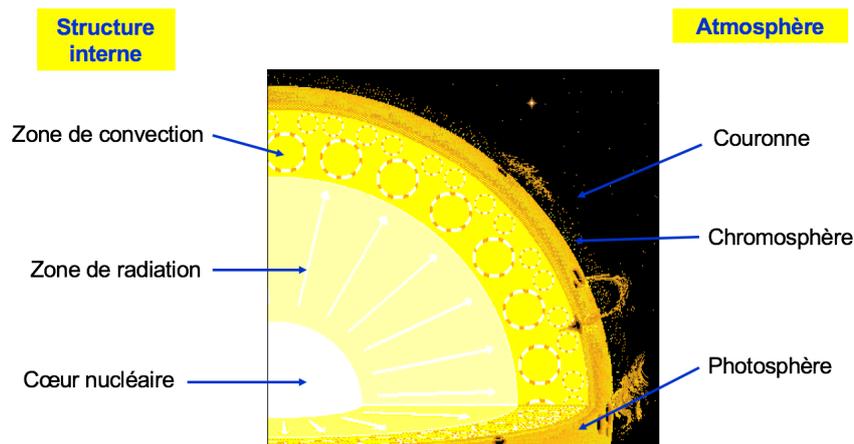


FIGURE 1.4 Structure du Soleil en coupe. Crédits : Université Columbia.

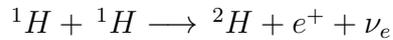
## 1.3 Les réactions nucléaires et l'avenir du Soleil

### Réactions nucléaires solaires

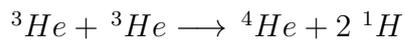
Lorsque la masse d'une étoile est comprise entre  $0.5$  et  $2.2 M_{\odot}$ , les conditions requises de températures et de densité sont suffisantes pour déclencher les réactions thermonucléaires au niveau de son cœur. La transformation d'hydrogène en hélium peut se faire par le biais de deux mécanismes différents. Ils sont répertoriés sous l'appellation de la chaîne proton-proton (chaîne p-p proposée par l'astronome Charles Critchfield) et du cycle carbone-azote-oxygène (cycle CNO découvert indépendamment par Hans Bethe [Bethe, 1939] et Carl Friedrich von Weizsäcker en 1938). Dans le cas du Soleil, les modèles théoriques indiquent que les réactions nucléaires du cycle p-p prédominent et que celles du cycle CNO n'apportent que environ 1.5% de l'énergie libérée. Ainsi, nous allons nous focaliser uniquement sur la chaîne p-p. Les réactions nucléaires débutent par la fusion de deux protons et se terminent par la production d'hélium 4 ( ${}^4\text{He}$ ) (principe

avancé par Jean Perrin dans les années 1920). Il y a trois chaînes de réactions : les chaînes ppI, ppII et ppIII. La température du cœur du Soleil est proche de  $15 \cdot 10^6 \text{ K}$ . Autour de cette température, la réaction ppI est dominante.

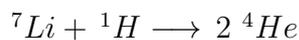
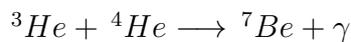
– Réaction du cycle pp :



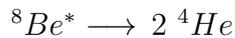
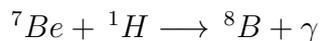
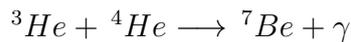
– Réaction ppI ( $\sim 85\%$ ) :



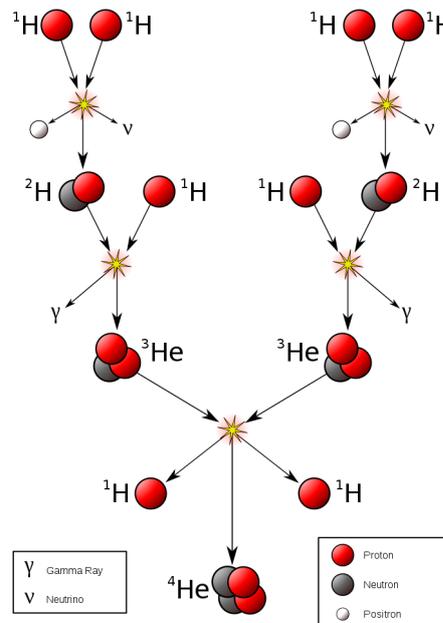
– Réaction ppII ( $\sim 15\%$ ) :



– Réaction ppIII ( $\sim 0.01\%$ ) :



– Total :



L'énergie du Soleil est produite par la conversion nucléaire de l'hydrogène en hélium, comme mentionné ci-dessus. Les quatre protons issus de la réaction ont une masse supérieure à celle du noyau d'hélium produit. Ainsi, il y a une perte de masse proche de  $0.7\%$  par proton fusionné, qui se retrouve dans l'énergie du rayonnement ( $E = \Delta m c^2$ ). De plus, des neutrinos sont produits au cours de la fusion nucléaire (un des rares moyens tout comme l'héliosismologie d'obtenir des observations « in situ » de la structure interne du Soleil). Au vingtième siècle, de nombreuses méthodes de détection des neutrinos ont été inventées (mise en évidence du problème des neutrinos solaires).

### Epuisement des réserves nucléaires et « temps de vie nucléaire »

Lorsque le Soleil sera âgé d'environ 10.4 milliards d'années (Equation 1.4), l'équilibre hydrostatique sera rompu ( $t_n \ll t_{KH}$ ). En effet, Il aura converti tout l'hydrogène de son

cœur en hélium ; seul le centre du Soleil (environ 10% de la masse,  $\eta_{t_n} M_\odot$ ) est assez chaud pour maintenir les réactions de fusion  $\eta_{t_n}$ .

$$t_n \simeq \frac{0.7}{100} \times \frac{\eta_{t_n} M_\odot c^2}{L_\odot} \quad (1.4)$$

Le temps de Kelvin-Helmholtz ( $t_{KH}$ ) représente un autre temps caractéristique ; il a été initialement utilisé pour expliquer la source d'énergie du Soleil. Ainsi, sans réaction nucléaire, le Soleil peut briller au taux actuel par contraction gravitationnelle sur une échelle de temps de l'ordre de 16 millions d'années (Equation 1.5).

$$t_{KH} \simeq \frac{G M_\odot^2}{2 L_\odot R_\odot} \quad (1.5)$$

### Avenir du Soleil

Dans 5 milliards d'années, l'hydrogène au cœur du Soleil aura été entièrement brûlé. Ainsi, le Soleil quittera la séquence principale du diagramme de Hertzsprung-Russell (Figure 1.1). En effet, l'équilibre sera alors rompu, et la force gravitationnelle l'emportera ; le Soleil se contractera, ce qui aura pour effet de chauffer son cœur. Peu à peu, le Soleil se transformera en une étoile géante rouge (Figure 1.2) ; il aura un diamètre 100 fois supérieur à celui d'aujourd'hui. Le Soleil continuera alors de gonfler et expulsera ses couches externes. Cette expulsion donnera naissance à une nébuleuse planétaire (cette masse sera insuffisante pour lui permettre de se contracter à nouveau). Ainsi, le Soleil deviendra alors une naine blanche. Cette naine blanche se refroidira jusqu'à ce qu'elle s'éteigne définitivement et devienne une naine noire (stade ultime).

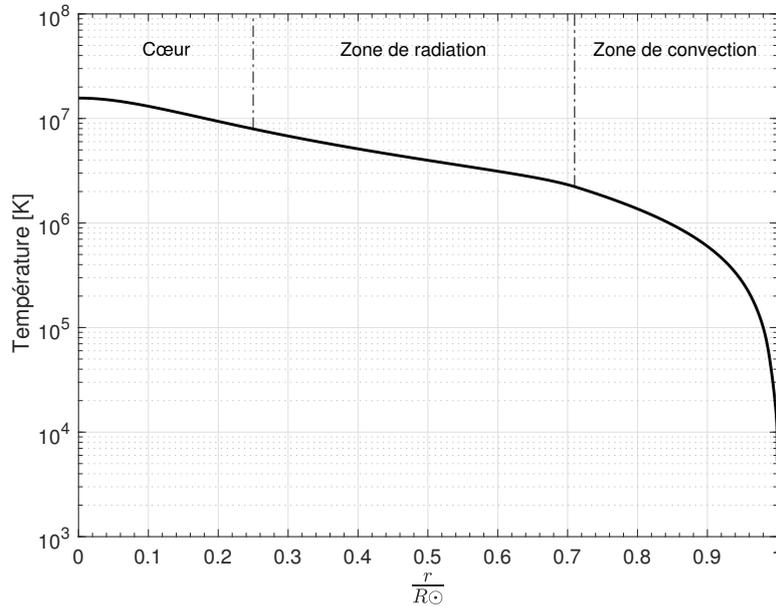
## 1.4 La structure interne du Soleil et l'héliosismologie

### Structure interne

La structure interne du Soleil correspond à la « partie opaque » à l'œil nu qui ne peut être abordée que par le calcul. Des informations expérimentales sont apportées par la sismologie solaire et par la mesure du flux des neutrinos ; elles permettent de consolider les modèles de la structure interne du Soleil. Comme énoncé précédemment, on distingue trois zones au niveau de la structure interne du Soleil (Figure 1.3) : le cœur, la zone de radiation et la zone de convection.

Le cœur du Soleil est la zone dans laquelle se déroulent les réactions nucléaires (Section 1.3) qui fournissent l'énergie grâce à la pression et à la température énorme qui y

règnent. La température au centre est de  $15.7 \cdot 10^6 \text{ K}$ , et elle diminue quand on s'éloigne du centre (Figure 1.5). En son sein, la matière se comporte comme un plasma.



**FIGURE 1.5** Variation de température de l'intérieur solaire en fonction du rayon solaire (modèle de [Christensen-Dalsgaard \*et al.\* \(1996\)](#)).

La zone de radiation englobe le cœur du Soleil. Le cœur et la zone radiative représentent  $\sim 98\%$  de la masse du Soleil. La température de la zone de radiation est comprise entre 2 et 8 millions de Kelvin. L'énergie émise par le cœur est transportée vers la surface par rayonnement, c'est-à-dire sous forme de photons. Cette région est le siège de nombreuses interactions entre les photons et les différents éléments présents. Le rayonnement y est constamment absorbé pour être réémis dans des directions aléatoires. Ainsi, l'énergie produite dans le cœur du Soleil met quelques millions d'années pour traverser la zone radiative. Entre la zone de radiation et la zone de convection (la tachocline), il y a une variation très rapide de la rotation. Le magnétisme solaire est produit au niveau de la tachocline qui joue un rôle important au niveau de la dynamo solaire.

La dernière zone de la structure interne est la zone de convection qui représente  $\sim 2\%$  de la masse du Soleil. Sa température est comprise entre  $2 \cdot 10^6 \text{ K}$  et la température de surface du Soleil. Dans cette zone, le transport d'énergie se fait sous forme de convection comme son nom l'indique. Il s'agit de turbulents mouvements de plasma où des bulles de matière chaude remontent vers la surface et y libèrent leur énergie. La granulation observée au niveau de la photosphère provient de ces mouvements.

## Héliosismologie

La connaissance que l'on a aujourd'hui de la structure interne du Soleil repose sur des observations et pas uniquement sur une modélisation à partir de ce que l'on peut en voir à la surface. Pour cela, il a fallu attendre la fin du vingtième siècle et l'avènement de l'héliosismologie en parallèle avec les mesures des neutrinos issus de son cœur thermonucléaire. L'héliosismologie étudie les oscillations de la surface du Soleil et permet de sonder la structure interne de notre astre. Grâce aux observations des satellites (SoHO et SDO), une vision externe et interne du Soleil est aujourd'hui possible. Le Soleil est la seule étoile à être observée avec une très grande résolution. C'est donc un laboratoire privilégié pour analyser et comprendre les phénomènes physiques qui se déroulent en son sein et dans son environnement afin de mieux comprendre les étoiles. La première contribution de la sismologie a ainsi été la détermination de la stratification interne du Soleil.

L'origine de l'héliosismologie provient des années 1960 où des pulsations extrêmement faibles (période de 5 minutes) émanant du Soleil furent mises en évidence pour la première fois par mesure de vitesse Doppler. Étrangement, ces ondes ressemblaient à des vagues sur la mer. Il a fallu attendre une dizaine d'années pour comprendre qu'il s'agissait en réalité d'ondes acoustiques et l'idée de comparer ce phénomène à la sismologie terrestre est alors apparue. De cette analogie est née l'héliosismologie. Les observations du Soleil se sont alors révélées particulièrement prolifiques grâce à la mise en place de réseaux au sol et à la mise en orbite de SoHO. Comme toutes les autres étoiles, le Soleil est considéré comme une énorme cavité résonante ; à l'instar d'un gigantesque instrument de musique duquel des ondes ou modes propres sortent et se propagent sous l'action d'un mécanisme d'excitation interne. Pour le Soleil, il s'agit essentiellement de phénomènes acoustiques. Ces ondes sont engendrées par des fluctuations de pression induites par la granulation de surface. Ayant un rayon de environ 700000 km, le Soleil « sonne » à une fréquence très basse, autour de 3.33 mHz (5 minutes), soit plusieurs dizaines d'octaves en dessous du seuil accessible à l'oreille humaine.

En héliosismologie, il est nécessaire d'avoir une très longue durée d'enregistrement (plusieurs années) pour extraire des informations au niveau du cœur solaire et suivre le magnétisme de sous surface. Les propriétés des ondes permettent de déterminer la température, la densité, la composition et la rotation interne du Soleil. Deux sortes d'ondes se propagent à l'intérieur du Soleil : les ondes acoustiques induites par la turbulence de surface, que l'on appelle « modes p » ( $>0.5$  mHz), et celles dues à la gravité ou « modes g » ( $<0.5$  mHz), dont la force de rappel est la poussée d'Archimède. Les « modes g » sont confinés à l'intérieur du Soleil en dessous de la zone de convection ; ils proviennent de

l'interface entre la convection et la radiation et sont difficilement observables. La distinction entre les « modes p » et les « modes g » autour de 0.5 mHz n'est pas si tranchée. Des ondes avec des modes intermédiaires se propagent aussi au niveau de la surface du Soleil. Il s'agit des « modes f » qui présentent les mêmes caractéristiques qu'une onde de gravité de surface ; elles se produisent à ou près de la photosphère. L'étude des régions superficielles est aussi liée à l'étude des variations du rayon solaire. On peut ainsi déterminer un diamètre solaire sismique et le relier à un diamètre photosphérique. A partir de l'analyse des « modes f », une étude [Antia *et al.*, 2000] a montré que le rayon du Soleil diminuait avec le cycle solaire (environ 5 kilomètres du minimum au maximum d'activité du cycle 23). Une autre étude a montré que cette diminution était légèrement plus faible [Dziembowski *et al.*, 2001]. Après une analyse minutieuse, Antia (2003) conclut qu'il n'y a aucune évidence de la variation du rayon solaire entre 1996 et 2001. Ainsi, la mesure des variations du rayon solaire représente un défi scientifique.

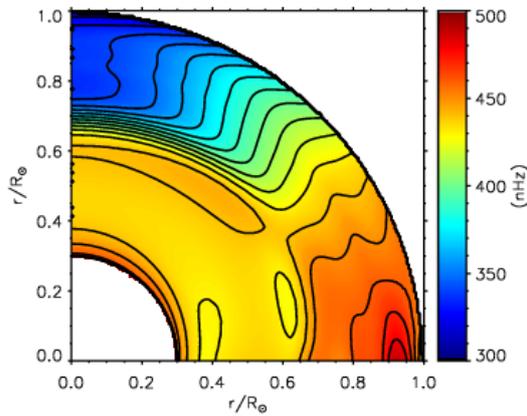


FIGURE 1.6 Profil de rotation solaire obtenu avec l'instrument SODISM de la mission spatiale PICARD. L'aplatissement solaire ( $\Delta_{\odot}$ ) résulte de la rotation de l'ensemble de l'intérieur solaire et de la distribution de sa masse en fonction de la profondeur. La forme du Soleil est obtenu à partir du meilleur ajustement du développement théorique sur la base des polynômes de Legendre du rayon en fonction de la latitude héliographique.

Grâce à l'Observatoire solaire et héliosphérique SoHO, la stratification solaire, qui n'avait été étudiée que théoriquement, a été mise en évidence. Une des caractéristiques ainsi déterminées fut le profil de la vitesse du son en fonction de la profondeur (de l'ordre de 500 km/s au centre très dense, elle tombe à 7 km/s à la surface). Or cette donnée est directement induite du processus de transport de chaleur déterminant dans la délimitation des différentes couches du Soleil. La seconde grande contribution de l'héliosismologie concerne le déficit des neutrinos, particules émises par le Soleil et particulièrement complexes à détecter. Il y a quelques années, les prévisions des modèles théoriques sur le flux de neutrinos, censé être reçus sur terre, étaient toujours trop importantes par rapport aux mesures. L'héliosismologie a permis de les consolider et de les stabiliser, renforçant la connaissance de ces particules qui sont capables de changer de nature au cours de leur voyage. Une troisième contribution de l'héliosismologie fut de révéler la complexité de la dynamique interne du Soleil jusqu'alors très mal connue, et notamment de sa rotation

(Figure 1.6). L'observation de la surface solaire qui tourne plus vite à l'équateur qu'aux pôles se poursuit dans la région convective puis disparaît au profit d'une rotation rigide. Durant de nombreuses années, l'explication de ce phénomène restait un mystère. Il est maintenant de mieux en mieux compris grâce aux simulations à 3 dimensions de la zone convective. L'héliosismologie a aussi permis de voir la rotation plus profonde et d'imaginer que la rotation du cœur est un vestige de sa période de formation, il y a plus de 4 milliards d'années, période où il devait être beaucoup plus actif. Enfin, l'héliosismologie permet de déterminer les moments quadrupolaire  $J_2$  et octopolaire  $J_4$  du Soleil et qui sont associés à sa forme.

Les mesures héliosismiques de ces vingt dernières années ont donc permis des améliorations du modèle solaire et une vérification complète de la structure classique centrale. Aujourd'hui, l'un des gros défis scientifiques se situe dans la compréhension du mécanisme de production du champ magnétique solaire via l'effet dynamo. En fait, il existe une zone de transition au fond de la zone de convection solaire situé entre deux régions dynamiquement très différentes à cause de la densité du milieu et des échanges d'énergie. A cet endroit prend place un cisaillement dû à la disparition de la rotation différentielle. Cette couche est appelée la tachocline et c'est probablement dans cette zone que se joue le mécanisme de production du champ magnétique solaire. Par ailleurs, la dynamo semblerait aussi produite en partie à la surface du Soleil.

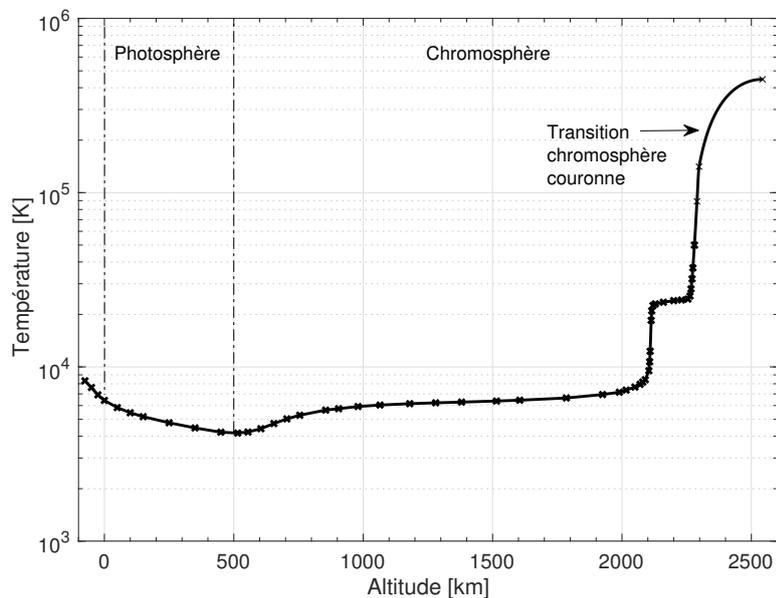
Un autre défi concerne la détection des modes d'oscillations mus par la gravité (« modes g »), qui sont d'une importance capitale pour le sondage du cœur de notre étoile. La détection annoncée par [García \*et al.\* \(2007\)](#) n'a pas complètement convaincu la communauté scientifique. Les travaux de recherche dirigés par Eric Fossat permettront très certainement de répondre à cette question. Aujourd'hui, différentes analyses laissent les modes proposés au rang de candidats « modes g » vu la faiblesse du signal détecté. Une inconnue notoire est l'amplitude attendue de ces « modes g » solaires [[Appourchaux et Pallé, 2013](#)].

## 1.5 L'atmosphère solaire

L'atmosphère solaire correspond à la « partie visible » à l'œil nu. Elle regroupe trois zones observables (Figure 1.3) : la photosphère, la chromosphère et la couronne solaire. Au delà d'une certaine distance, les forces gravitationnelles sont insuffisantes pour contenir la matière qui s'échappe dans l'espace interplanétaire (vent solaire). Ainsi, les vents solaires génèrent l'héliosphère (région sous domination du champ magnétique solaire) qui correspond à une zone en forme de bulle allongée.

### 1.5.1 La photosphère

La photosphère représente la surface visible du Soleil. Sous cette surface, le Soleil devient opaque à la lumière visible. La photosphère contribue pour 99 % au rayonnement solaire. L'analyse du rayonnement au travers du spectre solaire a permis de connaître la composition chimique du Soleil et sa température. Le Soleil rayonne comme un corps noir à 5772 K. Il s'agit de la température effective du Soleil ( $T_{\odot}$ ) qui correspond à celle du fond de la photosphère.  $T_{\odot}$  est proche de la température de surface du Soleil où  $\frac{r}{R_{\odot}} = 1$ . La photosphère a une épaisseur d'environ 500 kilomètres et sa température décroît avec l'altitude de 6400 à 4200 Kelvin (Figure 1.7). A son altitude limite, la température cesse de décroître en raison d'un échauffement dont l'origine n'est pas totalement élucidée. Cette transition définit le début de la chromosphère.



**FIGURE 1.7** Variation de température de l'atmosphère solaire en fonction de l'altitude (modèle C de Vernazza *et al.* (1981) pour un Soleil « calme »).

### Granules

La granulation solaire est visible au niveau de la photosphère. Il s'agit d'une structure de grains brillants ( $\sim 6000 K$ ) cernés par des zones plus sombres et étroites ( $\sim 400 K$  de moins). Ainsi, la photosphère présente une structure en forme de « grain de riz ». Les granules sont des cellules de convection qui amènent et libèrent l'énergie à la surface du Soleil. La taille moyenne d'un granule solaire est de l'ordre de 1000 kilomètres, soit la taille de la France. La durée de vie d'un granule est faible (5 à 10 minutes).

## Taches solaires

Les taches solaires sont des régions sombres et étendues. Elles apparaissent ou disparaissent en groupe. Ce sont des zones localement plus froides et sombres ( $\sim 4200\text{ K}$ ). Elles sont associées par paires à de puissants dipôles magnétiques émergents en surface et contrecarrant la convection. Les taches solaires sont une des caractéristiques de l'activité solaire due à son champ magnétique. Elles permettent aussi de mettre en évidence la rotation différentielle du Soleil. Les taches solaires sont aussi bien connues pour être des dépressions lorsqu'elles apparaissent au niveau du limbe solaire (effet Wilson). La présence de taches solaires au niveau du limbe solaire a un impact vis à vis de la détermination locale du rayon solaire photosphérique (diminution du rayon solaire).

## Assombrissement centre-bord

L'assombrissement centre-bord [Pecker et Schatzman, 1959] correspond à un effet de diminution apparente de l'intensité lumineuse (Figure 1.8). Cet effet est causé par une diminution de la densité (profondeur optique,  $\tau$ ) et de la température avec l'accroissement de la distance au centre. L'assombrissement centre-bord représente une caractéristique fondamentale de la photosphère. Il sera étudié au niveau de la Section 1.7. Une des définitions du diamètre solaire se base sur la position du point d'inflexion de la courbe qui donne l'intensité en fonction de la distance au centre du Soleil.

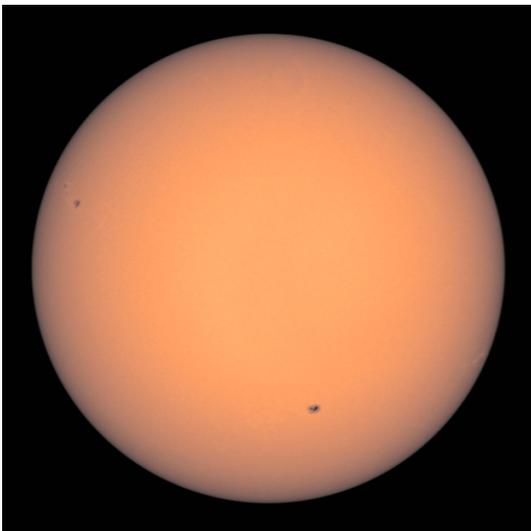


FIGURE 1.8 Image du Soleil obtenue à  $607.1\text{ nm}$  avec l'instrument spatial SODISM (23 septembre 2010) de la mission PICARD. On observe l'effet de diminution apparente de l'intensité lumineuse sur les bords du disque du soleil. Les taches solaires sont des régions qui sont visibles au niveau de la photosphère. Elles apparaissent au début du cycle magnétique à moyennes latitudes.

### 1.5.2 La chromosphère

La chromosphère surplombe la photosphère; il s'agit de la partie basse de l'atmosphère solaire. Sa contribution au rayonnement solaire est très faible. La chromosphère a

une épaisseur d'environ 1500 kilomètres et sa température varie de 4200 à  $\sim 20000$  Kelvin (Figure 1.7). On y observe des structures brillantes telles que les facules (Figure 1.9) ou des filaments (zones plus sombres). La zone de transition entre la chromosphère et la couronne est le siège d'une élévation rapide de température.

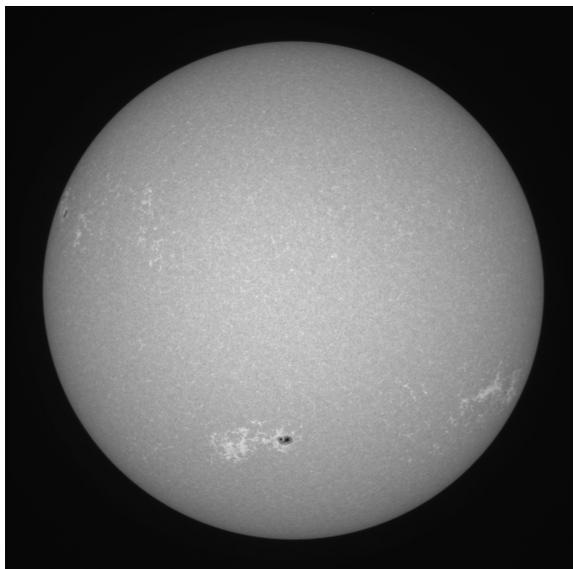


FIGURE 1.9 Image du Soleil obtenue à 393.37 nm (Ca II K) avec l'instrument SODISM (22 septembre 2010). Cette image révèle la contribution chromosphérique du Soleil. La chromosphère a été découverte lors d'éclipses totales de Soleil. Elle a plutôt une couleur rosée qui tient à la nature de son spectre où les raies de la série de Balmer de l'hydrogène dominant. La croissance de la température de la chromosphère avec la distance reste un mystère.

C'est dans la chromosphère que naissent les éruptions solaires (phénomènes violents). La raie  $H\alpha$  est une des raies (Table 1.1) les plus appropriées pour la surveillance des phénomènes solaires depuis leur naissance. Les raies Ca II K (393.37 nm) et Ca II H (850.0 nm) sont les indicateurs les plus sensibles de la structure chromosphérique et des caractéristiques magnétiques du Soleil.

TABLE 1.1 Raies chromosphériques proéminentes [Hanslmeier, 2007].

Raie	Longueur d'onde
Ly- $\alpha$	121.6 nm
Ly- $\beta$	102.6 nm
C I continuum	$\leq 110.0$ nm, $\leq 123.9$ nm
Mg II h	280.3 nm
Mg II k	279.6 nm
Ca II H	396.8 nm
Ca II K	393.4 nm
He I	447.1 nm, 587.6 nm
Ca II IR	849.8 nm, 854.2 nm, 866.2 nm
$H\alpha$	656.3 nm
$H\beta$	486.1 nm

## Facules et filaments

Les facules (ou plages) sont des taches brillantes visibles sur la chromosphère solaire, qui ressortent vivement en clair (Figure 1.9). Lorsque l'activité solaire est importante, elles sont observées en grand nombre au niveau de la surface du Soleil, et le plus souvent au voisinage des taches solaires sombres. Néanmoins, on les observe à des latitudes solaires élevées (voir la Figure 1.9) où parfois il n'y a aucune présence de taches solaires. La température des facules est de l'ordre de 7500 Kelvin. La présence de facules au niveau du limbe solaire a un impact vis à vis de la détermination locale du rayon solaire photosphérique par la méthode du point d'inflexion. On observe ainsi un retrait du point d'inflexion (diminution du rayon solaire) qui a un impact vis à vis de la détermination absolue du diamètre solaire et de l'aplatissement solaire. Ainsi, la détection de leur présence est nécessaire afin de filtrer les régions affectées par leur présence. Quand aux filaments, ils apparaissent comme des régions sombres étirées sur la surface solaire.

## Spicules

Les spicules sont des jets de gaz éphémères de 500 kilomètres de diamètre s'élevant à grande vitesse et se trouvant dans la chromosphère.

### 1.5.3 La couronne

La couronne solaire est la partie supérieure de l'atmosphère. Elle s'étend sur plusieurs dizaines de rayons solaires et se fond dans le milieu interplanétaire. Sa température atteint environ un million de Kelvin. Depuis le sol, elle n'est observable que lors des éclipses totales du Soleil comme pour la chromosphère. En 1930, Bernard Lyot (1897–1952) a mis au point le coronographe (occultation de la photosphère), qui permet d'observer la couronne en dehors des éclipses. La couronne peut présenter des aspects spectaculaires qui mettent en évidence l'activité magnétique du Soleil (protubérances solaires, éruptions solaires (éjections de matières coronales), ou trous coronaux).

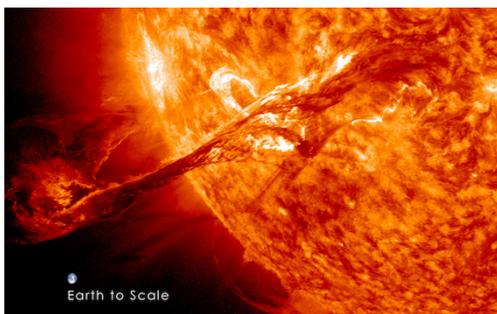


FIGURE 1.10 Ejection de matières coronales. Elles ont lieu quand les champs magnétiques sont suffisamment forts pour vaincre l'attraction gravitationnelle et permettre l'éjection du plasma et du gaz neutre. Image prise en août 2012 à 30.4 nm. Crédits : NASA.

## 1.6 Les caractéristiques générales du Soleil

Les précédentes sections ont souligné l'intérêt de déterminer avec précision les principales caractéristiques physiques du Soleil. La Table 1.2 synthétise les caractéristiques générales du Soleil.

**TABLE 1.2** Caractéristiques générales du Soleil.

<sup>a</sup> Valeur recommandée par l'Union Astronomique Internationale lors de la XXVIII<sup>ème</sup> Assemblée Générale (2012).

<sup>b</sup> Valeur recommandée par l'Union Astronomique Internationale lors de la XXIX<sup>ème</sup> Assemblée Générale (2015).

Paramètre	Symbole	Valeur
Unité astronomique de longueur <sup>a</sup>	$ua$	149 597 870.7 $km$
Magnitude apparente <sup>b</sup>	$m_{Bol\odot}$	-26.832
Magnitude absolue <sup>b</sup>	$M_{Bol\odot}$	4.74
Type spectral	-	G2 - V
Distance du centre de la Voie lactée	-	$\sim 8700 pc$
Période galactique	-	$2.26 \cdot 10^8$ années
Vitesse	-	$217 km s^{-1}$
Rayon solaire nominal <sup>b</sup>	$R_{\odot}^N$	695 700 $km$
Aplatissement solaire	$\Delta_{\odot}$	$9 \cdot 10^{-6}$
Eclairement solaire total nominal <sup>b</sup>	$S_{\odot}^N$	$1\,361 W m^{-2}$
Luminosité radiative solaire moyenne nominale <sup>b</sup>	$L_{\odot}^N$	$3.828 \cdot 10^{26} W$
Température effective nominale <sup>b</sup>	$T_{eff\odot}^N$	5 772 $K$
Masse volumique moyenne	$\bar{\rho}$	$1\,408 kg m^{-3}$
Masse volumique au centre	-	$150\,000 kg m^{-3}$
Gravité à la surface	$g_{\odot}$	$273.95 m s^{-2}$
Masse du Soleil <sup>b</sup>	$M_{\odot}^N$	$1.98847 \cdot 10^{30} kg$
Inclinaison de l'axe par rapport à l'écliptique	$B_0$	$\pm 7.23^{\circ}$
Angle entre l'axe nord-sud solaire et terrestre	$P$	$\pm 26.3^{\circ}$
Inclinaison par rapport au plan de la Galaxie	-	$67.23^{\circ}$
Période de rotation moyenne	$\bar{\Omega}$	27, 28 $jours$

Les principaux paramètres du Soleil ( $R_{\odot}$ ,  $M_{\odot}$ ,  $T_{\odot}$  et  $L_{\odot}$ ) sont des entrées fondamentales pour les modèles de physique solaire (intérieur et atmosphère solaire). De même, ils sont utilisés dans le calcul des paramètres stellaires. Ainsi, il est nécessaire de les déterminer de la manière la plus précise afin de normaliser ces quantités [Harmanec et Prša, 2011]. En effet, ces valeurs deviennent de plus en plus précises au cours du temps grâce aux avancées technologiques. Un des objectifs de cette thèse est de déterminer la valeur absolue du rayon solaire ( $R_{\odot}$ ) et de l'éclairement solaire total ( $TSI$ ). A partir

de la mesure de ces valeurs, nous pouvons alors en déduire les valeurs de la luminosité (Equation 1.6) et de la température effective du Soleil (Equation 1.7). La masse du Soleil ( $M_{\odot}$ ) est déterminée à partir de la valeur de la constante de Gravitation et de la distance Terre-soleil (troisième loi de Kepler). Un autre aspect abordé au niveau de cette thèse concerne la variabilité de ces paramètres au cours du temps.

$$L_{\odot} = TSI \times 4\pi \times (1 \text{ ua})^2 \quad (1.6)$$

$$T_{\odot} = \left( \frac{L_{\odot}}{4\pi R_{\odot}^2 \sigma} \right)^{0.25} \quad (1.7)$$

## 1.7 Les modèles de l'intérieur et de l'atmosphère solaire

### Modèles de l'intérieur solaire

Comme mentionné précédemment, la compréhension de l'intérieur solaire nécessite la mise en œuvre de modèles numériques. Il est nécessaire de simuler l'évolution spatiale et temporelle du Soleil en 3-D en tenant compte de la majeure partie des phénomènes existants (rotation, magnétisme, évolution du rayon solaire, *etc.*). Des modèles simples permettent de reproduire le fonctionnement de l'intérieur solaire en négligeant certains effets. Un modèle 1-D avec une représentation purement radiale repose sur quatre équations différentielles du premier ordre [Stix, 2004] : la conservation de la masse (Equation 1.8), l'équilibre hydrostatique (Equation 1.9), la production d'énergie (Equation 1.10), et le transport de l'énergie (Equation 1.11). Ce modèle est associé à quatre lois de comportement : la pression ( $P = P(\rho, T, \mu)$ ), la production d'énergie ( $\epsilon = \epsilon(\rho, T, \mu)$ ), l'entropie ( $S = S(\rho, T, \mu)$ ) et les opacités ( $\kappa = \kappa(\rho, T, \mu)$ ).

$$\frac{\partial r}{\partial m(r)} = \frac{1}{4\pi \rho(r) r^2} \quad (1.8)$$

$$\frac{\partial P(r)}{\partial m(r)} = -\frac{G m(r)}{4\pi r^4} \quad (1.9)$$

$$\frac{\partial L(r)}{\partial m(r)} = \epsilon(r) - T(r) \times \frac{\partial S(r)}{\partial t} \quad (1.10)$$

$$\frac{\partial T(r)}{\partial m(r)} = -\frac{G m(r)}{4\pi r^4} \times \frac{T(r)}{P(r)} \times \frac{\partial \ln T(r)}{\partial \ln P(r)} \rightarrow -\frac{3\kappa(r) L(r)}{256\pi^2 \sigma r^4 T(r)^3} \quad (1.11)$$

De nombreux codes de simulation de l'intérieur solaire prennent en considération un grand nombre d'effets (code 1-D tel que STAREVOL ou CESAM, code 2-D tel que le code YALE-2D, ou code 3-D simulant la dynamique hydro et hydro magnétique de l'intérieur solaire tel que ASH). Actuellement, les modèles de l'intérieur solaire ne prennent pas en considération les variations mêmes faibles des principaux paramètres solaires. Des mesures de la variation du rayon solaire et de l'aplatissement solaire peuvent enrichir les modèles et permettre d'obtenir une meilleure compréhension de la dynamo. En effet, la distorsion temporelle de l'enveloppe solaire est liée au processus de dynamo solaire. Cependant, il est peu probable que les modèles magnétohydrodynamiques actuels puissent tirer profit des subtilités de la mesure du rayon solaire pour de très faibles variations. Pour la relativité/gravitation c'est au contraire pertinent.

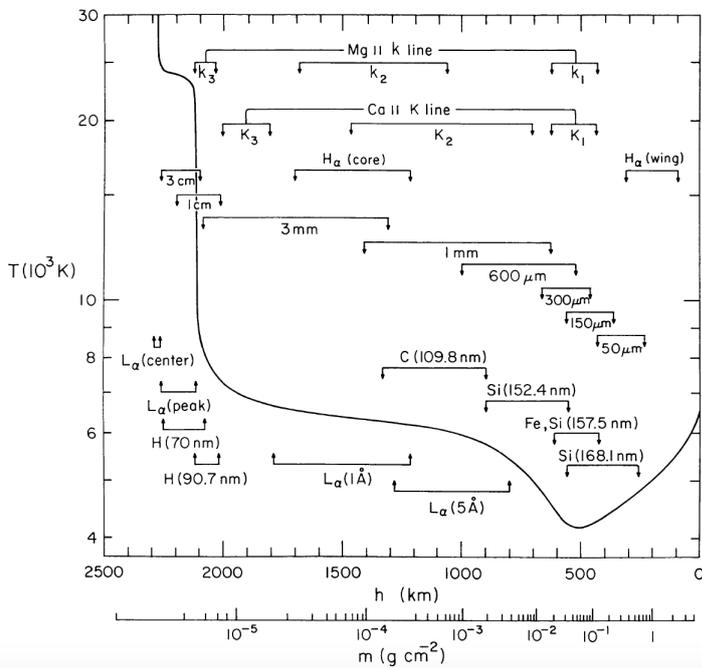


FIGURE 1.11 Evolution de la température de l'atmosphère solaire en fonction de l'altitude [Vernazza *et al.*, 1981]. Les régions de formation des différentes raies (photosphère et chromosphère) sont indiquées (hypothèse de l'équilibre hydrostatique).

### Modèles de l'atmosphère solaire

A la fin des années 1970, une revue des modèles de l'atmosphère solaire a été faite par Avrett (1977). Depuis, d'autres modèles ont été développés. Il y a des modèles théoriques et des modèles de type semi-empirique. Les modèles théoriques représentent mal la remontée en température au niveau de la chromosphère. Ainsi, les modèles semi-empiriques représentent un intérêt fondamental. HSRA est un des modèles classiques de l'atmosphère solaire. Il a été développé par Gingerich *et al.* (1971). Il représente la basse chromosphère en utilisant notamment des observations en ultra-violet extrême. En utilisant un modèle d'atome d'hydrogène plus complexe et en étendant les méthodes

de transfert hors de l'équilibre thermodynamique local à d'autres éléments abondants dans l'atmosphère solaire, [Vernazza \*et al.\* \(1976\)](#) ont développé un autre modèle 1-D. Le modèle de [Vernazza \*et al.\*](#) (modèle hydrostatique, homogène et stratifié) s'étend de la photosphère à la zone de transition chromosphère-couronne.

Les modèles semi-empiriques sont basés sur un ensemble d'équations dépendant de l'équilibre hydrostatique, de l'équilibre d'ionisation des éléments les plus abondants, de l'équilibre statistique des populations des niveaux (l'hydrogène et les autres atomes), et le transfert de rayonnement dans les transitions étudiées. Le modèle de température et les diverses caractéristiques spectrales sont représentés au niveau de la Figure 1.11. Les paramètres atmosphériques d'un Soleil calme (modèle C, [[Vernazza \*et al.\*, 1981](#)]) sont fournis au niveau de l'Annexe A. Cependant, ce modèle n'est pas adapté à toutes les problématiques. Notamment, il ne tient pas compte des spicules.

### Modèles et observations de l'assombrissement centre bord

Arthur Eddington (1882–1944) a donné une approximation de l'assombrissement centre bord (Equation 1.12) où  $\mu = \cos(\theta)$ . L'approximation d'Eddington se base sur un modèle solaire constitué d'une atmosphère grise (coefficient d'absorption indépendant de la fréquence qui dépend elle-même de la longueur d'onde). Au centre, le disque solaire est plus brillant qu'au voisinage du bord solaire. Le rayonnement observé est la somme de toutes les émissions le long d'une ligne de visée jusqu'au point où la profondeur optique ( $\tau$ ) vaut 1 au niveau de la surface du Soleil. La profondeur optique est définie le long de la direction de la normale au plan. L'épaisseur optique d'une couche mesure le degré de transparence du milieu. Elle est définie par la fraction de rayonnement absorbée par les composants de la couche traversée.

Avec l'approximation d'Eddington, la variation de l'intensité varie de 1 au centre du disque solaire à 0.4 au niveau du bord. Au voisinage du centre du disque solaire (épaisseur optique proche de 1), l'approximation d'Eddington est représentative. Au niveau du bord solaire (épaisseur optique proche de 0), le modèle défini au niveau de l'Equation 1.12 n'est plus représentatif. Le problème est similaire pour les travaux menés par [Unsöld \(1968\)](#). Les observations de l'assombrissement centre bord sont nécessaires afin de mettre en œuvre des modèles représentatifs.

$$\frac{I_0(\mu)}{I_0(1)} = \frac{2 + 3\mu}{5} \quad (1.12)$$

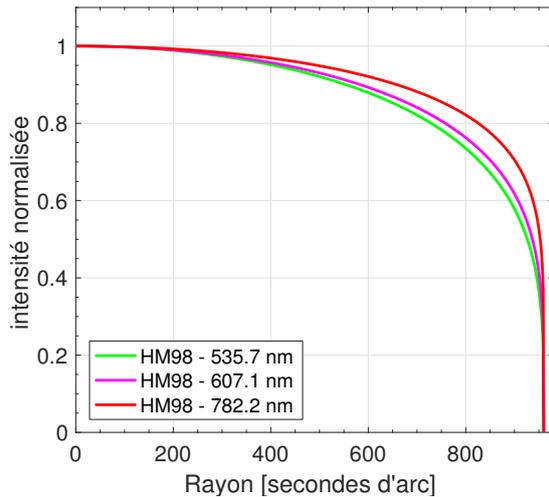
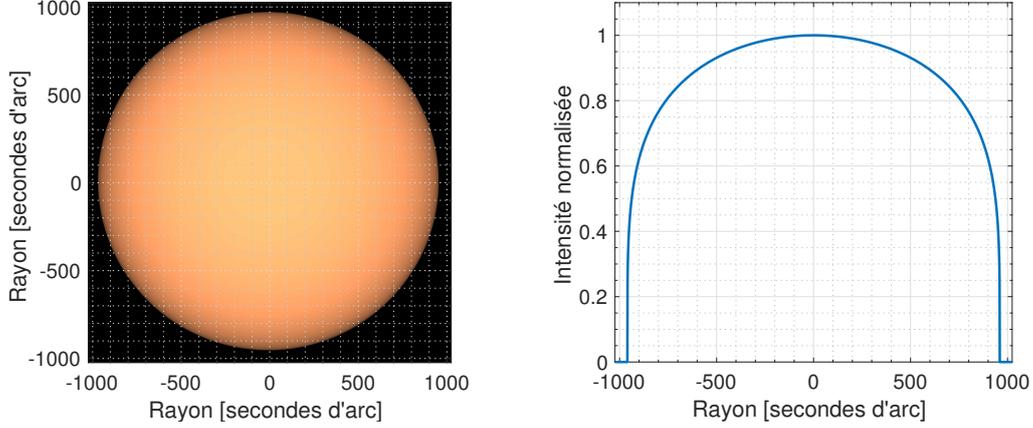


FIGURE 1.12 Dépendance en longueur d'onde de l'assombrissement centre bord (535.7, 607.1 et 782.2 nm). Profils obtenus avec le modèle de [Hestroffer et Magnan](#) (HM98). Le modèle HM98 s'écrit sous la forme suivante :  
 $I(\mu) = 1 - u(1 - \mu^\alpha)$  avec :  
 $\mu = \cos(\theta) = \sqrt{1 - r^2}$  et  $u = 1$ .  
Ainsi  $I(\mu) = (1 - r^2)^{\alpha/2}$   
avec  $0 \leq r \leq 0.9$  et où le paramètre  $\alpha$  dépend de la longueur d'onde [[Hestroffer et Magnan, 1998](#)].

Avant les années 1970, très peu d'observations de l'assombrissement entre le centre et le bord du disque solaire ont été réalisées. Les premières méthodes d'observation consistaient à comparer entre eux les spectres de divers points du bord solaire qui étaient photographiés à intervalles de temps très rapprochés, avec le même temps de pose et sur la même plaque photographique [[Canavaggia et Chalonge, 1946](#)]. A partir des années 1970, les mesures de l'assombrissement centre bord sont devenues plus précises. On peut distinguer la précision absolue qui relève de la radiométrie, et la précision relative (courant d'obscurité, correction de champ plat ou « flat-field »), qui ont des impacts différents sur l'étude de l'assombrissement centre bord. A partir des mesures expérimentales et des corrections apportées, des modèles empiriques ont été développés. Le modèle empirique mis en œuvre par [Allen \(1973\)](#) est un des plus anciens modèles de l'assombrissement centre bord. Depuis, plusieurs modèles empiriques ont été développés tels que le modèle de [Pierce et Slaughter \(1977\)](#), le modèle de [Pierce \*et al.\* \(1977\)](#), le modèle de [Mitchell \(1981\)](#), le modèle de [Neckel et Labs \(1994\)](#), le modèle de [Hestroffer et Magnan \(1998\)](#), le modèle de [Neckel \(2005\)](#), *etc.* Tous ces modèles mettent en évidence la dépendance de l'assombrissement solaire avec la longueur d'onde (Figure 1.12). Mais la principale difficulté est liée à l'observation de l'assombrissement solaire entre  $0.9$  et  $1 \times R_\odot$ . En effet, l'extrême bord solaire (limbe solaire) est difficile à mesurer. La représentativité des modèles empiriques n'est donc pas satisfaisante au niveau du limbe solaire (aucun point d'inflexion au niveau du limbe solaire (Figure 1.13)). De manière générale, la définition du diamètre solaire se base sur la position du point d'inflexion de la courbe d'assombrissement centre bord. Malgré tout, on peut s'interroger sur cette définition communément admise. Est-elle bien adaptée à tous les problèmes? Sur le plan numérique une telle définition est loin d'être idéale. D'autres méthodes auraient pu être étudiées en détail dans le cadre de cette thèse. La détermination du diamètre solaire peut être basée sur une approche paramétrique (à partir des modèles physiques

de limbes solaires, en utilisant la transformée de Hough, *etc.*) ou sur une approche non-paramétrique (détermination du bord solaire par niveau d'intensité, méthode multi-scalaire en utilisant les ondelettes, *etc.*). Quelle que soit la méthode de détermination du diamètre solaire utilisée, les modèles théoriques de l'assombrissement centre bord en fonction de la longueur d'onde sont nécessaires.



**FIGURE 1.13** (Gauche) Image de synthèse du Soleil obtenue avec le modèle HM98 (607.1 nm). (Droite) Coupe horizontale de l'image de synthèse et mise en évidence de l'assombrissement centre-bord à 607.1 nm (photosphère). Aucun point d'inflexion n'est présent au niveau de cette courbe.

**TABLE 1.3** Différence entre les positions du point d'inflexion à 607.1 et à 535.7 nm ( $\Delta\text{IPP}_1 = R_{\odot}(607.1 \text{ nm}) - R_{\odot}(535.7 \text{ nm})$ ) en fonction de différents modèles solaires. Différence entre les positions du point d'inflexion à 782.2 et à 535.7 nm ( $\Delta\text{IPP}_2 = R_{\odot}(782.2 \text{ nm}) - R_{\odot}(535.7 \text{ nm})$ ) [Meftah *et al.*, 2014a]. Les valeurs sont exprimées en millièmes de seconde d'arc (mas) – voir le Glossaire au niveau de la Section D.

Modèle	$\Delta\text{IPP}_1$	$\Delta\text{IPP}_2$
VAL81	11.9 mas	30.2 mas
FCH09	13.6 mas	32.8 mas
COSI	10.0 mas	28.0 mas
SH09	9.4 mas	21.2 mas
Mein	11.9 mas	30.2 mas
Modèle 3-D	13.5 mas	25.0 mas

Plusieurs modèles théoriques ont été développés : le modèle de Vernazza *et al.* (1981) (VAL81), le modèle de Fontenla *et al.* (2009) (FCH09), le modèle COSI [Haberreiter *et al.*, 2008; Shapiro *et al.*, 2010], le modèle de Short et Hauschildt (2009) (SH09), le modèle de limbe solaire de Mein (2015). Des modèles hydrodynamiques et magnéto-

hydrodynamiques en 3-D ont aussi été développés [Piau *et al.*, 2011]. Ces modèles fournissent une meilleure définition du limbe solaire. A partir de ces modèles, il est possible de déterminer la position du point d'inflexion. La Table 1.3 résume les résultats obtenus à partir des différents modèles théoriques. Les écarts obtenus entre les positions du point d'inflexion à partir des différents modèles de limbes solaires sont faibles (valeurs inférieures à 5 mas). Ces modèles mettent aussi en évidence la dépendance du rayon solaire avec la longueur d'onde (inférieure à 35 mas entre 535.7 et 782.2 nm). Les différents modèles théoriques du limbe solaire fournissent des résultats similaires. Par ailleurs, les modèles 3-D semblent être les plus précis.

Les modèles théoriques (VAL81, FCH09, COSI, SH09, Modèle 3-D) sont décrits en détail dans la littérature. L'objectif de ce paragraphe est de décrire succinctement le modèle de Mein (2015) dans le cas d'un Soleil calme. L'intensité du limbe solaire du modèle de Mein ( $I(h)$ ) est donnée au niveau de l'Equation 1.13.

$$I(h) = \sum_k \left[ \frac{s(k) + s(k+1)}{2} \exp \left( -\tau(k) \frac{ks(k) + ks(k+1)}{2} \right) \Delta h \right] \quad (1.13)$$

$$\tau = \sum_k \left[ \frac{ks(k) + ks(k+1)}{2} \Delta h \right] \quad (1.14)$$

où  $k$  est un indice qui reflète la hauteur,  $s(k)$  et  $s(k+1)$  sont associés à la loi de Planck ( $B_\lambda(T)$ ) pour les couches de l'atmosphère solaire considérées ( $k$  et  $k+1$ ),  $\tau$  correspond à la profondeur optique,  $ks$  est le coefficient d'absorption, et  $h$  représente l'altitude de l'atmosphère solaire. Le modèle d'atmosphère solaire utilisé est celui de Vernazza *et al.* (1981) avec les données de l'Annexe A (modèle C, Soleil calme). Les coefficients d'absorption (ion  $H^-$ ) utilisés sont ceux déterminés par Allard et Hauschildt (1995). Il y a une absorption de la lumière due à l'ion négatif hydrogène  $H^-$  (diffusion, absorption « free-free » et absorption « bound-free Paschen »). L'intensité au centre du disque solaire peut être déterminée avec l'Equation 1.15 (hypothèse d'un équilibre thermodynamique local). L'intensité au centre du disque solaire est approximée par la loi du corps noir (Equation 1.16). Dès lors, ce modèle n'est valable que dans une partie du spectre solaire visible. L'Equation 1.15 dépend de deux paramètres connus (consulter l'Annexe A pour les valeurs utilisées) : la température ( $T$ ) et la profondeur optique ( $\tau_\lambda$ ).

$$I_\lambda(0, 1) = \int_0^\infty B_\lambda(T) \exp(-\tau_\lambda) d\tau_\lambda \quad (1.15)$$

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} \quad (1.16)$$

### Impact de la fonction d'étalement du point (point spread function ou psf)

Après avoir étudié l'impact des différents modèles de limbes solaires sur la position du point d'inflexion à une longueur d'onde donnée (méthode utilisée pour la détermination du rayon solaire), il convient d'analyser l'impact des aspects instrumentaux sur la détermination du rayon solaire à une longueur d'onde donnée. D'un point de vue instrumental, la fonction d'étalement du point (psf) est un paramètre fondamental dans l'évaluation de tout système d'imagerie optique. Il s'agit d'un paramètre critique intervenant dans la détermination précise du diamètre solaire qui sera obtenue avec le télescope de la mission PICARD (Section 1.11). Une modification de la psf du télescope au cours du temps provoquera une variation de la mesure du diamètre solaire. La réponse optique [Conan, 2000] d'un télescope de type Ritchey-Chrétien (occultation centrale) peut être obtenue à partir de la relation suivante :

$$\text{psf}(r) = \left[ \frac{2 J_1 \left( \frac{\pi D_t r}{\lambda} \right)}{\frac{\pi D_t r}{\lambda}} \right]^2 \quad (1.17)$$

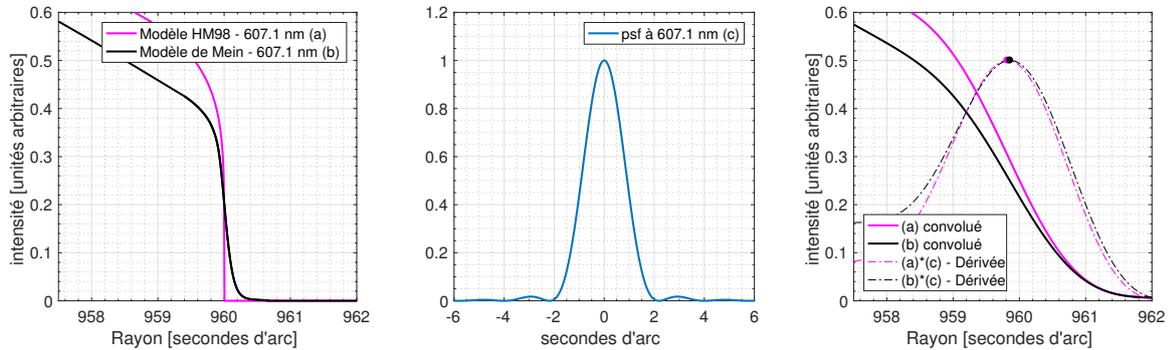
où  $J_1$  est la fonction de Bessel de premier ordre,  $D_t$  représente le diamètre de la pupille du télescope,  $r$  est une variable angulaire (radians), et  $\lambda$  est la longueur d'onde d'observation. Au premier ordre, le diamètre de l'image dans le plan focal du télescope ( $d_t$ ) est donné par la relation suivante :  $d_t = 2 f_t R_{\odot} / 1 \text{ ua}$  où  $f_t$  est la focale du télescope.

Le limbe solaire vu par un télescope ( $LDF_t(\lambda)$ ) est obtenu en faisant le produit de convolution de la forme du limbe solaire ( $LDF_{\odot}(\lambda)$ ) avec la réponse du télescope.

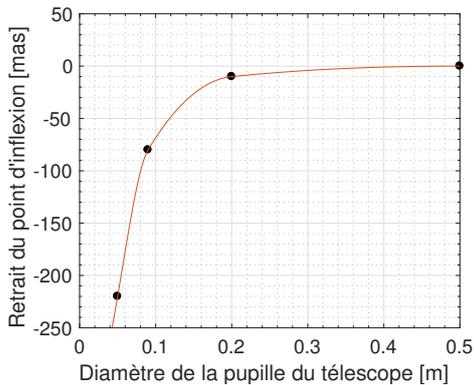
$$LDF_t(r) = LDF_{\odot} \otimes \text{psf}(r) \quad (1.18)$$

Par conséquent, le rayon solaire obtenu à partir de la mesure d'un télescope dépend de la fonction instrumentale. **Le rayon solaire obtenu par la mesure sera toujours inférieur à la « vraie valeur » (impact de la fonction instrumentale).** Ce phénomène conduit à un retrait du point d'inflexion (Figure 1.14). Lorsque la pupille d'entrée d'un télescope est de 90 mm (télescope SODISM de la mission PICARD), les différents modèles de limbes solaires (empiriques et théoriques) aboutissent à un retrait du point d'inflexion quasi-identique (environ 80 mas à 607.1 nm). La largeur à mi-hauteur de la dérivée première (FWHM) à 607.1 nm est proche de 1.6 secondes d'arc pour les deux modèles utilisés (Figure 1.14). Quel que soit le profil de limbe solaire utilisé (empirique ou théorique, avec ou sans point d'inflexion), les résultats seront quasiment identiques. En effet, le rayon de la tache d'Airy, qui est de l'ordre de  $1.22\lambda/D_t$ , définit la limite de résolution de notre système (diffraction). D'où l'intérêt d'utiliser des télescopes

avec des pupilles de grand diamètre (Figure 1.15) afin d’avoir une meilleure résolution du limbe solaire observé. Lorsqu’un télescope a une pupille d’entrée supérieure à 0.2 mètre, le retrait du point d’inflexion à 607.1 nm est inférieur à une dizaine de mas.



**FIGURE 1.14** (Gauche) Forme du limbe solaire à 607.1 nm selon le modèle HM98 (modèle empirique). Forme du limbe solaire à 607.1 nm selon le modèle de Mein (modèle théorique). (Centre) Réponse impulsionnelle du télescope ( $D_t=0.09$  m et  $\lambda=607.1$  nm). (Droite) Formes de limbes du Soleil à 607.1 nm issues du produit de convolution (HM98 et Mein). Dérivées premières des formes de limbes solaires et localisation des points d’inflexion.



**FIGURE 1.15** Position du point d’inflexion en fonction du diamètre de la pupille du télescope (utilisation du modèle HM98 à 607.1 nm). Plus le diamètre de la pupille d’entrée du télescope est important, plus le rayon de la tache de diffraction est petit et plus la résolution est importante.

### Impact des conditions d’observation sur la position du point d’inflexion

Vernazza *et al.* (1981) ont élaboré plusieurs modèles de l’atmosphère solaire pour différentes conditions d’observation. Le modèle C correspond à un Soleil calme (référence associée au modèle canonique de l’atmosphère solaire). D’autres modèles existent : le modèle A (« a dark point within a cell »), le modèle B (« the average cell center »), le modèle D (« the average network »), le modèle E (« a bright network element ») et le modèle F (« a very bright network element »). Différentes conditions d’observation sont représentées au niveau de la Figure 1.16 (tache avec pénombre (R), tache avec ombre (S), facule (P) et plage (H)). Pour étudier l’impact des conditions d’observation sur

la position du point d'inflexion, le modèle de Mein a été utilisé. Les résultats obtenus (Table 1.4) montrent l'influence des conditions d'observation sur la mesure.

**TABLE 1.4** Impact des conditions d'observation sur la position du point d'inflexion pour trois longueurs d'onde (535.7, 607.1 et 782.2 nm) par rapport à un Soleil calme (modèle C de Vernazza *et al.* (1981) avec les coefficients d'absorption déterminés par Allard et Hauschildt (1995)).

Modèle	$\lambda=535.7$ nm	$\lambda=607.1$ nm	$\lambda=782.2$ nm
A - C	-8.4 mas	-6.8 mas	-2.6 mas
B - C	-6.3 mas	-1.0 mas	6.5 mas
D - C	4.2 mas	4.9 mas	5.7 mas
E - C	4.4 mas	4.4 mas	3.3 mas
F - C	10.8 mas	13.7 mas	15.6 mas

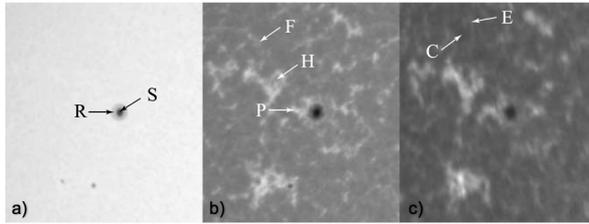


FIGURE 1.16 Images avec différentes conditions d'observation [Fontenla *et al.*, 2006] :

- a) 607.1 nm (PSPT),
- b) Ca II (PSPT),
- c) Ca II K3 (Meudon).

Les biais que peuvent introduire les différentes structures solaires (modèles de l'atmosphère solaire A, B, D, E et F) dans la détermination précise du rayon solaire fournissent des informations précieuses (Table 1.4). Le biais sur la détermination précise du rayon solaire (méthode du point d'inflexion) peut atteindre jusqu'à une quinzaine de mas en fonction de la structure solaire concernée (pour un limbe solaire considéré à une colatitude héliographique donnée). Les images acquises à 393.37 nm dans la raie du Ca II K (Figure 1.9) peuvent permettre de localiser entre autres la position de certaines structures solaires (taches et facules) en fonction de la colatitude héliographique. Dès lors qu'une tache ou une facule se situe à proximité d'un limbe solaire, il est fortement conseillé de ne pas prendre en compte le rayon solaire calculé à la colatitude héliographique concernée. Dans le cas contraire, on peut introduire une erreur dans la détermination précise du rayon solaire moyen obtenu à partir de la somme de tous les rayons solaires calculés aux différentes colatitudes héliographiques. La présence d'une tache ou d'une facule conduit à un retrait de la position du point d'inflexion d'un limbe solaire (rayon solaire plus petit de quelques mas). Si les données ne sont pas correctement traitées (localisation des taches solaires et des facules par exemple), on peut observer une anti-corrélation entre l'activité solaire et la variation du rayon solaire moyen au cours d'un cycle solaire.

## 1.8 Le spectre solaire et l'éclairement solaire total et spectral

Le rayonnement solaire représente l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le Soleil. La bande visible (400–700 nm) et la bande proche infrarouge (700–1400 nm)<sup>1</sup> représentent  $\sim 77\%$  du rayonnement solaire total (TSI). Près de 7.7 % de l'énergie du Soleil est émise sous forme de rayonnement ultra-violet (100–400 nm). Le fond continu du spectre solaire est dû à la présence de gaz chauds qui produisent l'émission d'un spectre continu d'origine thermique (émission d'un corps noir). Ainsi, le Soleil est convenablement modélisé en utilisant la loi du corps noir à 5772 Kelvin (utilisation de la température effective du Soleil  $T_{\odot}$  dans l'Equation 1.19) ; cette modélisation est uniquement valable dans le visible et le proche infrarouge. Les raies d'absorption (raies de Fraunhofer) sont dues à la présence d'atomes et d'ions dans la chromosphère qui absorbent certaines radiations.

$$SSI(\lambda) = \pi \frac{2 h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k T_{\odot}}\right) - 1} \quad (1.19)$$

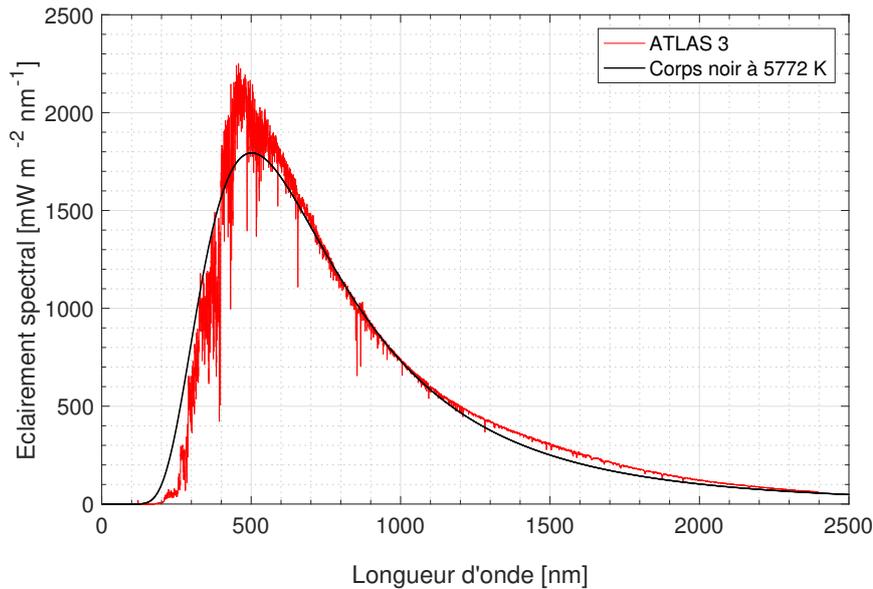
$$TSI = S_{\odot} = \int_0^{\infty} SSI(\lambda) d\lambda \quad (1.20)$$

La connaissance de l'éclairement solaire spectral absolu et de sa variabilité est nécessaire pour la physique solaire, la physique atmosphérique et la physique du climat. Ces différents domaines de la physique mettent en évidence la nécessité d'avoir un spectre absolu de référence compte tenu des inévitables limitations instrumentales. Plusieurs spectres de référence existent :

- Le spectre de Labs et Neckel (200 nm à 100  $\mu\text{m}$ ) [Labs et Neckel, 1968],
- Le spectre de Arvesen 1969 (205–2495 nm) [Arvesen *et al.*, 1969],
- Le spectre de Thekaekara 1973 (115–400000 nm) [Thekaekara, 1974],
- Le spectre de Hall et Anderson (200–310 nm) [Anderson et Hall, 1989],
- Le spectre NASA CV-990 (119.5–2500.0 nm) [Colina *et al.*, 1996],
- Le spectre de référence ATLAS 3 (0.50–2397.51 nm) [Thuillier *et al.*, 2004],
- Le spectre de référence SIRS WHI 2008 (0.95–2399.95 nm) [Woods *et al.*, 2009],
- Le spectre de SCIAMACHY (240–1600 nm) [Pagaran *et al.*, 2011] malgré l'absence de véritable calibration interne.

---

1. Selon la norme ISO 20473, la bande visible s'étend de 380 à 780 nm et la bande proche infrarouge A s'étend de 780 à 1400 nm. Dans mes études, j'ai considéré que la bande visible s'étendait de 400 à 700 nm et que la bande proche infrarouge s'étendait de 700 à 1400 nm.



**FIGURE 1.17** Spectre de référence ATLAS 3. La loi de Planck décrit l'émission énergétique du Soleil (corps noir à 5772 K). Les raies de Fraunhofer sont les discontinuités observables sur le spectre solaire. Ces raies caractérisent les éléments chimiques présents dans l'atmosphère solaire.

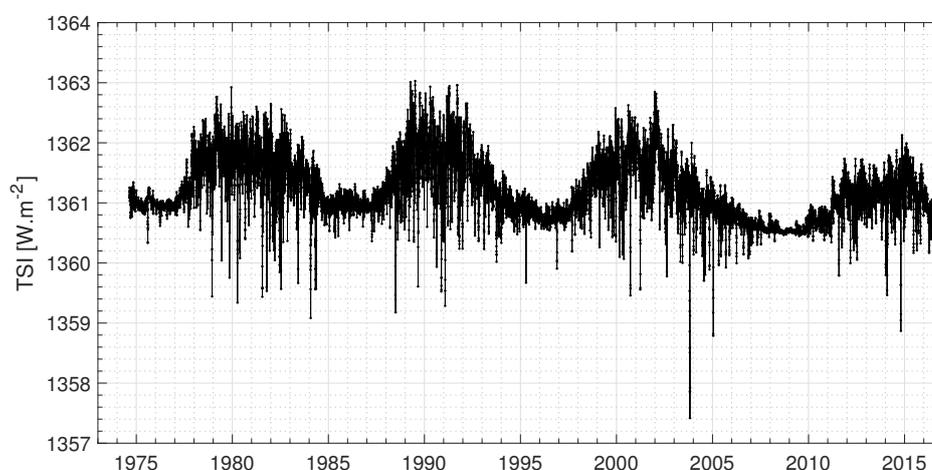
Deux spectres solaires de référence sont de première importance : le spectre de référence ATLAS 3/SOLSPEC (Figure 1.17) et le spectre de référence SIRS WHI 2008. Ils couvrent un large domaine spectral ( $\sim 96\%$  de l'éclairement solaire total) et présentent des incertitudes faibles (étalonnage au sol avec un corps noir et suivi du vieillissement en orbite). Un nouveau spectre de référence nommé SOLAR-ISS (0.5–3000.0 nm) est en cours de validation et sera publié fin 2017 dans une revue scientifique à comité de lecture (M. Meftah, L. Damé, D. Bolsée *et al.*, *Astronomy & Astrophysics*).

### Evolution de l'éclairement solaire au cours du temps

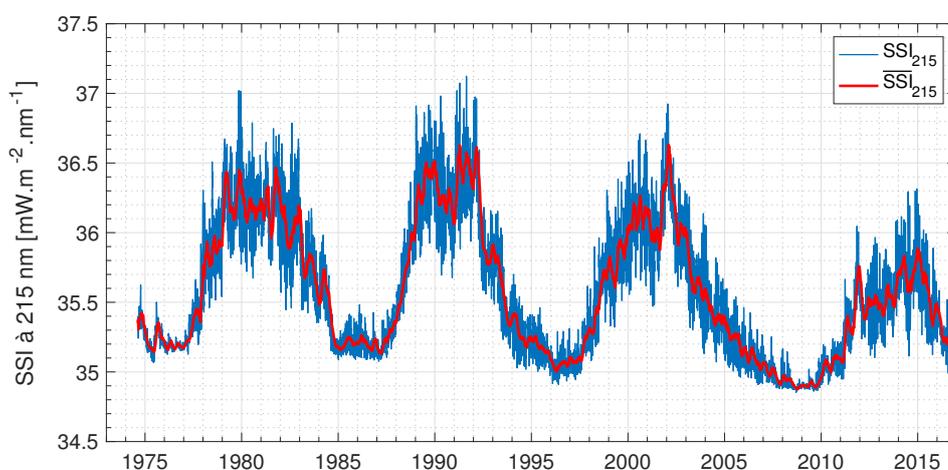
Les mesures long-terme de l'éclairement solaire total sont nécessaires. Il existe des reconstructions purement instrumentales de l'éclairement solaire total (le composite du PMOD, le composite de l'IRMB, le composite ACRIM, *etc.*). Il existe aussi des modèles de reconstruction de l'éclairement solaire total (SATIRE-S, NRLTSI, *etc.*) qui donnent des résultats similaires. L'évolution de l'éclairement solaire total au cours des quarante dernières années est présentée au niveau de la Figure 1.18.

L'évolution de l'éclairement solaire spectral au cours des quarante dernières années (série temporelle sans discontinuité) n'est disponible qu'à partir des modèles de reconstruction de l'éclairement solaire spectral (SATIRE-S, NRLSSI, *etc.*). Certains modèles de reconstruction se basent sur des magnétogrammes et sur des images du Soleil dans le

continuum afin de quantifier les surfaces des différentes structures solaires (Soleil calme, taches solaires avec pénombre, taches solaires avec ombre, facules, réseau, *etc.*) et leurs distributions spatiales.



**FIGURE 1.18** Evolution de l'éclairement solaire total (TSI) au cours du temps (à partir du modèle SATIRE-S). La TSI augmente de environ 0.1% entre les minimas et les maximas. La variabilité undécennale de ce modèle met en évidence une diminution de la TSI entre les minimas.

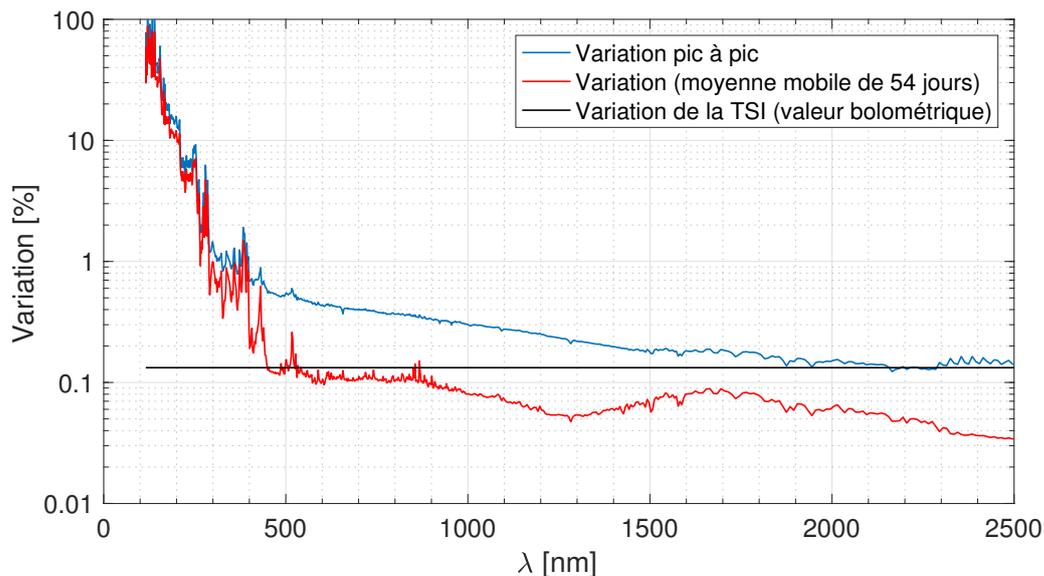


**FIGURE 1.19** Evolution de l'éclairement solaire spectral à 215 nm ( $SSI_{215}$  à partir du modèle d'éclairement solaire spectral SATIRE-S).  $\overline{SSI}_{215}$  correspond à une moyenne glissante de 54 jours de la série journalière  $SSI_{215}$ .

L'imagerie solaire dans de multiples longueurs d'onde est essentielle pour contraindre les modèles d'atmosphère solaire, ainsi que pour comprendre les différentes facettes de l'activité solaire. De même, les mesures de l'éclairement solaire spectral permettent de valider les modèles d'atmosphère solaire (Section 1.7). A partir des modèles et des mesures, plusieurs types de variabilité doivent être observés avec précision : la variabilité

undécennale et la variabilité due à l'émergence des taches solaires dont l'effet est modulé par la rotation solaire de 27 jours. L'évolution de l'éclairement solaire spectral à 215 nm (indicateur quantitatif du forçage solaire sur l'ozone et lien avec la période de 27 jours) au cours des quarante dernières années est présentée au niveau de la Figure 1.19 (évolution obtenue à partir des modèles de reconstruction). Pour les prochaines décennies, il est fondamental de mesurer la variabilité de l'éclairement solaire dans l'ultra-violet et de quantifier les variations minimum et maximum au cours de plusieurs cycles solaires (Figure 1.20). Un des objectifs est de consolider les modèles de reconstruction et d'apporter une contribution significative aux études climatiques.

Par ailleurs, la connaissance précise de l'évolution à long terme de l'éclairement solaire total et de l'éclairement solaire spectral peut permettre d'accéder aux processus (champ magnétique) conduisant à une meilleure compréhension de la variabilité des régions extérieures du Soleil. Les mesures de l'éclairement solaire total et de l'éclairement solaire spectral peuvent aussi permettre de remonter à la température et à la composition de ces régions. Cependant, ces études sont extrêmement délicates.

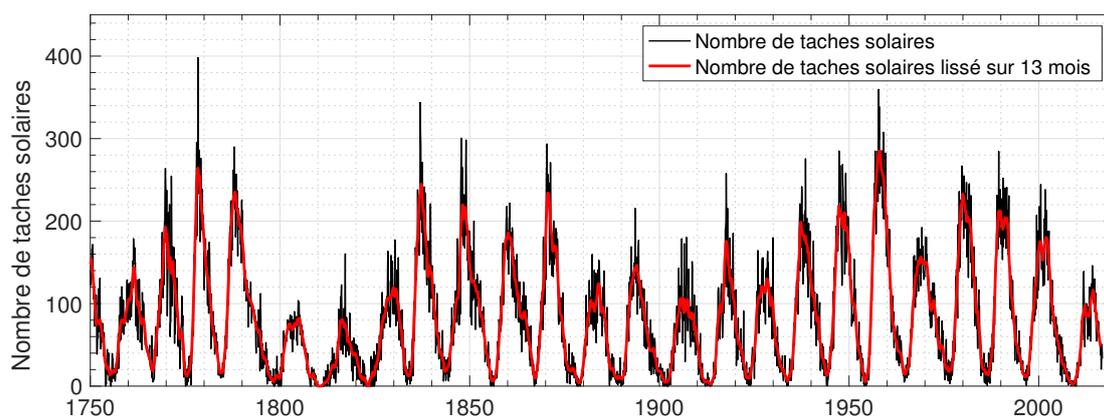


**FIGURE 1.20** Variation de l'éclairement solaire spectral au cours des quarante dernières années en fonction de la longueur d'onde (à partir du modèle semi-empirique SATIRE-S).

## 1.9 L'activité solaire

Les régions actives (taches solaires, facules, plages brillantes, zones éphémères) et les phénomènes éruptifs (éruptions solaires, éjections de matière coronale, *etc.*) repré-

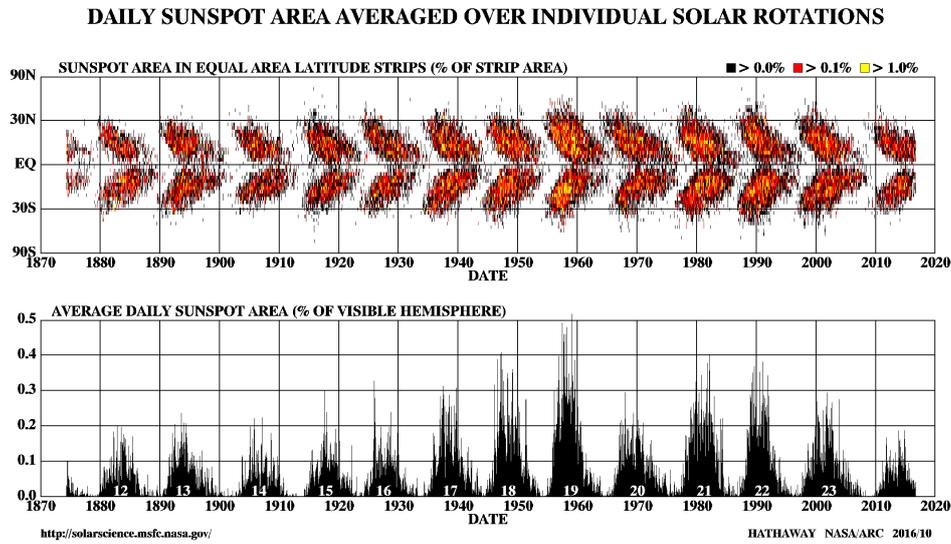
sentent des traceurs de l'activité solaire. Les taches solaires sont dues à l'émergence au niveau de l'atmosphère solaire (photosphère) de boucles de champs magnétiques qui sont transportées par la convection. L'apparition ou la disparition de nouveaux tubes de champs détermine l'évolution des régions actives. Les régions actives sont ainsi en évolution permanente ; elles ont une durée de vie de quelques jours à quelques mois (impact notoire sur la mesure du diamètre solaire (Section 1.7) : dès lors, il est important de pouvoir identifier les régions actives afin de corriger les mesures). Par ailleurs, la rotation différentielle, plus rapide à l'équateur qu'aux pôles, conduit à des instabilités magnétiques violentes (éruptions solaires, éjections de matière coronale).



**FIGURE 1.21** Evolution du nombre de taches solaires. Source : WDC-SILSO (Observatoire Royal de Belgique). Le minimum de Maunder correspond à un déficit marqué du nombre de taches solaires entre 1645 et 1715 (période non représentée au niveau du graphique). Les cycles de Schwabe sont numérotés à partir du maximum de 1761. Le cycle actuel (cycle 24), dont le maximum a été atteint en avril 2014, est l'un des plus faibles depuis ces cent dernières années.

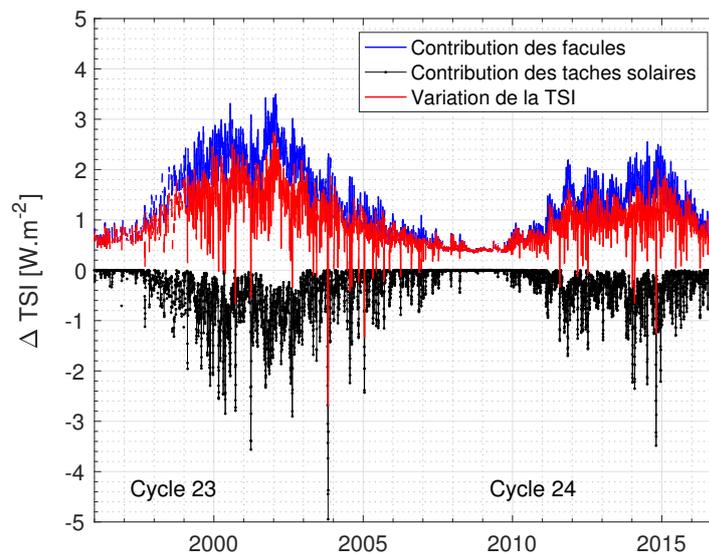
La manifestation la plus évidente de l'activité solaire est liée aux taches solaires. L'observation du disque solaire depuis plus de quatre siècles (Figure 1) montre que des taches solaires apparaissent à la surface de notre étoile avec une régularité très surprenante (Figure 1.21). Ces taches sont l'un des plus grands marqueurs d'une activité magnétique intense et organisée au sein du Soleil ; le suivi de leur localisation en fonction du temps permet d'élaborer le diagramme papillon de la Figure 1.22. Les cycles solaires durent environ 11 ans (cycle de Schwabe) et se caractérisent par une hausse importante puis une baisse du nombre de taches solaires. Les taches indiquant la venue d'un nouveau cycle solaire naissent à des latitudes moyennes et vont migrer à proximité de l'équateur au cours du temps ; elles ont une polarité opposée à celles du cycle précédent. Ainsi, en liaison avec le cycle de 11 ans, il existe ainsi un cycle de 22 ans qui concerne le champ magnétique solaire (inversion de polarité à chaque nouveau cycle de 11 ans). A la fin

d'un cycle solaire, on voit régulièrement des taches apparaître à plus hautes latitudes, précurseurs du cycle solaire suivant.



**FIGURE 1.22** Répartition en latitude de l'aire des taches solaires (diagramme papillon) avec une observation par rotation solaire depuis 1870.

L'activité solaire ne se quantifie pas uniquement avec le comptage des taches solaires. D'autres indicateurs bien corrélés sont utilisés comme la variation de l'éclairement solaire total (Figure 1.23), le nombre d'éruptions solaires ou encore le flux radio centimétrique à 10.7 cm (F10.7).

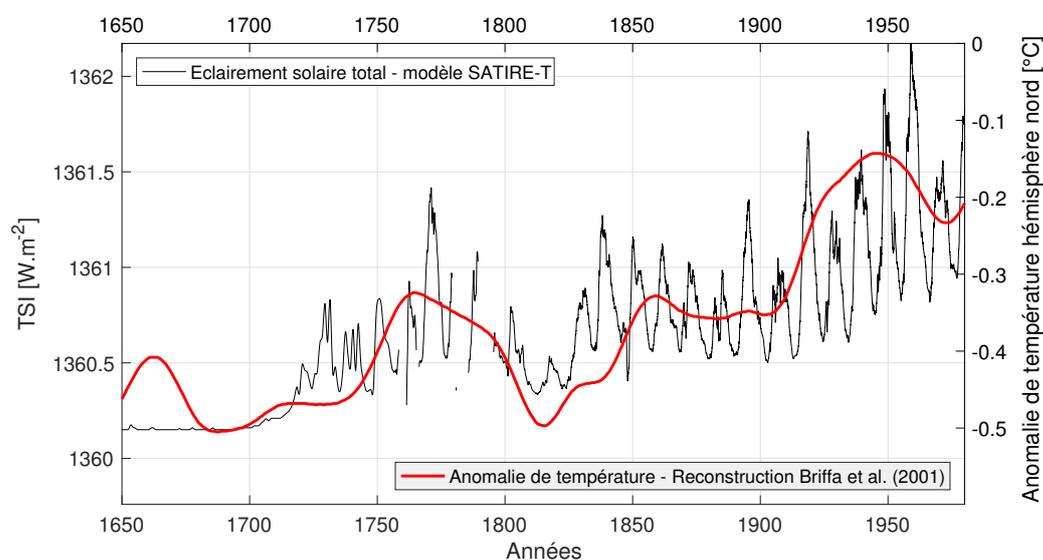


**FIGURE 1.23** Variation de l'éclairement solaire total (cycles 23 et 24) et contribution des taches et des facules (utilisation du modèle semi-empirique SATIRE-S).

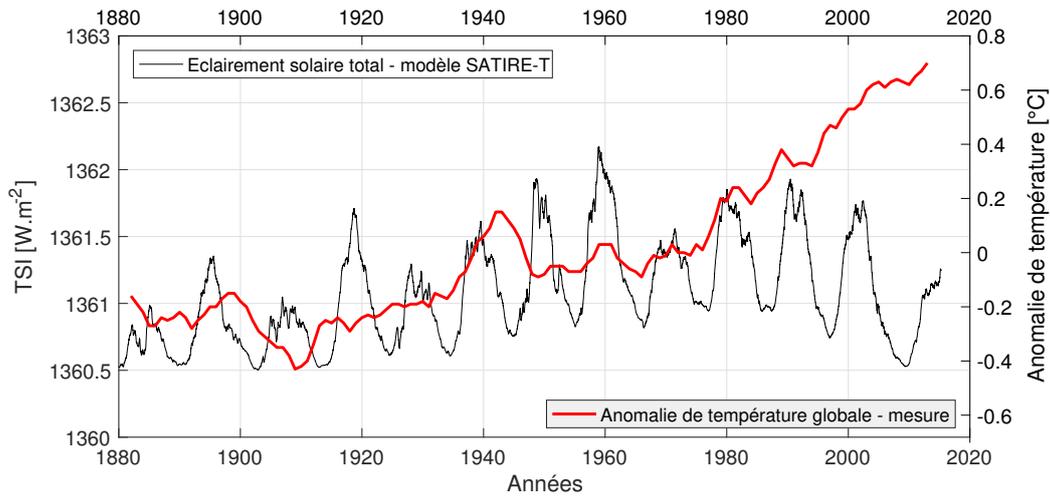
## 1.10 Les relations Soleil-Terre

Le Soleil interagit avec la Terre [Lilensten et Blelly, 1999] ; les facteurs d'interaction entre notre astre et notre planète sont principalement :

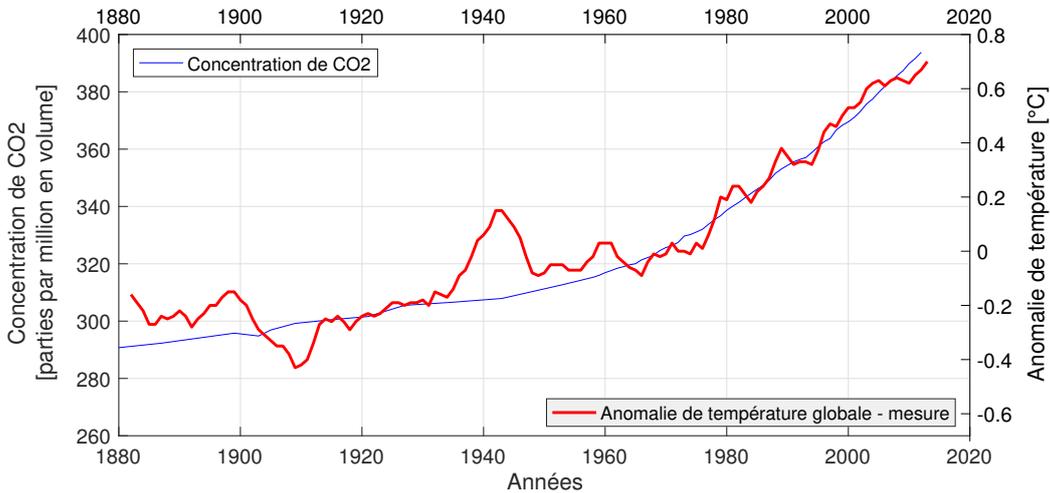
1. L'interaction gravitationnelle : la force d'attraction exercée par le Soleil sur la Terre commande le mouvement de notre planète dans l'espace. Les changements lents de l'orbite de la Terre dus aux interactions avec les autres planètes du système solaire entraîne une variation du rayonnement solaire reçu par notre planète au cours du temps.
2. L'interaction électromagnétique : le rayonnement solaire est la source quasi-unique de toutes les chaînes énergétiques de l'atmosphère, des océans et de la biosphère terrestre.
3. L'interaction magnétique : le champ magnétique du Soleil interagit fortement avec celui de la Terre.
4. Le vent solaire : le flux de particules en provenance du Soleil interagit avec la cavité magnétosphérique et de ce fait affecte la haute atmosphère terrestre.



**FIGURE 1.24** Evolution de l'éclairement solaire total et de l'anomalie de température de l'Hémisphère Nord (reconstruction) depuis le minimum de Maunder. L'activité solaire joue un rôle dans l'évolution de la température de la Terre, mais de façon complexe.



**FIGURE 1.25** Lien entre l'éclairement solaire total et l'anomalie de température globale de la Terre.



**FIGURE 1.26** Lien entre la concentration de  $\text{CO}_2$  (principal gaz à effet de serre relâché par les activités humaines) et l'anomalie de température globale de la Terre. Depuis un siècle, la température globale de la Terre a augmenté en moyenne de  $0.7^\circ\text{C}$ . Le  $\text{CO}_2$  a par ailleurs augmenté de environ 30% pendant la même période, en relation directe avec les activités anthropiques. Le  $\text{CO}_2$  a augmenté significativement à partir de 1975.

Une des questions fondamentales concerne l'influence de la variabilité du Soleil sur le climat de la Terre. Les tendances les plus marquées des périodicités des variations du climat ont été déterminées par [Mitchell \(1976\)](#). Les très longues périodes (supérieures à vingt millions d'années) seraient attribuables à la tectonique des plaques et à la conséquence du volcanisme de points chauds. Les périodes de 100 000, 41 000 et 20 000 ans sont attribuables à la position astronomique de la Terre par rapport au Soleil (excentricité, obliquité et précession) ; il s'agit du principal facteur de variabilité naturelle de la

température globale de surface de la Terre, au travers de l'éclairement solaire total. Il existe aussi des périodes de quelques centaines à quelques dizaines d'années qui ont peu de significations géophysiques et astronomiques mais dont on peut s'interroger quant à leurs origines. Ces périodes apparaissent dans les variations de concentration du  $^{10}\text{Be}$  et du  $^{14}\text{C}$  dont on connaît le potentiel lien avec l'activité solaire. La Figure 1.24 montre la variation de l'éclairement solaire total et l'évolution de la température de l'hémisphère Nord depuis le minimum de Maunder [Eddy, 1976]. Il s'agit d'une période appelée petit âge glaciaire où le climat de la Terre était assez froid, du moins en Europe, en Amérique du Nord et en Chine. On observe une corrélation entre le minimum de l'activité solaire pendant le minimum de Maunder (1645–1715) et le refroidissement de température durant cette même période. Mais la concomitance de ces événements n'est pas la preuve d'un lien de cause à effet. On peut aussi voir l'influence majeure du volcanisme sur la température notamment entre 1815 et 1835 (période avec plusieurs éruptions majeures) ; ces éruptions provoquent un refroidissement important. Ainsi, il est nécessaire de connaître le poids des différents contributeurs (notamment d'origine solaire) afin de mieux comprendre les mécanismes associés au climat de la Terre et l'impact sur le réchauffement climatique.

Au moment où l'ensemble de la planète s'interroge sur les conséquences de l'augmentation des gaz à effet de serre sur le climat, il devient de plus en plus nécessaire de distinguer les modifications d'origine anthropique de la variabilité naturelle de l'atmosphère et de l'océan. La qualité des prévisions de l'évolution future du climat en dépend. En effet, étudier le climat passé permet de mieux comprendre le fonctionnement du système climatique, clé pour anticiper ses évolutions futures. Pour cela, les climatologues doivent disposer de séries d'observations sur la période la plus longue possible. Parmi les causes naturelles qui peuvent avoir un effet sur le climat, la variabilité solaire est probablement une des plus importantes. L'influence du Soleil sur l'atmosphère et le climat peut se manifester de différentes manières :

- Les variations de l'éclairement solaire total modifient la quantité d'énergie absorbée par l'atmosphère et la surface terrestre et peuvent influencer la température moyenne au sol. La variation de la TSI est limitée à 0.1% au cours d'un cycle solaire de 11 ans et donc l'effet attendu sur le climat est probablement faible. Il existe par contre de grosses incertitudes sur la variation de l'éclairement solaire total sur de plus grandes périodes (tendance sur plusieurs cycles solaires) ;
- La variabilité du flux solaire au cours d'un cycle de 11 ans se manifeste principalement dans le domaine ultra-violet du spectre solaire et principalement aux longueurs d'ondes inférieures à 250 nm où elle peut dépasser 3%, et de 20% à plus de 50% dans l'ultra-violet lointain. Cette partie du spectre solaire n'atteint

pas la surface parce qu'elle est complètement absorbée par l'ozone ou l'oxygène stratosphérique. Le rayonnement solaire ultra-violet joue par contre un rôle important dans la stratosphère où il modifie les champs de température, de pression et de vent et donc les conditions de propagation des ondes atmosphériques qui couplent les basses et les hautes couches de l'atmosphère ;

- Les précipitations de particules solaires dans les régions polaires modifient la composition chimique de la stratosphère en produisant entre autres des oxydes d'azote qui détruisent partiellement la couche d'ozone et donc modifient son bilan radiatif.

Les mécanismes susceptibles d'intervenir dans les relations Soleil-Climat sont donc complexes et pour avancer dans leur compréhension il est nécessaire d'une part de bien documenter les paramètres caractérisant l'activité solaire, d'en comprendre l'origine, et d'autre part de représenter correctement ces mécanismes dans les modèles de climat. Ainsi, les mesures d'éclairement solaire total et spectral sont fondamentales. Il est important de mesurer l'éclairement solaire total et spectral sur plusieurs cycles solaires afin d'avoir une réelle idée des effets sur le climat. Par ailleurs, il est intéressant de savoir si le diamètre solaire varie significativement sur plusieurs cycles solaires. Les variations de la TSI peuvent être liées à des variations du diamètre solaire et à des variations de la température effective du Soleil (Equation 2.10). C'est une des raisons pour lesquelles l'étude du diamètre solaire a été entreprise depuis très longtemps.

## 1.11 Les moyens d'observation et les instruments étudiés

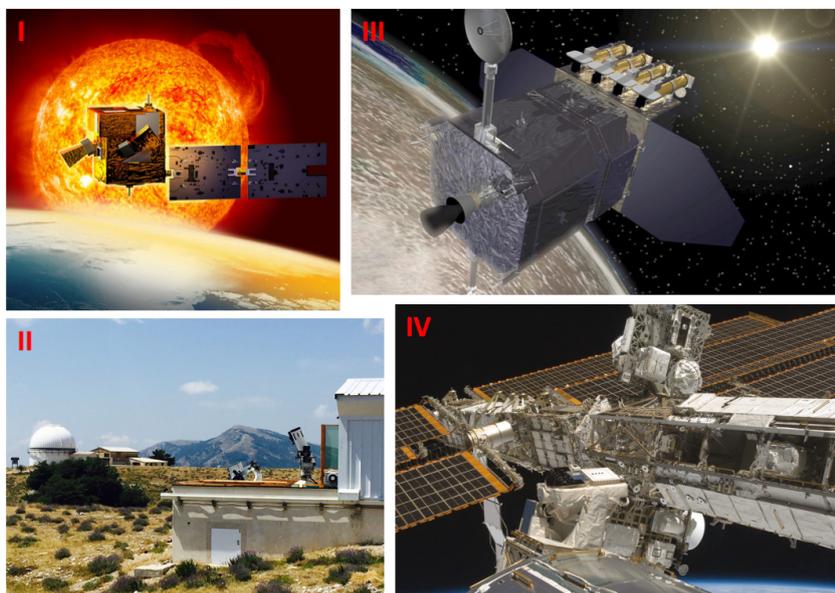
### 1.11.1 Les moyens d'observation du Soleil

Au sol, l'observation du Soleil se fait essentiellement dans l'ultra-violet proche, dans le spectre visible et dans le proche-infrarouge. Plusieurs télescopes ou instruments « sol » dédiés à l'étude du Soleil ont été ou sont en cours d'exploitation. On peut citer notamment les instruments de l'Observatoire de Paris, les instruments de l'Observatoire du Mont Wilson, les instruments de l'Observatoire solaire de Big Bear Lake, les instruments de l'observatoire solaire national à Sacramento Peak, les instruments de l'Observatoire du Teide, les instruments de l'Observatoire de la Côte d'Azur (Astrolabe, DORAYSOL, PICARD SOL), les instruments de l'Observatoire du Pic du Midi, *etc.* La performance des instruments au sol est limitée en grande partie par la turbulence atmosphérique qui dégrade la qualité des images. Les sites d'observation sont choisis en fonction de leurs bonnes conditions de qualité d'image (seeing). L'utilisation de systèmes d'optique adaptative (analyse et correction du front d'onde en boucle fermée) au niveau des télescopes

de nouvelle génération permet de réduire les effets de la turbulence atmosphérique. De plus, il est possible de développer des télescopes solaires de grandes dimensions (réduction de la limitation liée à la diffraction (tache d'Airy)). Au sol, l'observation du Soleil se fait aujourd'hui ou va se faire avec des télescopes de plus en plus grands. Plusieurs projets sont en cours de développement tels que les télescopes ATST (Advanced Technology Solar Telescope) et EST (European Solar Telescope).

L'utilisation des satellites permet d'observer le Soleil sur une plage étendue de longueurs d'onde, qui s'étend aujourd'hui des rayons X au proche infra-rouge. Les observations des télescopes spatiaux permettent de s'affranchir des effets de la turbulence atmosphérique et des alternances « jour-nuit ». Depuis la fin des années 1950, plusieurs missions spatiales dédiées à l'étude du Soleil ont été développées ou sont en cours de développement. On peut citer entre autres : Trace, SoHO, RHESSI, SORCE, HINODE, STEREO, SDO, PICARD, Solar Probe Plus, Solar Orbiter, *etc.*

Les travaux associés à cette thèse sont basés sur l'exploitation des données des instruments suivants (Figure 1.27) : le télescope SODISM et le radiomètre SOVAP de la mission spatiale PICARD, l'instrument HMI de la mission spatiale SDO, le spectromètre SOLAR/SOLSPEC à bord de la station internationale spatiale et les instruments au sol de la mission PICARD.

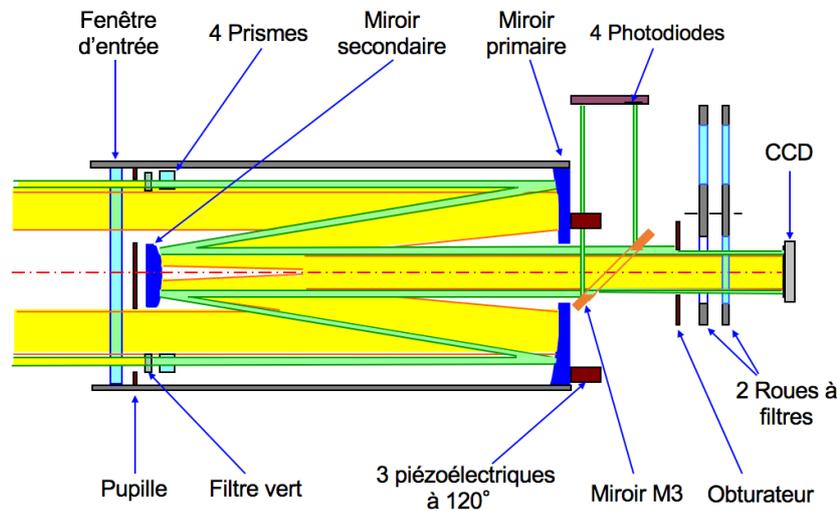


**FIGURE 1.27** (I) Vue d'artiste du satellite PICARD (Crédits : CNES). (II) Instruments au sol de la mission PICARD observant le Soleil sur le plateau de Calern à l'Observatoire de la Côte d'Azur (Crédits : CNRS-LATMOS-OCA). (III) Vue d'artiste du satellite SDO (Crédits : NASA). (IV) Charge utile SOLAR arrimée au module européen COLUMBUS de la Station Spatiale Internationale (Crédits : NASA).

### 1.11.2 Les instruments en orbite étudiés

#### SODISM, un télescope imageur dédié à la mesure du diamètre solaire

SODISM (Solar Diameter Imager and Surface Mapper) est un télescope imageur de 9 cm de diamètre associé à un détecteur (CCD) ayant une résolution de  $2048 \times 2048$  pixels. Ce télescope est un des instruments de la charge utile du satellite PICARD. Les objectifs initiaux de la mission PICARD étaient de mesurer la forme du limbe solaire, le diamètre solaire photosphérique, le diamètre solaire sismique, l'éclairement solaire total, la rotation différentielle et sa variabilité, l'asphéricité de la figure solaire, la variabilité solaire par l'observation de l'émission du Ca II (liée au magnétisme), les oscillations solaires (héliosismologie), le diamètre solaire référencé aux distances angulaires stellaires et la variabilité solaire dans le domaine UV. L'instrument SODISM devait en partie permettre l'obtention de ces résultats. Dans le cadre de cette thèse, l'étude du diamètre du Soleil et de l'aplatissement solaire a été réalisée à partir des images acquises par l'instrument SODISM. Une description détaillée de l'instrument est donnée par Meftah *et al.* (2014d). La configuration optique du télescope de type Ritchey-Chrétien est représentée au niveau de la Figure 1.28. Les images du Soleil acquises par l'instrument SODISM sont obtenues suivant cinq longueurs d'onde (215.0, 393.37, 535.7, 607.1 et 782.2 nm).



**FIGURE 1.28** Configuration de l'instrument SODISM avec les principaux composants optiques. Crédits : CNRS-LATMOS.

Les principales caractéristiques de l'instrument SODISM sont présentées au niveau de la Table 1.5. La résolution angulaire du télescope peut être limitée par la pixélisation. Le critère de Shannon énonce qu'il faut au moins 2 pixels par élément de résolution. Le facteur d'échelle d'un télescope ( $PS \simeq 0.2063 \times p/f_t$ ) relie la distance angulaire d'un

objet avec la séparation linéaire de son image au niveau du plan focal. Il dépend de la focale du télescope ( $f_t$ ) en m et de la taille d'un pixel ( $p$ ) en  $\mu\text{m}$  au niveau du plan focal du télescope. Le facteur d'échelle du télescope SODISM a été déterminé en orbite lors du passage de Vénus (étalonnage en orbite). Cette étude est traitée dans la section suivante. A partir de l'exploitation des données de l'instrument SODISM, le diamètre absolu du Soleil a été déterminé suivant plusieurs longueurs d'onde. Les résultats obtenus sont présentés dans le chapitre suivant. Les images acquises par SODISM lors d'opérations spéciales (rotation du satellite) permettent de déterminer la valeur absolue de l'aplatissement solaire. Enfin, une évaluation des variations du diamètre solaire est obtenue à partir de l'exploitation des données de l'instrument SODISM. **L'instrument PICARD/SODISM a été opérationnel de juillet 2010 à mars 2014.**

### **SOVAP, un radiomètre dédié à la mesure de l'éclairement solaire total**

SOVAP (SOlar VAriability PICARD) est constitué d'un radiomètre différentiel absolu utilisant deux canaux (sensibilité de quelques nm à quelques dizaines de  $\mu\text{m}$ ). DIARAD (Differential Absolute RADiometer) est la partie radiométrique de l'instrument SOVAP qui a déjà été embarquée sur plusieurs missions spatiales. L'instrument SOVAP associé à DIARAD est dédié à la mesure de l'éclairement solaire total. SOVAP est un des instruments de la charge utile du satellite PICARD. La partie radiométrique de l'instrument SOVAP (Figure 1.29) est constituée de deux détecteurs de puissance montés sur une pièce de référence thermique commune (puits thermique). Une cavité cylindrique à fond plat (recouverte de peinture noire afin d'obtenir un corps noir) est fixée sur chaque détecteur. Un élément chauffant recouvert de peinture noire est fixé sur la partie plate de l'ensemble détecteur/cavité cylindrique. La surface d'entrée de chaque canal est constituée d'un obturateur et d'un diaphragme d'entrée. Le principe de mesure pour ce type de radiomètre est basé sur l'utilisation des deux cavités du radiomètre (d'où la notion de radiomètre différentiel). Une puissance électrique de réchauffage par effet Joule est imposée au niveau du détecteur de la cavité fermée ( $P_f=0.13\text{ W}$ ). Lorsqu'une des deux cavités est ouverte (obturateur ouvert), le flux solaire incident traverse le diaphragme d'entrée et un miroir de précision dont la surface est connue ( $S_R$ ). Le flux solaire incident est alors absorbé par le détecteur peint en noir (puissance d'origine solaire :  $P_{\odot} \simeq 0.10\text{ W}$ ). Un système d'asservissement (servo) permet alors d'équilibrer les puissances injectées au niveau de la cavité fermée et de la cavité ouverte ( $P_f \simeq P_{\odot} + P_o$ ). Ainsi, une puissance électrique de réchauffage par effet Joule est injectée au niveau du détecteur de la cavité ouverte ( $P_o=0.03\text{ W}$ ). A partir de la connaissance exacte de la surface du miroir de précision de la cavité ouverte et de la mesure des puissances injectées dans les deux

cavités, on peut déterminer au premier ordre la valeur de l'éclairement solaire total ( $TSI \simeq (P_f - P_o)/S_R$ ). Une description détaillée de l'instrument SOVAP est donnée par [Conscience \*et al.\* \(2011\)](#). A partir de l'exploitation des données de l'instrument SOVAP, la valeur absolue de l'éclairement solaire total a été déterminée. Les résultats obtenus sont présentés dans un des chapitres de cette thèse. De même, les variations de l'éclairement solaire total ont été obtenues à partir de ces mesures. **L'instrument PICARD/SOVAP a été opérationnel de juillet 2010 à mars 2014.**

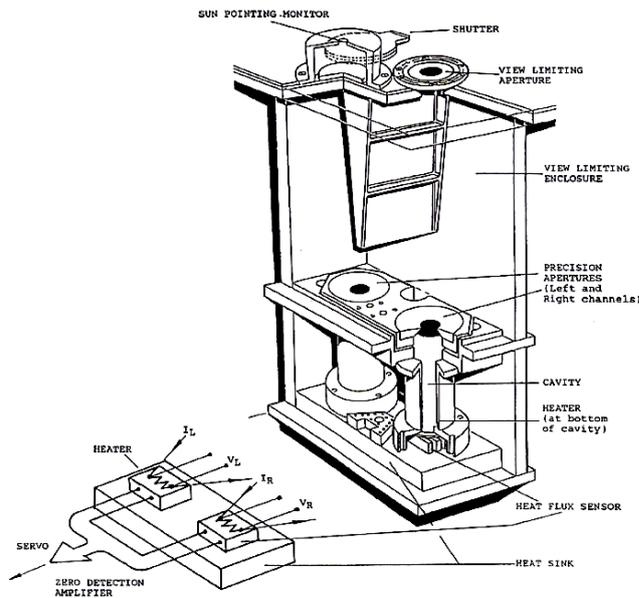
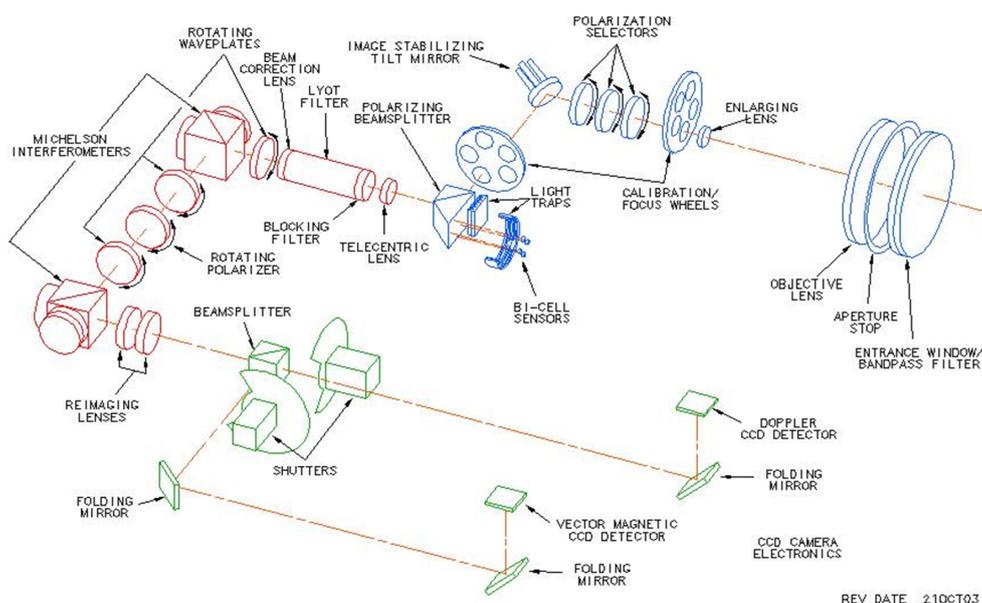


FIGURE 1.29 Vue générale de DIARAD, la partie radiométrique de l'instrument SOVAP. Cet ensemble est constitué d'obturateurs, de diaphragmes d'entrée à ouverture limitée, de miroirs de précision, de cavités cylindriques, de détecteurs de puissance associés à des réchauffeurs, d'un puits thermique et d'un servo (système d'asservissement des puissances de réchauffage des détecteurs).  
Crédits : IRMB.

## HMI, un instrument conçu pour étudier les oscillations et le champ magnétique à la surface du Soleil

HMI (Helioseismic and Magnetic Imager) est un télescope de 14 cm de diamètre associé à un détecteur (CCD) ayant une résolution de  $4096 \times 4096$  pixels. Cet instrument est une des composantes du satellite SDO ; il cartographie le champ magnétique et la vitesse de la surface du Soleil. Il s'agit d'un instrument aux capacités améliorées par rapport à l'instrument MDI (Michelson Doppler Imager) à bord de l'observatoire solaire spatial SoHO (Solar and Heliospheric Observatory). Les principales caractéristiques de cet instrument sont présentées au niveau de la Table 1.5. Une description détaillée de l'instrument est donnée par [Scherrer \(2002\)](#) et par [Schou \*et al.\* \(2012\)](#). La configuration optique de l'instrument est représentée au niveau de la Figure 1.30. Les images du Soleil acquises par l'instrument HMI sont obtenues autour d'une longueur d'onde centrée à 617.33 nm (ligne d'absorption du Fe I). La sélection et le réglage des longueurs d'onde sont réalisés avec un ensemble de filtres étroits (filtre atténuateur à l'entrée du télescope, filtre de blocage, filtre de Lyot à cinq éléments et deux interféromètres de

Michelson). Les trois derniers étages de filtrage peuvent être réglés avec des lames de retard rotatives ; il s'agit d'un outil optique capable de modifier la polarisation de la lumière la traversant. Les images acquises par HMI lors d'opérations spéciales (rotation du satellite) permettent de déterminer la valeur de l'aplatissement solaire au cours du temps. Ainsi, une évaluation des variations de l'aplatissement solaire au cours du cycle 24 est obtenue à partir de l'exploitation des données de l'instrument HMI (images dans le continuum solaire à 617.33 nm). Dans le cadre de cette thèse, seules les images acquises par l'instrument HMI dans le domaine visible sont analysées. **L'instrument SDO/HMI est opérationnel depuis février 2010.**



**FIGURE 1.30** Configuration optique de l'instrument HMI.  
Crédits : Université de Stanford.

### SOLSPEC, un spectromètre dédié à la mesure de l'éclairement spectral

SOLSPEC (SOLAR SPECTral Irradiance Measurements) est un spectromètre dédié à la mesure de l'éclairement solaire spectral [Bolsée, 2012]. SOLSPEC fait partie de la charge utile SOLAR à bord de la station internationale spatiale. La configuration optique d'une partie de l'instrument est représentée au niveau de la Figure 1.31. L'instrument SOLAR/SOLSPEC est composé de 3 spectromètres couvrant un domaine de longueur d'onde compris entre 165 et 3100 nm. Chaque spectromètre est composé d'un double monochromateur formé de réseaux concaves afin de réduire le taux de lumière parasite. Les 6 réseaux sont montés sur un vilebrequin unique, dont la rotation est gérée par un moteur pas à pas (vis et motorisation). Les détecteurs des canaux ultra-violet et visible sont des tubes photomultiplicateurs, et celui du canal infrarouge est un détecteur

photoconducteur au sulfure de plomb régulé en température à  $-20^{\circ}\text{C}$ . Pour chaque spectromètre, une roue à filtres (permettant d'adapter le signal dans le domaine linéaire des détecteurs) est placée entre la fente de sortie et le détecteur. Les filtres sont positionnés en fonction de la longueur d'onde afin de prendre en compte les variations d'intensité du signal solaire et les différences d'efficacité des spectromètres, principalement en bout de spectre. A partir de l'exploitation des données de l'instrument SOLSPEC, le spectre solaire dans l'ultra-violet et ses variations ont été déterminés. **L'instrument SOLAR/SOLSPEC a été opérationnel entre avril 2008 et février 2017.** Il s'agit de l'instrument à bord de la Station Spatiale Internationale qui a observé le plus longtemps.

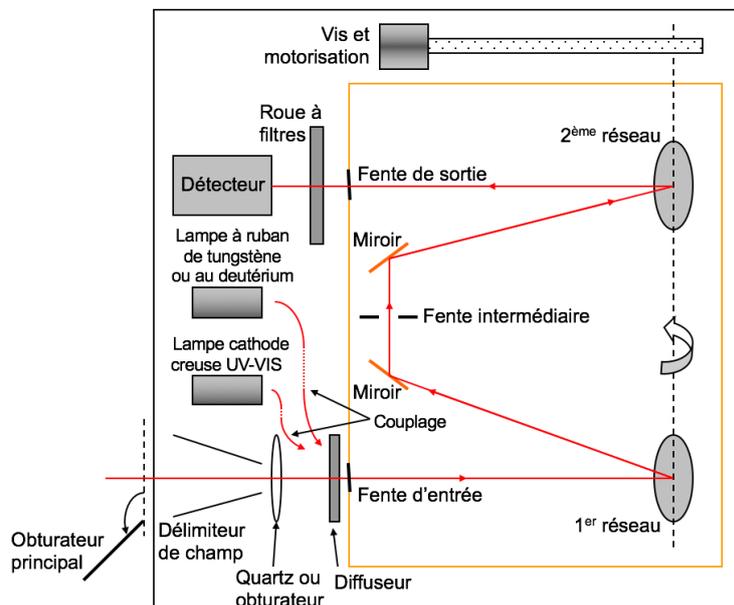


FIGURE 1.31 Schéma optique de l'instrument SOLAR/SOLSPEC. Crédits : LATMOS & IASB.

### 1.11.3 Les instruments au sol étudiés

#### SODISM II, un télescope dédié à la mesure du diamètre solaire au sol

SODISM II est une copie conforme du télescope spatial SODISM ; il s'agit du modèle de qualification. Ce télescope fait partie de la mission sol de PICARD. Les mesures du diamètre solaire effectuées depuis plusieurs décennies depuis le sol par la méthode des temps de passage à hauteur donnée ou par des transits semblent indiquer qu'il peut exister une anti-corrélation entre le diamètre solaire et l'activité solaire. Si cette anti-corrélation était confirmée, cela permettrait d'utiliser la mesure du diamètre solaire comme proxy de l'activité solaire à partir des éclipses observées depuis 1715. Cependant l'interprétation des observations au sol est controversée. Les mesures du diamètre solaire sont

sensibles aux effets de la réfraction et de la déformation du front d'onde par la turbulence atmosphérique et potentiellement par les effets de diffusion de la lumière par les aérosols qui dégradent la qualité des images. La seule façon de s'affranchir des effets atmosphériques est de se placer dans l'espace. C'est pour cela que la mission PICARD a été conçue dès le départ avec 2 composantes : la composante spatiale et la composante sol. L'ensemble instrumental PICARD SOL installé à Calern sur le site de l'Observatoire de la Côte d'Azur est constitué de l'instrument SODISM II (copie de l'instrument SODISM) et du moniteur de turbulence MISOLFA (Moniteur d'Images Solaire Franco-Algérien). Un photomètre permet de mesurer simultanément l'épaisseur optique des aérosols. L'idée est d'une part de déterminer si les variations de diamètre observées depuis le sol sont d'origine solaire ou induites par les effets atmosphériques. Une description détaillée de l'instrument SODISM II est donnée par [Meftah \*et al.\* \(2014a\)](#). Les images du Soleil sont obtenues suivant cinq longueurs d'onde : 393.37, 535.7, 607.1, 782.2 et 1025 nm. Les principales caractéristiques de SODISM II sont présentées au niveau de la Table 1.5. SODISM II est associé à MISOLFA, un télescope conçu pour fournir les paramètres de la turbulence atmosphérique (le paramètre de Fried, l'échelle externe de cohérence spatiale du front d'onde, le profil vertical de turbulence, le temps caractéristique d'évolution du front d'onde, le domaine d'isoplanétisme). Le principe de fonctionnement de MISOLFA [[Ikhlef \*et al.\*, 2016](#)] est basé sur la mesure des fluctuations des angles d'arrivée qui sont responsables de l'agitation des images au foyer d'un télescope. Cet instrument permet d'évaluer la dégradation du front d'onde induite par la turbulence atmosphérique. Les principales caractéristiques de MISOLFA sont présentées au niveau de la Table 1.5. La détermination des variations du diamètre solaire au cours du cycle solaire 24 est obtenue à partir de l'exploitation des données de la mission PICARD SOL. Ces résultats s'insèrent dans la synergie sol-espace de la mission PICARD. **Les instruments SODISM II et MISOLFA de la mission PICARD SOL observent le Soleil de manière conjointe depuis mai 2011.**

**TABLE 1.5** Principales caractéristiques des télescopes étudiés.

Instrument	SODISM	HMI	SODISM II	MISOLFA
Focale ( $f_t$ )	2.626 m	4.95 m	2.626 m	10.00 m
Diamètre de la pupille ( $D_t$ )	0.09 m	0.14 m	0.09 m	0.25 m
Longueur d'onde ( $\lambda$ )	$5 \lambda$	617.33 nm	$5 \lambda$	535.7 nm
Résolution angulaire	$\sim 0.6$ à $2.2$ as	$\sim 1.1$ as	$\sim 1.1$ à $2.9$ as	$\sim 0.54$ as
Taille du pixel ( $p$ )	$13.5 \mu m$	$12 \mu m$	$13.5 \mu m$	$9.9 \mu m$
Facteur d'échelle ( $PS$ )	1.06 as/p	0.50 as/p	1.06 as/p	0.20 as/p

# Chapitre 2

## Le diamètre du Soleil et ses variations au cours du cycle 24

### Sommaire

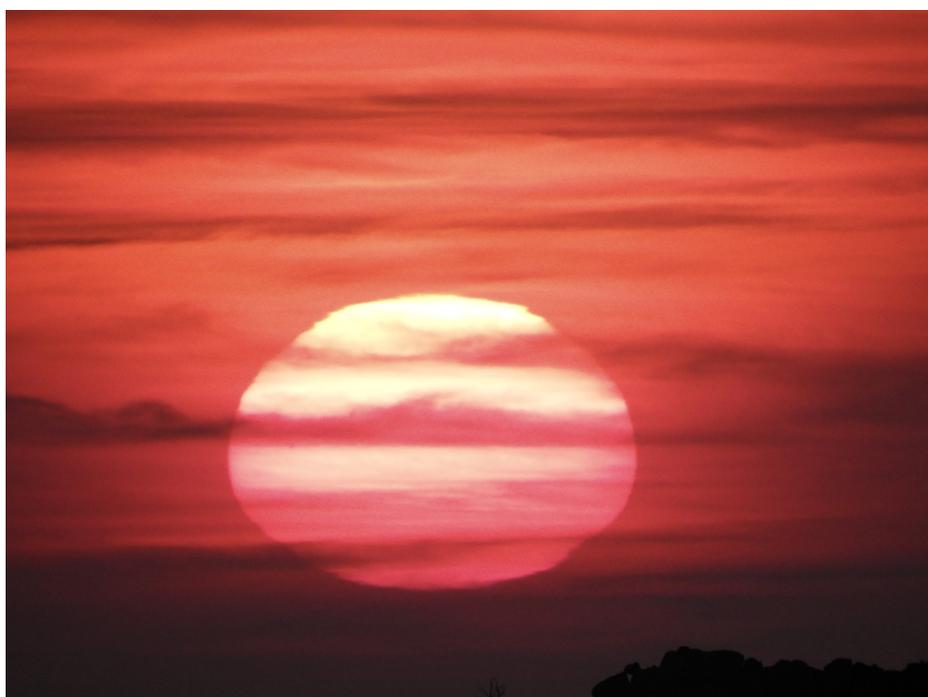
---

<b>2.1</b>	<b>Historique des mesures</b>	<b>57</b>
2.1.1	Détermination absolue du diamètre solaire et bilan d'erreur	60
2.1.2	Variations du diamètre solaire au cours du temps	61
<b>2.2</b>	<b>Impact de l'atmosphère sur les mesures au sol</b>	<b>61</b>
2.2.1	Impact de la réfraction	62
2.2.2	Impact de la turbulence atmosphérique	65
<b>2.3</b>	<b>Détermination absolue du diamètre solaire</b>	<b>70</b>
2.3.1	Passage de Vénus du 5 et 6 juin 2012	70
2.3.2	Détermination de la position de Vénus et de son rayon apparent	73
2.3.3	Détermination de la position du Soleil et de son rayon apparent	77
2.3.4	Détermination du facteur d'échelle de l'instrument SODISM	78
2.3.5	Distorsion optique et déformation de l'image	79
2.3.6	Profils d'assombrissement centre bord du Soleil et de Vénus	80
2.3.7	Détermination du rayon solaire à 607.1 nm	81
2.3.8	Détermination du rayon solaire pour d'autres longueurs d'onde	83
<b>2.4</b>	<b>Etude des variations du diamètre solaire</b>	<b>85</b>
2.4.1	Introduction	85
2.4.2	Problématique liée à la mesure des instruments en orbite et au sol	87
2.4.3	Compréhension des phénomènes observés par l'instrument en orbite	90
2.4.4	Modèle thermique de la fenêtre d'entrée de l'instrument en orbite	92

2.4.5	Modèle optique de l'instrument en orbite . . . . .	96
2.4.6	Evolution du rayon solaire des instruments en orbite et au sol	96
2.5	Conclusions . . . . .	113

---

*Connaître le diamètre du Soleil avec la plus grande précision est indispensable pour savoir si notre étoile est stable au cours du temps (périodes de quelques centaines d'années). Aujourd'hui, le débat sur une éventuelle variation du diamètre solaire est loin d'être clos tout comme la détermination absolue du diamètre de notre astre.*



**FIGURE 2.1** Coucher de Soleil photographié en août 2016 (arête du Monte Incudine, Corse, France). Les bandes de nuages obscurcissent l'horizon et l'atmosphère déforme le disque solaire. Le Soleil prend une forme oblongue et légèrement aplatie (effet de la réfraction). Crédits : F. Vakili (Observatoire de la Côte d'Azur).

## 2.1 Historique des mesures

Depuis plus de 2000 ans, plusieurs mesures du diamètre du Soleil ont été effectuées et montrent une grande dispersion au niveau des résultats (Table 2.1). Plusieurs raisons peuvent expliquer en grande partie ces incohérences [Wittmann et Debarbat, 1990] :

1. Des différences dans les méthodes de mesure (temps de passage, mesures angulaires, mesures micrométriques, éclipses solaires (Figure 2.2), passage de Mercure, passage de Vénus, mesures à partir de héliosismologie, mesures photoélectriques, mesures en ondes radioélectriques, *etc.*);
2. Des différences dans les instruments utilisés (micromètres, héliomètres, astrolabes, télescopes, *etc.*);
3. Des différences dans les choix de longueurs d'ondes et les bandes passantes;
4. Des différences dans les effets affectant les mesures (l'atmosphère pour les instruments au sol (réfraction et turbulence) et l'impact de l'environnement spatial pour les instruments en orbite, *etc.*);
5. Des différences dans les réponses impulsionnelles spatiales des instruments;
6. Des différences dans les méthodes de calcul (détermination du bord solaire), *etc.*



FIGURE 2.2 Eclipse solaire du 13 novembre 2012 révélant la couronne de notre astre. Les irrégularités du relief de la Lune génèrent les grains de Bailey (phénomène optique de couleur rose vif). Au cours de ce phénomène astronomique, le diamètre du Soleil peut être déterminé.  
Crédits : M. Meftah.

Les différents résultats obtenus (Table 2.1) montrent que les instruments n'observent pas le Soleil de la même manière. A partir de la fin des années 1970, certaines mesures du diamètre solaire ont été obtenues à partir de plusieurs astrolabes solaires (à Santiago, à San Fernando, à São Paulo, à Malatya, à proximité d'Antalya, à Rio de Janeiro et à Calern). Le principe de mesure de ces astrolabes de même type est le même, et pourtant, les résultats obtenus sont différents. Ainsi, il est évident que l'atmosphère terrestre influence la mesure précise du diamètre de notre astre. A partir des années 1990, des mesures du diamètre solaire ont été réalisées hors atmosphère par un instrument placé sur un ballon stratosphérique (SDS). Plus récemment, des mesures ont été réalisées par des instruments spatiaux (MDI, HMI et SODISM).

**TABLE 2.1:** Principales mesures du rayon solaire obtenues depuis plus de 2000 ans en utilisant différentes méthodes et différents instruments. Les résultats obtenus montrent des incohérences. Principales références utilisées :  $a \rightarrow$  [Rozelot et Damiani \(2012\)](#) et  $b \rightarrow$  [Toulmonde \(1997\)](#).  $c \rightarrow$  Mesures réalisées avec un véritable bilan d'erreurs (à  $1\sigma$ ).

Auteur(s)	Dates	Méthode / Instrument	$R_{\odot}$ [as]
Aristarque <sup>a</sup>	~ 270 av. J.-C	Coucher du Soleil	900
Archimède <sup>a</sup>	~ 230 av. J.-C	Disque sur une tige	815–988
Ptolémée <sup>a</sup>	~ 130	Instrument parallactique	936
Al Battani <sup>a</sup>	~ 880	Instrument parallactique	974
Ibn-al-Shatir <sup>a</sup>	~ 1350	Cadran solaire (apogée et périégée)	885.0–969.6
Maestlin <sup>a</sup>	1577	Temps de passage	967
Tycho Brahe <sup>a</sup>	1591	Sténopé (apogée et périégée)	900–931
Scheiner <sup>a</sup>	1620	Hélioscope	1500
Gascoigne <sup>a</sup>	1640	Micromètre	963
Mutas <sup>a</sup>	1644	Projection	961
Cassini <sup>a</sup>	1656	Gnomon	947
Mouton <sup>b</sup>	1660	Temps de passage (projection)	959.4
Auzout <sup>b</sup>	1666	Micromètre	965.2
Picard <sup>b</sup>	1670	Micromètre	964.6
Richer <sup>b</sup>	1672	Temps de passage	961.9
Picard <sup>b</sup>	1674	Temps de passage	962.9
La Hire <sup>b</sup>	1683	Micromètre	963.2
La Hire <sup>b</sup>	1684	Temps de passage (projection)	965.4
Eimmart <sup>a</sup>	1694	Eclipse solaire	967
La Hire <sup>b</sup>	1701	Temps de passage (projection)	963.6
Louville <sup>b</sup>	1724	Temps de passage (projection)	962.4
Bouguer <sup>b</sup>	1753	Héliomètre	957.3
Bradley <sup>a</sup>	1753	Quadrant astronomique mural	961.5
Delisle <sup>a</sup>	1756	Passage de Mercure	961.7
Mayer <sup>b</sup>	1759	Temps de passage (projection)	960.4
Lalande <sup>b</sup>	1760	Héliomètre	961.1
Lalande <sup>b</sup>	1764	Héliomètre	961.4
Du Séjour <sup>a</sup>	1764	Eclipse solaire	960.3
Messier <sup>a</sup>	1766	Eclipse solaire	942.75
Gauss <sup>a</sup>	1820	Temps de passage	961.17
Bessel <sup>b</sup>	1824	Temps de passage au méridien	960.90
Airy <sup>b</sup>	1837	Temps de passage au méridien	962.25
Goujon <sup>b</sup>	1842	Temps de passage au méridien	962.20
Smith <sup>b</sup>	1877	Temps de passage au méridien	961.45
<b><a href="#">Auwers (1891)</a></b>	<b>1880</b>	<b>Héliomètre</b>	<b>959.63</b>

TABLE 2.1: (suite)

Auteur(s)	Dates	Méthode / Instrument	$R_{\odot}$ [as]
Gething <sup>b</sup>	1895	Temps de passage au méridien	961.04
Schur <sup>b</sup>	1896	Héliomètre	960.07
Ambronn <sup>b</sup>	1897	Héliomètre	959.9
Cimino <sup>b</sup>	1907	Temps de passage au méridien	961.34
Chevalier <sup>a</sup>	1912	Plaques photographiques	960.0
Smith <sup>b</sup>	1946	Temps de passage au méridien	961.34
Sadžakov et Dačić <sup>a</sup>	1975–1986	Télescope au méridien	961.1
Toulmonde (1997)	1660–1995	Revue de données	960.0 ± 0.1
Sveshnikov (2002)	1631–1973	Passages de Mercure	959.79 ± 0.02
Fiala et al. (1994)	1715–1991	Eclipses solaires	959.75 ± 0.06
Wittmann (1997)	1836–1975	Héliomètre	960.00 ± 0.09
Poor (1905)	1870–1894	Plaques photographiques	959.63 ± 0.05
Ambronn et Schur (1905)	1890–1902	Héliomètre	958.94 ± 0.015
Sofia et al. (1983)	1925–1979	Eclipses solaires	959.36 ± 0.02
Emilio et Leister (2005)	1972–1997	Astrolabe (São Paulo, B)	959.52 ± 0.03
Laclare et al. (1996)	1975–1994	Astrolabe (Calern, F)	959.42 ± 0.01
	1989–1994	Avec CCD	959.40 ± 0.01
Wittmann (1980)	1976	Photoélectrique	960.52
Leister et al. (1996)	1980–1993	Astrolabe (Rio de Janeiro, B)	959.40 ± 0.05
Neckel (1995)	1981	Profils de limbes solaires	959.62 ± 0.03
Wittmann et al. (1993)	1981, 1990–1992	Photoélectrique	960.56 ± 0.06
Akimov et al. (1993)	1981	Temps de passage au méridien	959.97
Brown et al. (1998)	1984	Photoélectrique	958.96 ± 0.02
Morand et al. (2011)	1985–2009	Astrolabe (Calern, F)	959.48 ± 0.01
Yoshizawa (1994)	1989	Photoélectrique	959.83
Maier et al. (1992)	1990	Sextant (SDS)	959.57–959.64
Noël (1995)	1990–1994	Astrolabe (Santiago, C)	960.230–961.075
Sanchez et al. (1995)	1990–1992	Astrolabe (San Fernando, E)	958.54 ± 0.12
Wittmann et al. (2000)	1990–1998	Photoélectrique (Locarno, S)	960.66 ± 0.03
	1990–2000	Photoélectrique (Izaña, E)	960.63 ± 0.02
Noël (2004)	1990–2003	Astrolabe (Santiago, C)	960.42 ± 0.01
Egidi et al. (2006)	1992–1996	Sextant (SDS)	959.5–959.7
Kilic et al. (1998)	1994	Astrolabe (Malatya, T)	959.44 ± 0.05
Antia et al. (1998)	1996	Héliosismologie	959.34 ± 0.01
Schou et al. (1997)	1997	Héliosismologie	959.20 ± 0.01
Jilinski et al. (1999)	1997	Astrolabe (Rio de Janeiro, B)	959.2 ± 0.02
Andrei et al. (2004)	1998–2001	Astrolabe (Calern, F)	959.509 ± 0.014
Puliaev et al. (2000)	1998	Astrolabe (Rio de Janeiro, B)	959.07 ± 0.02
Golbasi et al. (2001)	1999	Astrolabe (Antalya, T)	959.03 ± 0.07
Kiliç et al. (2005)	2001–2003	Astrolabe (Antalya, T)	959.29 ± 0.01

TABLE 2.1: (suite)

Auteur(s)	Dates	Méthode / Instrument	$R_{\odot}$ [as]
Rozelot et al. (2003)	2001	Héliomètre	$959.434 \pm 0.008$
Kuhn et al. (2004)	2003	Passage de Mercure (MDI)	$959.28 \pm 0.15$
Kilcik et al. (2009)	2006	Eclipse solaire	$959.22 \pm 0.04$
<a href="#">Sofia et al. (2013)</a>	1992-2011	Sextant (SDS)	$959.76 \pm 0.12$ <sup>c</sup>
<a href="#">Hauchecorne et al. (2014)</a>	2012	Passage de Vénus (HMI)	$959.90 \pm 0.06$
<a href="#">Meftah et al. (2014c)</a>	2012	Passage de Vénus (SODISM)	$959.86 \pm 0.20$ <sup>c</sup>
<a href="#">Emilio et al. (2015)</a>	2012	Passage de Vénus (HMI)	$959.57 \pm 0.02$
<a href="#">Lamy et al. (2015)</a>	2010–2015	Eclipses solaires	$959.99 \pm 0.02$

### 2.1.1 Détermination absolue du diamètre solaire et bilan d’erreur

La détermination absolue du diamètre du Soleil nécessite la mise en œuvre d’un bilan d’erreurs détaillé. L’erreur de mesure est définie comme la différence entre la valeur annoncée et la valeur vraie qui reste une inconnue à déterminer. Le bilan ou budget d’erreurs est généralement constitué d’erreurs aléatoires et d’erreurs systématiques. Les erreurs de type aléatoire sont évaluées à partir de la distribution statistique des résultats de séries de mesures et peuvent être caractérisées par des écart-types expérimentaux. Les erreurs de type systématique sont évaluées en considérant des distributions de probabilité à partir de l’expérience acquise ou à partir d’autres informations (modèles numériques, calibration, *etc.*). Il peut aussi exister des erreurs systématiques inconnues qui vont automatiquement introduire des biais dans les mesures réalisées. Les principales déterminations du diamètre solaire obtenues à partir du vingtième siècle présentent des résultats avec des incertitudes (Table 2.1). On remarquera l’incompatibilité apparente entre ces résultats et le caractère optimiste dans l’appréciation des incertitudes. Cependant, il s’agit très généralement d’incertitudes qui caractérisent la dispersion des séries de mesures. Cela peut aussi correspondre à une incertitude liée à l’ajustement d’une courbe par rapport à un observable. Ainsi, très peu de mesures (Table 2.1) présentent des résultats avec un véritable bilan d’erreurs (à l’exception de [Sofia et al. \(2013\)](#)). Par conséquent, il est nécessaire de déterminer le diamètre absolu du Soleil en réalisant un bilan d’erreurs détaillé qui soit le plus réaliste possible. A partir de l’exploitation des données de l’instrument SODISM [[Meftah et al., 2016c](#)], le diamètre absolu du Soleil associé à un bilan d’erreurs a été déterminé suivant plusieurs longueurs d’onde ; à 607.1 nm,  $R_{\odot}=959.86 \pm 0.2$  secondes d’arc ( $1 \sigma$ ) et où l’écart-type des mesures est égal à  $\pm 0.03$  secondes d’arc à  $1 \sigma$  (bonne répétabilité de la mesure). Les résultats obtenus à partir de l’instrument PICARD/SODISM sont présentés au niveau de la Section 2.3.

### 2.1.2 Variations du diamètre solaire au cours du temps

Le Soleil est une étoile variable dont les propriétés intrinsèques entraînent une variabilité de son activité. Mais qu’en est-il des variations de son diamètre pendant plusieurs décennies ? Plusieurs mesures ont été effectuées et montrent des résultats incohérents (Table 2.2). Ces mesures sont très difficiles à réaliser. Il est nécessaire de réaliser de nouvelles observations afin de disposer de séries chronologiques les plus longues possibles.

**TABLE 2.2** Principales mesures de la variation du rayon solaire. Un signe positif correspond à une augmentation du rayon solaire et un signe négatif correspond à une diminution du rayon solaire au cours d’une période donnée.

Auteur(s)	Observation	$\Delta R_{\odot}$	Variation séculaire
Eddy et Boornazian (1979)	1836–1953	–	-11.25 mas par an
Parkinson <i>et al.</i> (1980)	1715–1980	–	-1.4 mas par an
Shapiro (1980)	1736–1973	–	-1.5 mas par an
Dunham <i>et al.</i> (1980)	1715–1980	–	-1.3 mas par an
Gilliland (1981)	1715–1979	–	-1.5 mas par an
Wittmann <i>et al.</i> (1993)	1990–1992	+400 mas	–
Ulrich et Bertello (1995)	1970–1995	+200 mas	–
Laclare <i>et al.</i> (1996)	1978–1986	-200 mas	–
Emilio <i>et al.</i> (2000)	1996–2000	<+21 mas	–
Sveshnikov (2002)	1631–1979	+80 mas	–
Delmas et Laclare (2002)	1978–2001	-200 mas	–
Antia (2003)	1995–2002	3 mas	–
Kuhn <i>et al.</i> (2004)	1996–2004	<+7 mas	–
Noël (2004)	1991–2002	+52 mas	–
Kilic <i>et al.</i> (2005)	2001–2003	-17 mas	–
Emilio et Leister (2005)	1972–1998	<100 mas	–
Egidi <i>et al.</i> (2006)	1992–1996	-200 mas	–
Chapman <i>et al.</i> (2008)	1986–2004	+136 mas	–
Bush <i>et al.</i> (2010)	1996–2010	< 23 mas	–
Sofia <i>et al.</i> (2013)	1992–2011	~ 200 mas	–
Meftah <i>et al.</i> (2015a)	2010–2014	< 20 mas	–

## 2.2 Impact de l’atmosphère sur les mesures au sol

Comme énoncé au niveau de la section précédente, l’atmosphère affecte les mesures du diamètre solaire réalisées au sol. Quelle que soit la méthode de mesure utilisée, la turbulence (qu’elle soit atmosphérique, locale ou instrumentale) dégrade la qualité des observations. L’atmosphère altère aussi par réfraction la propagation des rayons

lumineux. Ces différents effets influencent la détermination du diamètre solaire. L'astrolabe solaire (almicantarate) est un des rares instruments d'astrométrie au sol à pouvoir observer de façon fiable un diamètre solaire vertical qui est perpendiculaire à la ligne d'horizon. En effet, cet instrument détermine des instants de passage à un angle zénithal constant. Ainsi, il est affranchi en grande partie des erreurs commises dans l'évaluation des effets de la réfraction. A l'inverse, SODISM II (téléscope Ritchey-Chrétien) acquiert des images du Soleil qui nécessitent des corrections liées aux effets de la réfraction.

### 2.2.1 Impact de la réfraction

Dans ce chapitre, je me suis intéressé à l'impact de la réfraction atmosphérique ( $R_s$ ) sur la mesure du diamètre solaire. Le biais sur la mesure est défini comme  $R_s(Zr_2) - R_s(Zr_1)$  où  $Zr_1$  et  $Zr_2$  représentent des distances angulaires entre le zénith et le Soleil (Figure 2.3). La réfraction atmosphérique correspond au changement de direction de la propagation de la lumière du Soleil lorsqu'elle traverse l'atmosphère terrestre. L'air se comporte comme un milieu transparent d'indice de réfraction  $n_{air}$  à une altitude donnée. La réfraction astronomique ( $R_s$  en radian) est la mesure du déplacement angulaire d'un rayon solaire à partir de sa position vraie, lorsqu'il est observé depuis le sol. L'Equation 2.1 [Danjon, 1994] permet de déterminer cet effet à partir de la mesure de plusieurs paramètres tels que l'angle zénithal ( $z$  en radians), la pression de l'air ( $P_{air}$  en Pascal), la température de l'air ( $T_{air}$  en °C), l'humidité de l'air ( $RH\%$  en %) et l'indice de l'air ( $n_{air}$ ). Pour le site d'observation de Calern (PICARD SOL), les conditions atmosphériques standards sont :  $P_{air} \sim 875$  hPa,  $T_{air} \sim 15^\circ\text{C}$  et  $RH\% \sim 50\%$ . En appliquant l'Equation 2.1 pour deux rayons solaires diamétralement opposés ( $Zr_1 = z - \overline{R_\odot}$  et  $Zr_2 = z + \overline{R_\odot}$ , voir la Figure 2.3), on peut déterminer l'impact de la réfraction sur la détermination du rayon solaire dans une direction donnée.  $\overline{R_\odot}$  (en radians) représente le rayon apparent du Soleil (angle sous lequel on observe notre astre).

$$R_s(Zr) = A \tan(Zr) \left[ (1 - b) - \left( b - \frac{A}{2} \right) \tan^2(Zr) + 3 \left( b - \frac{A}{2} \right)^2 \tan^4(Zr) \right] \quad (2.1)$$

$$A = \frac{273.15 \frac{P_{air}}{133.3224} (n_{air} - 1)}{760 (273.15 + T_{air})} - \frac{5.5 \cdot 10^{-8} (273.15 \text{ eh})}{273.15 + T_{air}}$$

$$Zr = z \pm \overline{R_\odot}$$

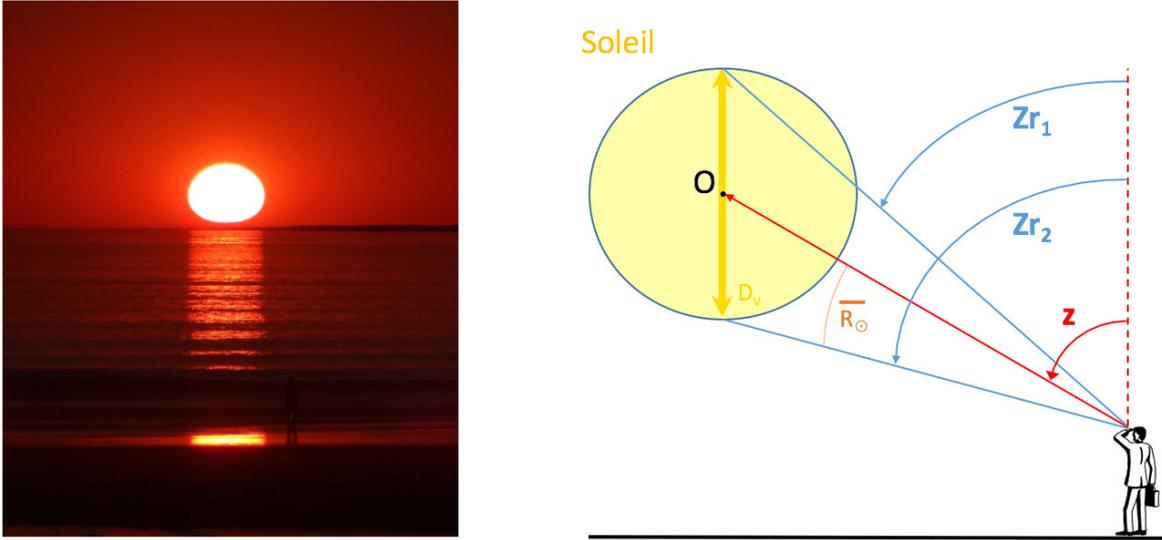
$$\text{eh} = 4.581 \frac{RH\%}{100} 2.718282^{(0.07292 T_{air} - 0.000284 T_{air}^2)}$$

$$b = 4.5054 \cdot 10^{-6} (273.15 + T_{air})$$

L'indice de réfraction de l'air est communément défini par la mise à jour de l'équation d'Edlén [Birch et Downs, 1993]. Il dépend de la pression ( $P_{air}$  en Pascal), de la température ( $T_{air}$  en °C) et de la longueur d'onde ( $\lambda$  en  $\mu m$ ). Ce modèle est assez simple à modéliser. Concernant les calculs précis [Meftah *et al.*, 2015a], j'ai utilisé la formulation de Ciddor (1996) pour déterminer l'indice de réfraction de l'air et en utilisant un modèle de réfraction développé par Thierry Corbard (OCA). La formulation de Ciddor (1996) est plus généralement utilisée et admise dans le monde scientifique.

$$(n_{air} - 1) = \left[ \frac{P_{air}(n_{air} - 1)_s}{96095.43} \left( \frac{1 + 10^{-8}(0.601 - 9.72 \cdot 10^{-3} T_{air}) P_{air}}{1 + 3.661 \cdot 10^{-3} T_{air}} \right) \right] \quad (2.2)$$

$$(n_{air} - 1)_s = \left[ 8342.54 + \frac{2406147}{130 - \frac{1}{\lambda^2}} + \frac{15998}{38.9 - \frac{1}{\lambda^2}} \right] 10^{-8}$$



**FIGURE 2.3** (Gauche) Effet de la réfraction atmosphérique lors d'un coucher de Soleil. Crédits : M. Vampouille. (Droite) Représentation schématique des angles d'observation du Soleil (modèle de réfraction). O représente le centre du Soleil.  $D_v$  représente le diamètre vertical du Soleil.  $\overline{R_{\odot}}$  correspond au rayon apparent du Soleil (au zénith, il varie entre 943.34 et 975.64 secondes d'arc au cours de l'année).  $z$  représente l'angle zénithal (complément de la hauteur d'observation). Crédits : M. Meftah.

A partir des Equations 2.1 et 2.2, l'impact de la réfraction sur la détermination du rayon solaire peut être déterminé (le biais de mesure est égal à  $R_s(Zr_2) - R_s(Zr_1)$ ). La Figure 2.4 représente l'impact de la réfraction sur la mesure du rayon solaire en fonction de l'angle zénithal. La réfraction atmosphérique est beaucoup plus importante lorsque le Soleil est proche de l'horizon plutôt que lorsqu'il se situe près du zénith. A partir de cette

méthode, il est possible de corriger les mesures réalisées par les instruments qui sont affectés par les effets de la réfraction atmosphérique. La Figure 2.5 représente l'influence de la réfraction atmosphérique sur les mesures réalisées par l'instrument SODISM II (courbe bleue) et le résultat obtenu après correction (courbe rouge). Les mesures sont accord avec les modèles développés. Le biais sur la détermination du rayon solaire peut atteindre 1.5 secondes d'arc lorsque l'on observe le Soleil près de l'horizon. Dès lors, les corrections de réfraction atmosphérique doivent être prises en compte dans les mesures du rayon solaire réalisées par l'instrument SODISM II de la mission PICARD SOL.

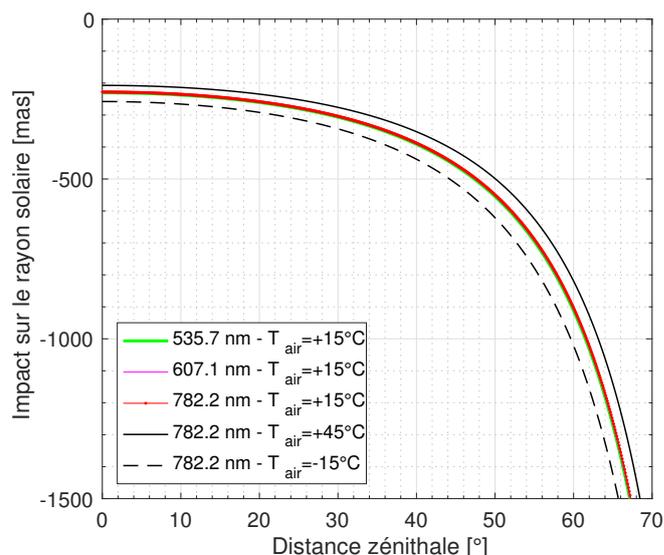


FIGURE 2.4 Impact de la réfraction sur la mesure du rayon solaire (différence entre rayon véritable et observé) pour plusieurs longueurs d'onde (535.7, 607.1 et 782.2 nm). Au zénith ( $z=0^\circ$ ), il y a malgré tout un effet de réfraction. La dépendance en longueur d'onde est faible. La température de l'air a un effet significatif sur la mesure.

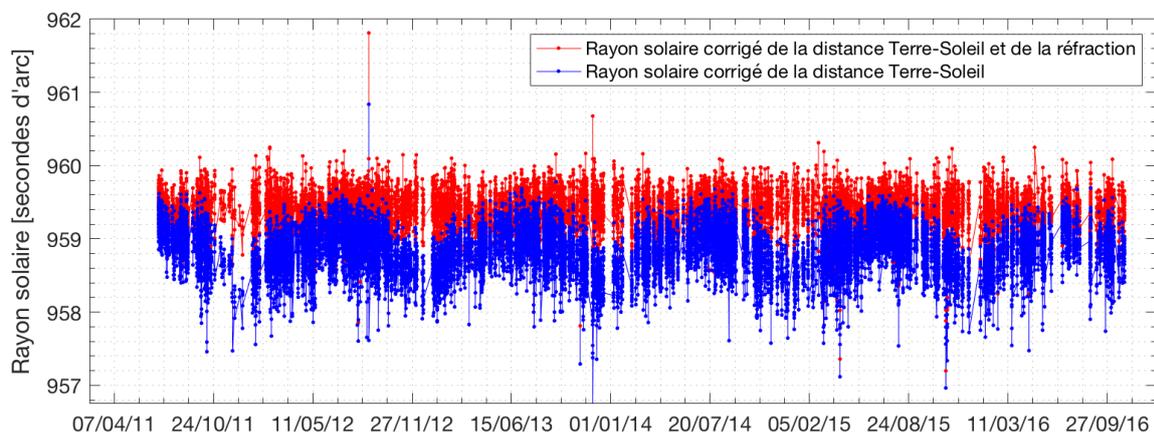


FIGURE 2.5 Evolution du rayon solaire mesuré par l'instrument SODISM II (782.2 nm) depuis mai 2011. Toutes les données ont été corrigées de la distance Terre-Soleil. La courbe de couleur rouge représente l'évolution du rayon solaire corrigé des effets de la réfraction. Les variations restantes correspondent essentiellement aux effets de la turbulence atmosphérique.

### 2.2.2 Impact de la turbulence atmosphérique

Les mesures du diamètre du Soleil réalisées avec des instruments au sol (SODISM II, *etc.*) sont perturbées par les effets de l'atmosphère, et particulièrement par la turbulence atmosphérique [Roddi<sup>er</sup>, 1981]. La conception d'un télescope nécessite la connaissance précise des effets de la turbulence atmosphérique sur de grandes échelles spatiales afin de pouvoir s'en affranchir. Dans le cas contraire, il est nécessaire de les quantifier afin d'avoir une idée sur les biais générés. La turbulence induit dans l'atmosphère terrestre des fluctuations de température et de densité qui engendrent des fluctuations de l'indice de réfraction. Le front d'onde qui se propage à travers ce milieu subit alors des déformations dues aux variations de trajet optique. Un facteur important est la qualité des images (« seeing ») qu'un site d'observation offre ; la qualité d'images est en partie conditionnée par la stabilité de l'air ambiant. Le seeing ( $s_0$ ) est le paramètre principal dans la description de la turbulence atmosphérique. Il rend compte de la dégradation de la résolution des images. Le seeing correspond à la largeur à mi-hauteur (FWHM) de l'intensité de l'image d'une source ponctuelle. On apprécie la turbulence avec le plus fin détail accessible au niveau d'un instrument de mesure. Les sites d'observation classiques ont un seeing de l'ordre de 2 à 3 secondes d'arc. Pour un excellent site d'observation (Ténériffe, Sacramento Peak), le seeing peut être de l'ordre de 1 seconde d'arc. Pour quantifier les conditions d'observation lors des mesures au sol, un des paramètres introduit est le paramètre de Fried ( $r_0$ ) qui représente la longueur de cohérence transverse de l'atmosphère. Ce paramètre correspond au diamètre d'un télescope qui en l'absence de turbulence donne des images de même résolution qu'un télescope infini en présence de turbulence. Pour le site de Calern (Observatoire de la Côte d'Azur), le paramètre de Fried est de l'ordre de 3 cm (bon site) à 535.7 nm (principale longueur d'onde d'observation de MISOLFA). Pour de très bons sites d'observation (Ténériffe, Sacramento Peak, *etc.*), le paramètre de Fried à 535.7 nm peut être bien supérieur à 7 cm.

Plus généralement, pour quantifier les conditions d'observation lors des mesures au sol, plusieurs paramètres sont introduits :

- Le paramètre de Fried ( $r_0$ ) qui est défini par le diamètre de la zone de cohérence spatiale du front d'onde ;
- L'échelle externe de cohérence spatiale du front d'onde ( $\mathcal{L}_0$ ) qui caractérise l'amplitude des déformations spatiales à grandes échelles du front d'onde. Elle traduit l'évolution basse fréquence du front d'onde. Elle varie de quelques mètres à quelques centaines de mètres ;
- Le temps caractéristique d'évolution du front d'onde qui correspond au temps durant lequel on peut considérer l'atmosphère comme figée et où les grandeurs

considérées conservent leurs cohérences temporelles. Il est de l'ordre de quelques millièmes de seconde (ms) ;

- Le domaine d'isoplanétisme (qui est fondamental en optique adaptative) définit la zone angulaire suivant laquelle les grandeurs considérées (fluctuations de phase, angles d'arrivée, *etc.*) restent similaires suivant le critère que l'on se donne.

Pour étudier les effets de la turbulence sur la mesure du diamètre du Soleil, plusieurs modèles ont été utilisés afin de déterminer la réponse impulsionnelle du système instrument-atmosphère (fonction de transfert optique de l'instrument et modèle de turbulence).

### Fonction de transfert optique de l'instrument

La fonction de transfert optique ( $H_t$ ) permet de décrire la formation d'une image par un système optique linéaire en terme de fréquences angulaires ( $\vec{f}$ ).  $\lambda$  est la longueur d'onde.  $f_{cd}$  représente la fréquence de coupure de diffraction. L'Equation 2.3 est applicable dans le cas d'un système optique avec une pupille circulaire ( $D_t$ ) et pour un éclairage cohérent.

$$H_t(\vec{f}) = \frac{2}{\pi} \left[ \arccos\left(\frac{\vec{f}}{f_{cd}}\right) - \frac{\vec{f}}{f_{cd}} \sqrt{1 - \left(\frac{\vec{f}}{f_{cd}}\right)^2} \right] \quad (2.3)$$

$$f_{cd} = \frac{D_t}{\lambda}$$

### Fonction de structure des fluctuations de phase du front d'onde

Un modèle standard de la turbulence atmosphérique utilisé pour les observations a été développé par Tatarski (1961) et par Fried (1965). Ce modèle est basé sur les travaux de Kolmogorov (1941). Dans le cas du modèle de Von Kármán, la fonction de structure de phase est donnée par l'Equation 2.4 et où  $\rho$  représente une fréquence angulaire (radians<sup>-1</sup>). Lorsque l'on considère la propagation d'une onde électro-magnétique dans un milieu turbulent vérifiant le modèle de Kolmogorov, la fonction de structure des fluctuations de phase du front d'onde mesurées au niveau du sol est donnée par l'Equation 2.5 ; elle est obtenue lorsque l'échelle externe ( $\mathcal{L}_0$ ) tend vers l'infini.

$$D_\emptyset(\vec{\rho}) = 6.88 \left(\frac{\vec{\rho}}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}} \left[ 1 - 1.485 \left(\frac{\vec{\rho}}{\mathcal{L}_0}\right)^{\frac{1}{3}} + 5.383 \left(\frac{\vec{\rho}}{\mathcal{L}_0}\right)^2 - 6.281 \left(\frac{\vec{\rho}}{\mathcal{L}_0}\right)^{\frac{7}{3}} \right] \quad (2.4)$$

$$D_\emptyset(\vec{\rho})_{\mathcal{L}_0 \rightarrow \infty} = 6.88 \left(\frac{\vec{\rho}}{r_0}\right)^{\frac{5}{3}} \quad (2.5)$$

### Fonction de transfert totale (instrument + atmosphère)

La fonction de transfert totale ( $\hat{F}_T \rightarrow$  instrument + atmosphère) dépend de la fonction de transfert optique de l'instrument et de la fonction de structure basée sur le modèle de Kolmogorov (Equation 2.6).  $f_{ct}$  représente la fréquence de coupure liée à la turbulence.

$$\hat{F}_T(\vec{f}) = H_t(\vec{f}) * \exp\left(-0.5 D_0 (\lambda \vec{f})\right) = H_t(\vec{f}) * \exp\left(-3.44 \left(\frac{\vec{f}}{f_{ct}}\right)^{\frac{5}{3}}\right) \quad (2.6)$$

$$f_{ct} = \frac{r_0}{\lambda}$$

### Réponse impulsionnelle du système instrument-atmosphère et convolution

La transformée de Fourier inverse de la fonction de transfert totale ( $\hat{F}_T$ ) représente la réponse impulsionnelle spatiale du système instrument-atmosphère. Le limbe solaire vu par ce système ( $LDF_t(r)$ ) est obtenu en faisant le produit de convolution de la forme du limbe solaire ( $LDF_\odot$ ) avec la réponse impulsionnelle du système instrument-atmosphère (Equation 2.7). Le diamètre du Soleil obtenu par la mesure d'un télescope observant depuis le sol sera toujours inférieur à la « vraie valeur » (voir la Figure 2.8).

$$LDF_t(r) = LDF_\odot \otimes \mathcal{F}^{-1} \left[ \hat{F}_T(\vec{f}) \right] \quad (2.7)$$

Pour de longs temps de pose de quelques secondes (c'est le cas pour SODISM II), le modèle de Kolmogorov sans échelle de temps caractéristique est applicable. Par ailleurs,  $r_0$  est lié à la largeur à mi-hauteur (FWHM). Pour un télescope dont le diamètre de la pupille ( $D_t$ ) est bien supérieur à  $r_0$ , nous avons :  $\text{FWHM} \simeq 0.98 \lambda / r_0$ . Lorsque  $r_0$  tend vers l'infini, la résolution est limitée par la diffraction ( $\text{FWHM} \simeq 1.22 \lambda / D_t$ ). Lorsque  $r_0$  tend vers 1 (mauvais site d'observation), on comprend alors que la turbulence peut avoir un effet catastrophique sur la résolution d'une image d'un télescope.

### Impact de la turbulence sur la détermination du diamètre solaire

A Calern, le paramètre de Fried ( $r_0$ ) peut varier typiquement entre  $\sim 1$  cm et  $\sim 7$  cm lors d'une prise image SODISM II. La Figure 2.6 représente les réponses impulsionnelles du système instrument-atmosphère pour différentes valeurs du paramètre de Fried. La turbulence atmosphérique provoque un étalement et une agitation du bord solaire lorsque  $r_0$  est important (Figure 2.7). Cela génère un déplacement de la position du point d'inflexion de la courbe d'assombrissement centre-bord (Figure 2.8).

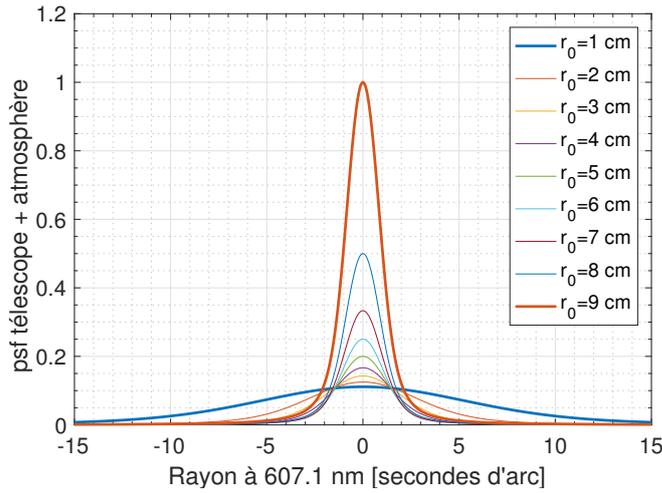


FIGURE 2.6 Réponses impulsionnelles du système instrument atmosphère à 607.1 nm pour différentes valeurs du paramètre de Fried ( $r_0$ ). Les paramètres instrumentaux utilisés sont : focale de l'instrument ( $f_t$ ) de 2.626 m, taille du pixel de  $13.5 \mu\text{m}$  et diamètre de la pupille ( $D_t$ ) de 9 cm.

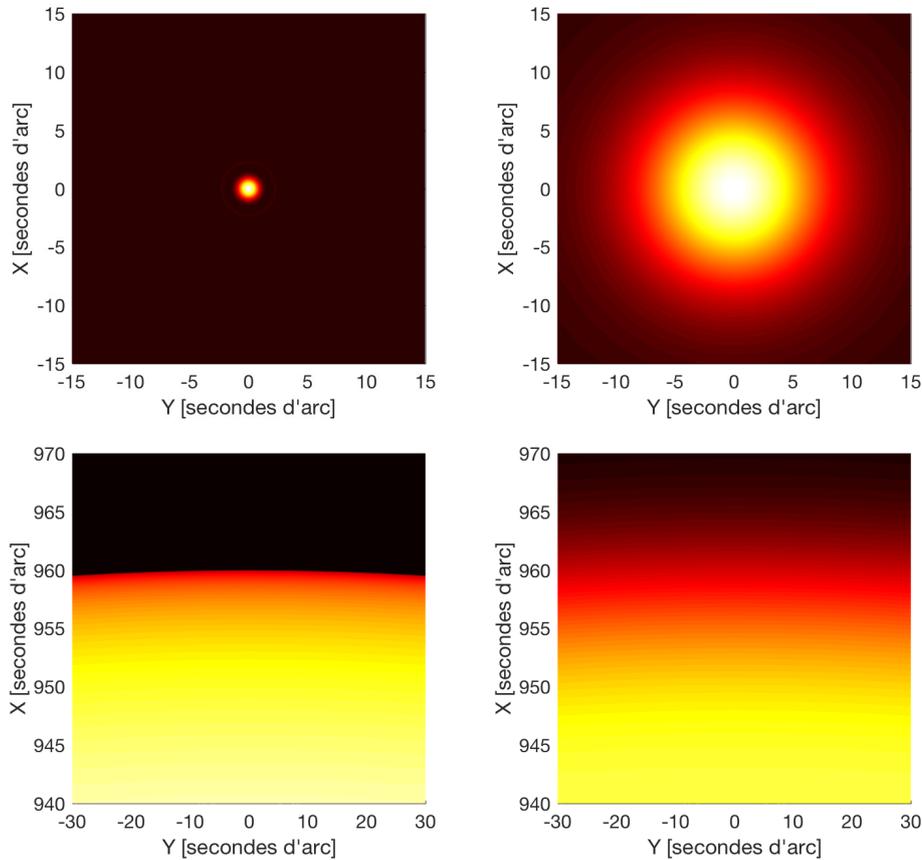
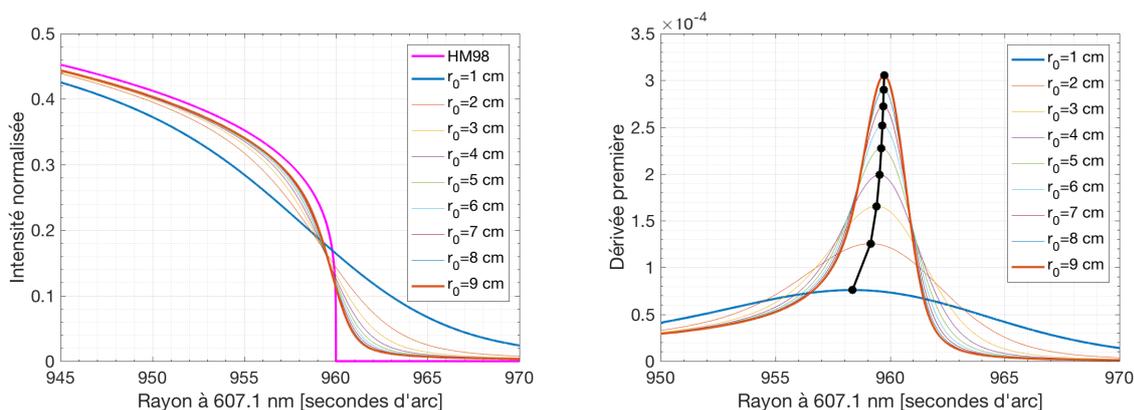
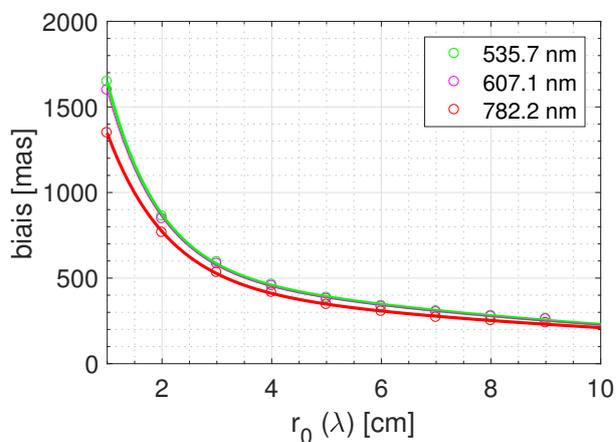


FIGURE 2.7 (A Gauche et en Haut) psf du système instrument-atmosphère à 607.1 nm lorsque les effets de la turbulence sont faibles (paramètre de Fried  $r_0=9$  cm). La résolution est limitée par la diffraction au niveau de l'image. (A Gauche et en Bas) Image du Soleil vue par le système instrument-atmosphère ( $r_0=9$  cm). (A Droite et en Haut) psf du système instrument-atmosphère à 607.1 nm lorsque les effets de la turbulence sont importants ( $r_0=1$  cm). La turbulence atmosphérique provoque un étalement du bord solaire au niveau de l'image. (A Droite et en Bas) Image du Soleil vue par le système instrument-atmosphère ( $r_0=1$  cm).



**FIGURE 2.8** (Gauche) Profils d'assombrissement centre bord (à 607.1 nm) obtenus en fonction de différentes valeurs du paramètre de Fried. (Droite) Dérivée première du profil d'assombrissement centre bord et localisation de la position du point d'inflexion.

La Figure 2.9 représente l'impact de la turbulence sur la mesure du rayon solaire en fonction du paramètre de Fried (utilisation du modèle de Kolmogorov qui est adéquat pour cette analyse). Le biais sur la détermination du rayon solaire peut dépasser 1 seconde d'arc lorsque le paramètre de Fried est faible. La Figure 2.5 représente l'influence de la turbulence sur les mesures réalisées par SODISM II (courbe rouge). Les variations du rayon solaire peuvent atteindre 1 seconde d'arc. MISOLFA qui accompagne la mission sol de PICARD fournit certains paramètres de la turbulence atmosphérique ( $r_0$  moyen de  $\sim 3$  cm à 535.7 nm). En principe, à partir des mesures de MISOLFA, il est possible de remonter à un modèle de turbulence atmosphérique et donc à la psf de l'atmosphère, allant en principe jusqu'à la possibilité de déconvolution des images. Pour s'affranchir des effets de l'atmosphère, la détermination absolue du diamètre solaire peut être obtenue à partir d'un télescope spatial tel que MDI, HMI ou SODISM.



**FIGURE 2.9** Impact de la turbulence sur la mesure du rayon solaire pour plusieurs longueurs d'onde (535.7, 607.1 et 782.2 nm). Le paramètre de Fried est un paramètre chromatique; ainsi, il existe une dépendance en longueur d'onde ( $r_0$  est proportionnel à  $\lambda^{6/5}$ ).

## 2.3 Détermination absolue du diamètre solaire

Comme démontré au niveau de la Section 2.2, l'atmosphère affecte les mesures du diamètre solaire réalisées au sol. La détermination de la valeur absolue du diamètre du Soleil avec des instruments en orbite et hors atmosphère paraît fondamentale (impact de l'atmosphère sur les mesures au sol et contrôle du vieillissement des instruments spatiaux). Cependant, les mesures réalisées en orbite et hors atmosphère sont peu nombreuses (SDS, MDI, HMI et SODISM). Pour que la mesure soit fiable, les instruments doivent disposer d'une référence angulaire interne afin de disposer d'un étalonnage (connaissance du facteur d'échelle). SDS est un des rares instruments à disposer d'une référence angulaire interne. Pour l'instrument MDI, le passage de Mercure a été utilisé pour déterminer la référence angulaire de l'instrument. Pour l'instrument HMI, le passage de Vénus a été utilisé pour déterminer sa référence angulaire. Concernant SODISM, la référence angulaire de l'instrument a été déterminée pendant le passage de Vénus de juin 2012 pour plusieurs longueurs d'onde (393.37, 535.7, 607.1 et 782.2 nm).

### 2.3.1 Passage de Vénus du 5 et 6 juin 2012

Le dernier passage de Vénus du vingt-et-unième siècle devant le disque solaire a eu lieu les 5 et 6 juin 2012. Il s'agissait du deuxième passage dans le cycle court de huit ans, après celui du 8 juin 2004. Le prochain passage de Vénus aura lieu le 11 décembre 2117. Ainsi, il s'agit d'un phénomène astronomique extrêmement rare mais très intéressant à étudier pour de multiples raisons telles que :

1. Le calcul de la taille du système solaire en employant la méthode des parallaxes : à partir de la connaissance du rayon de la Terre et de la détermination de la parallaxe équatoriale (angle « observateur à l'équateur - Soleil à l'horizon - centre de la Terre »), la distance Terre-Soleil peut être déduite. La détermination de cet angle est obtenue en observant le passage de Vénus devant le Soleil depuis au moins deux points différents sur Terre. Du fait de la parallaxe équatoriale ( $\Pi_{\odot}$ ), le temps de passage de Vénus devant le Soleil est différent en ces deux points, et la connaissance de cette différence permet de trouver la valeur de la parallaxe.
2. Les méthodes de détection d'exoplanètes : il est nécessaire de consolider les techniques développées pour l'analyse de la structure, de la composition, et de la dynamique de l'atmosphère d'une exoplanète en utilisant le passage de Vénus.
3. L'étude de l'atmosphère de Vénus : pendant le passage de Vénus, il est possible d'observer la partie de l'atmosphère située au-dessus des nuages. Lorsque Vénus est en contact avec le bord solaire, un arc de lumière à l'intensité variable souligne

la planète Vénus du côté opposé en formant une auréole. Cette auréole, également appelée anneau de Lomonosov, correspond à la lumière réfractée par les hautes couches atmosphériques de Vénus (de 65 à 120 kilomètres pour la mésosphère). A partir de l'étude de la photométrie de cette auréole, on peut déterminer les paramètres atmosphériques de Vénus (échelle de hauteur, altitude des nuages). La brillance de l'auréole et son étendue sont fonction de la densité et de la température des couches atmosphériques traversées.

4. La détermination du diamètre solaire : à partir des éphémérides de Vénus et du Soleil utilisées comme référence angulaire, il est possible de déterminer avec précision le diamètre de notre astre. Cette détermination peut aussi être réalisée pendant les instants de contact entre Vénus et le Soleil. Cependant, le phénomène de « goutte noire » (effet optique visible au moment où le disque de Vénus est à l'intérieur du disque solaire) compromet la précision des résultats. En fait, une petite larme noire (effet de diffraction des instruments d'observation et de l'assombrissement centre-bord du limbe solaire) semble connecter le disque de la planète avec la frontière du limbe solaire, rendant très difficile la datation précise du premier contact.

Comme indiqué précédemment, le passage de Vénus est un phénomène extrêmement rare où les trois astres (Soleil, Terre et Vénus) se retrouvent parfaitement alignés. Cet événement se produit lorsque la Terre et Vénus sont en conjonction, au moment où ces deux planètes se croisent sur la ligne d'intersection de leurs plans orbitaux. Les passages de Vénus se renouvellent suivant un cycle précis (121.5 ans – 8 ans – 105.5 ans – 8 ans – ... 243 ans). La première observation attestée date du 4 décembre 1639. Depuis, plusieurs passages de Vénus ont eu lieu (le 6 juin 1761, le 3 juin 1769, le 9 décembre 1874, le 6 décembre 1882, le 8 juin 2004 et le 6 juin 2012).

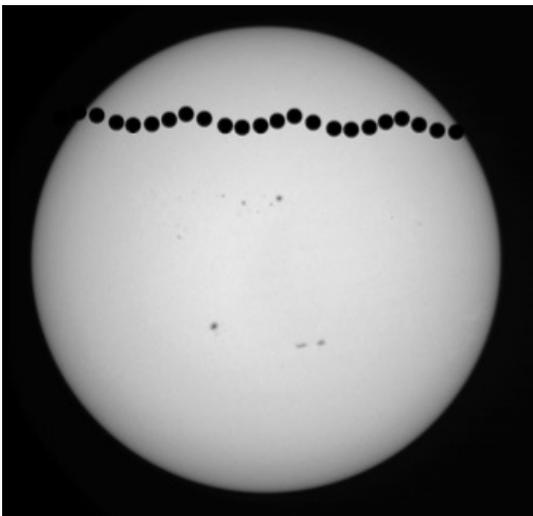
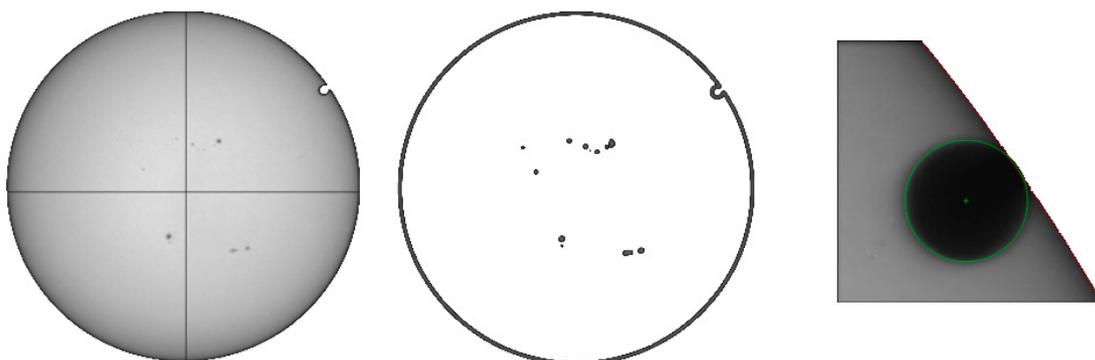


FIGURE 2.10 Le passage de Vénus devant le Soleil (déplacement de gauche à droite) vu par les instruments du satellite PICARD en juin 2012. Les oscillations sont liées au déplacement du satellite autour de son orbite (période de  $\sim 100$  mn). Le premier contact a eu lieu le 5 juin 2012 vers 22h03 suivi par le second contact vers 22h32. Vénus a touché l'autre bord du Soleil lors du troisième contact le 6 juin 2012 vers 04h32 suivi par le quatrième contact vers 04h44.



**FIGURE 2.11** (Gauche) Image du Soleil acquise par l'instrument SODISM à 607.1 nm pendant le passage de Vénus (6 juin 2012 à 04h31 UTC). (Centre) Contours de l'image solaire obtenus à partir de la position des points d'inflexion de la courbe d'assombrissement centre bord, localisation des taches solaires, et position de Vénus lors du troisième contact. (Droite) Observation du troisième contact pendant le passage de Vénus.

Le 5 et le 6 juin 2012, le satellite PICARD en orbite héliosynchrone autour de la Terre a observé le Soleil pendant le passage de Vénus. La trajectoire apparente de Vénus sur le Soleil (Figure 2.10) vue par le satellite PICARD dépend de sa localisation au niveau de son orbite (735 km d'altitude,  $98.28^\circ$  d'inclinaison et une heure locale au nœud ascendant de 06H00). Vénus obscurcit alors le Soleil sur une très petite partie de sa surface. Le passage de Vénus est utilisé pour déterminer le facteur d'échelle du télescope SODISM (Table 1.5) pour les différentes longueurs d'onde de l'instrument. A partir de la connaissance de la position du satellite, les coordonnées du centre du Soleil et de Vénus sont obtenues à partir du calcul des éphémérides (résultats exprimés en secondes d'arc) conformément à la méthodologie décrite au niveau de l'Annexe B. A partir des images acquises par l'instrument SODISM, les coordonnées du centre de notre étoile et celles de Vénus ont été déterminées (résultats fournis en pixels dans le plan image du télescope). Ainsi, il est possible de calculer le facteur d'échelle du télescope (secondes d'arc par pixel) à un instant donné et pour les différentes longueurs d'onde d'observation de l'instrument. A partir de la connaissance du facteur d'échelle du télescope, la détermination de la valeur absolue du diamètre solaire est obtenue. Plusieurs images du Soleil ont été acquises pendant les différentes phases du passage de Vénus (Table 2.3). Vu par le satellite PICARD, le passage de Vénus a commencé le 5 juin 2012 à  $\sim 22\text{h}03$  UTC et il s'est terminé le 6 juin 2012 à  $\sim 04\text{h}44$  UTC. Plusieurs images du Soleil ont été acquises à 607.1 nm de 22h00 à 22h40 UTC pendant le premier et le deuxième contact. A l'issue du deuxième contact, environ 20 images du Soleil ont été acquises pour chaque longueur d'onde (393.37, 535.7, 607.1 et 782.2 nm). A la fin

du passage de Vénus, plusieurs images du Soleil ont été acquises à 607.1 nm de 04h20 à 05h00 UTC au cours du troisième (Figure 2.11) et du quatrième contact.

**TABLE 2.3** Principaux événements du passage de Vénus. Le premier contact correspond au moment où Vénus est complètement hors du disque solaire et se dirige vers lui. Le deuxième contact représente le moment où Vénus est dans le disque solaire et se dirige vers l'intérieur. Le troisième contact correspond au moment où Vénus est dans le disque solaire et se dirige vers l'extérieur. Le quatrième contact représente l'instant où Vénus est complètement hors du disque solaire et s'éloigne de lui.

Événement	1 <sup>er</sup> contact	2 <sup>ème</sup> contact	3 <sup>ème</sup> contact	4 <sup>ème</sup> contact
Temps (UTC)	~ 22h03:00	~ 22h32:30	~ 04h30:50	~ 04h43:30

### 2.3.2 Détermination de la position de Vénus et de son rayon apparent

Cette section décrit la méthode utilisée pour obtenir une partie des paramètres nécessaires à la détermination du facteur d'échelle de l'instrument SODISM. Six étapes sont nécessaires pour pouvoir déterminer les coordonnées du centre de Vénus et son rayon apparent. Pour chaque image acquise, cette méthodologie est appliquée.

#### 1<sup>ère</sup> étape – Suppression du bruit dans les images

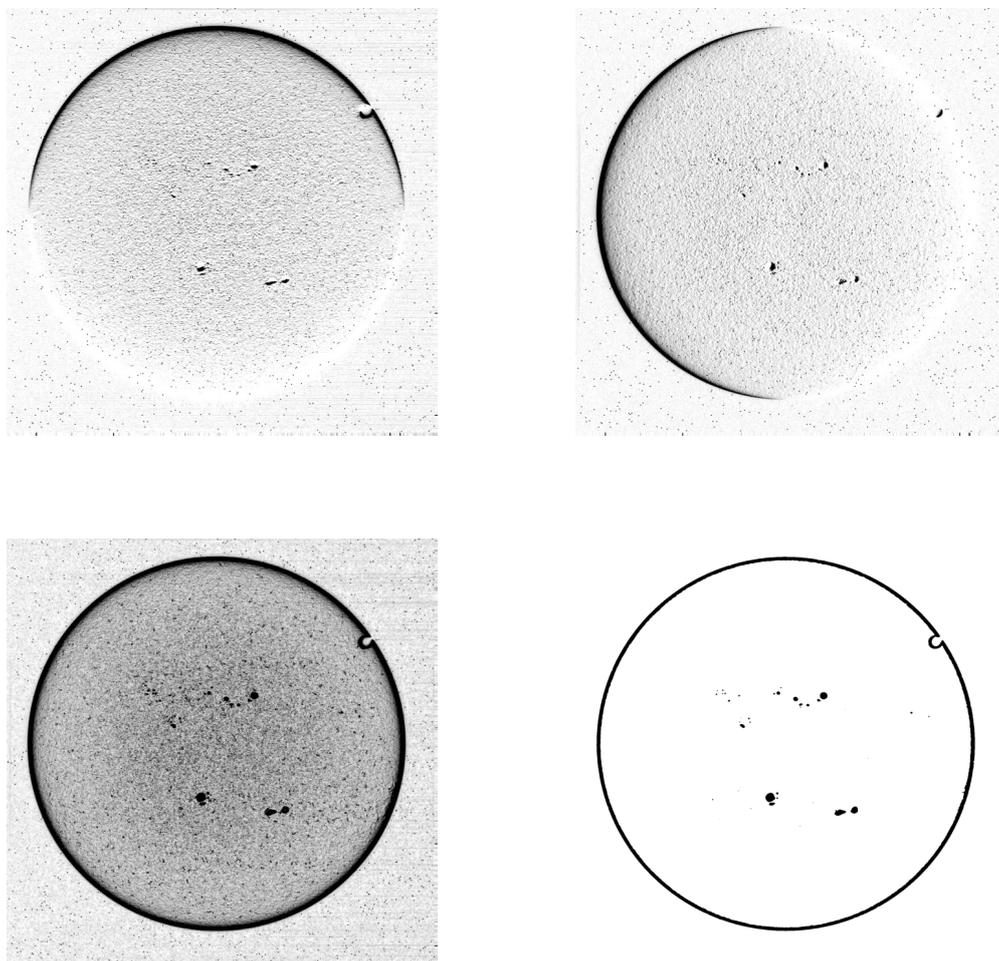
L'image d'origine est traitée avec un filtre médian afin de supprimer la majeure partie des pixels aberrants. Ensuite, un filtrage gaussien à deux dimensions est appliqué et permet de lisser les bords de l'image. L'origine du flou au niveau des bords de Vénus est liée à son déplacement (de l'ordre de 0.05 secondes d'arc par seconde de temps) et à la fonction d'étalement du point du télescope (effet de la psf). L'impact sur la qualité de l'extraction des contours est très faible.

#### 2<sup>ème</sup> étape – Extraction des contours

Les contours sont extraits en utilisant le filtre de Sobel (opérateur utilisé en traitement d'image pour la détection de gradients) puis le filtre de Canny (outil qui permet une bonne détection des contours, une bonne localisation et une clarté de la réponse).

Un exemple d'extraction de gradients sur une image est représenté au niveau de la Figure 2.12 en utilisant l'image du Soleil acquise par l'instrument SODISM à 607.1 nm

le 6 juin 2012 à 04h31 UTC. La mise en évidence des contours peut se faire notamment par différentiation de l'image, grâce à des filtres représentant des opérateurs de différentiation tels que les filtres de Sobel et de Canny.



**FIGURE 2.12** (Haut) Image de gauche correspondant au gradient horizontal ( $I_{Gh}$ ). Image de droite correspondant au gradient vertical ( $I_{Gv}$ ). (Bas) Image de gauche représentant la norme du gradient ( $I_{Gn}$ ). Image de droite représentant la norme du gradient avec l'utilisation d'un seuil ( $I_c$ ).

Le principe du filtre de Sobel représente un opérateur qui calcule le gradient de l'intensité de chaque pixel. Le filtre de Sobel est une variante du filtre de Prewitt mais permet de privilégier le calcul suivant certaines directions (horizontale et verticale dans notre cas). Le calcul du gradient de l'image initiale ( $I_i$ ) est mené par l'intermédiaire de deux masques, le premier effectuant un gradient horizontal ( $M_s$ ) et le second un gradient vertical (transposée de la matrice  $M_s$ ). L'image initiale ( $I_i$ ) est convoluée avec ces deux masques (Equation 2.8) afin de créer deux nouvelles images ( $I_{Gh}$  et  $I_{Gv}$ ). En chaque

point, ces deux images contiennent des approximations de la dérivée horizontale et verticale de chaque point. Ensuite, les images des gradients horizontaux et verticaux sont combinées en chaque point pour former une nouvelle image qui représente la norme du gradient ( $I_{Gn}$ ). Puis, il est nécessaire d'introduire un seuil au niveau de l'image de la norme du gradient ( $I_{Gn}$ ) afin de créer une nouvelle image épurée ( $I_c = (I_{Gn} > 4/3)$ ) qui met en évidence les détails nécessaires à l'analyse. Enfin, l'extraction du contour est obtenue en utilisant le filtre de Canny (après l'estimation du gradient de l'image à l'aide du filtre de Sobel, un seuillage par hystérésis du module du gradient est réalisé).

$$I_{Gh} = M_s \otimes I_i \quad (2.8)$$

$$I_{Gv} = M_s^T \otimes I_i$$

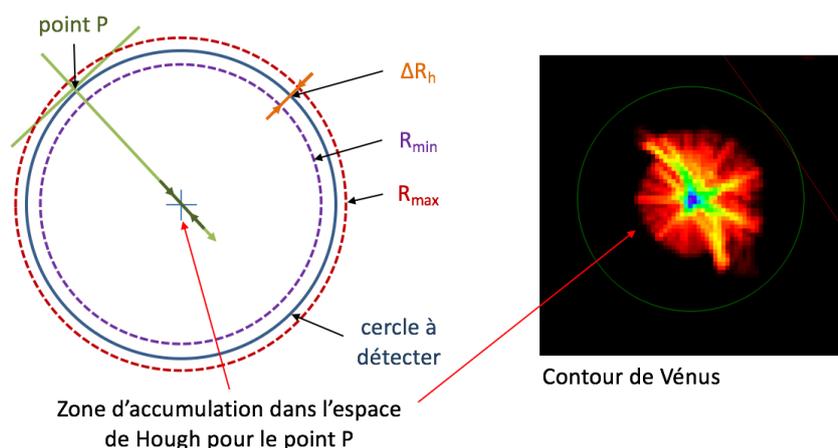
$$M_s = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$I_{Gn} = \sqrt{I_{Gh}^2 + I_{Gv}^2}$$

### 3<sup>ème</sup> étape – Détection des cordonnées de Vénus (centre de la planète) en utilisant la transformée de Hough

La transformée de Hough [Hough et Paul, 1962; Duda et Hart, 1972] est utilisée en segmentation d'images ; cette méthode est peu sensible au bruit et permet de détecter des formes géométriques dans une image donnée. La transformée de Hough a été initialement développée pour détecter des alignements de points. Cette méthode permet entre autres de détecter des droites. Ainsi, pour chaque point d'un contour, on considère toutes les droites qui passent par ce point. Ensuite, par principe de vote, les droites les plus citées sont celles présentes dans l'image. La transformée de Hough est une méthode efficace qui permet aussi de détecter le centre d'un cercle de rayon  $R_h$ . Le principe d'accumulation dans l'espace de Hough (Figure 2.13) a été utilisé pour localiser le centre de la planète Vénus (Figure 2.11) à partir des images acquises par l'instrument SODISM les 5 et 6 juin 2012. Le principe mis en place est le suivant [Meftah et al., 2014c] :

- Détection d'un cercle de rayon  $R_h$  défini par un rayon minimum ( $R_{min}$ ) et un rayon maximum ( $R_{max}$ ),
- Propagation le long de la tangente en chaque point  $P$  du contour et accumulation pour le segment  $[R_{min} R_{max}]$ ,
- Détection du centre par recherche d'un maximum local dans la carte d'accumulation (Figure 2.13).

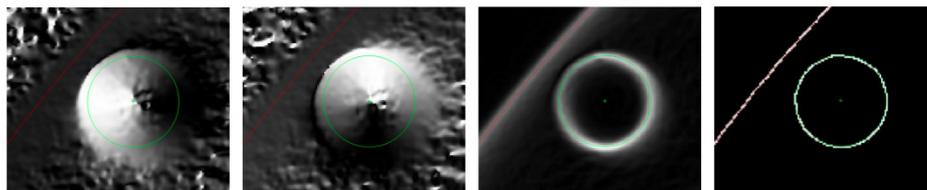


**FIGURE 2.13** (Gauche) Accumulation dans l'espace de Hough pour détecter le centre de Vénus. (Droite) Carte d'accumulation de Hough.

#### 4<sup>ème</sup> étape – Extraction des points d'inflexion des contours du disque

Cette étape consiste à déterminer la position de l'ensemble des points du contour du disque de Vénus détecté avec les filtres de Sobel et de Canny (Figure 2.14). La position du centre a été estimée avec la transformée de Hough. A partir du centre du disque (Figure 2.13), plusieurs segments sont tracés suivant les différentes directions angulaires (de 0 à 360°) du disque de Vénus. A partir de ces multiples segments, on obtient une multitude de courbes d'assombrissement centre bord de Vénus. Un point d'inflexion correspond au point où s'opère le changement de concavité d'une courbe d'assombrissement centre bord. La position du point d'inflexion est obtenue à partir de la dérivée seconde de la courbe d'assombrissement centre bord où le signal s'annule et change de signe. Ainsi, pour chaque segment, la position du point d'inflexion est calculée. La position de l'ensemble des points du contour du disque de Vénus est alors déterminée.

**FIGURE 2.14** Image du Soleil acquise par l'instrument SODISM le 5 juin 2012 à 22h40 UTC à 607.1 nm. Les trois premières figures de gauche à droite correspondent à un gradient vertical, à un gradient horizontal et à la norme du gradient (filtre de Sobel). La quatrième figure correspond à une extraction de contours obtenue avec le filtre de Canny (à partir de la norme du gradient).



### 5<sup>ème</sup> étape – Caractérisation de l'ellipse

A partir de la position de l'ensemble des points du contour du disque de Vénus, une ellipse peut alors déterminée avec la méthode des moindres carrés. Le centre de cette ellipse est calculé. A partir de la nouvelle position du centre du disque, plusieurs segments sont tracés à nouveau suivant les différentes directions angulaires (de 0 à 360°) du disque de Vénus. L'extraction des points d'inflexion des contours du disque est à nouveau réalisée. La nouvelle position de l'ensemble des points du contour du disque de Vénus est alors déterminée. A partir de la nouvelle position de l'ensemble des points du contour du disque de Vénus, une nouvelle ellipse peut alors déterminée avec la méthode des moindres carrés. Ce processus est répété jusqu'à ce que la distance entre deux centres consécutifs soit inférieure à la valeur d'un critère d'arrêt (0.02 pixel). Le calcul converge assez rapidement. A la fin de cette étape, le centre du disque est déterminé avec précision (mieux que 0.2 pixel) tout comme la position des différents points du contour.

### 6<sup>ème</sup> étape – Détermination du rayon apparent de Vénus

Le rayon apparent de Vénus est déterminé à partir de la position des différents points du contour (grand axe de l'ellipse, petit axe de l'ellipse, et rayon moyen qui correspond à la moyenne des différents rayons calculés entre 0 et 360° à partir de la position des points d'inflexion).

#### 2.3.3 Détermination de la position du Soleil et de son rayon apparent

La position du centre du Soleil a été estimée avec la transformée de Hough. A partir du centre du disque estimé, 4000 segments sont tracés suivant les différentes directions angulaires (de 0 à 360°) du disque solaire. A partir des ces segments, on obtient 4000 courbes d'assombrissement centre bord du Soleil. Chaque courbe d'assombrissement centre bord du Soleil est ajustée avec un polynôme d'ordre 5 (coefficient de corrélation et écart-type résiduel). De manière générale, les ajustements avec des polynômes divergent aux extrémités et sont donc déconseillés ; malgré tout, la zone où se situe la position du point d'inflexion est très loin des extrémités du profil. D'autres ajustements auraient pu être utilisés tels que les polynômes de Lagrange qui décrivent bien l'allure du profil solaire. La position de chaque point d'inflexion est obtenue à partir de la dérivée seconde de chaque courbe d'assombrissement ajustée. Ainsi, pour chaque segment, la position du point d'inflexion est calculée. A partir de la position de l'ensemble des points du contour du disque du Soleil, une ellipse peut alors être déterminée avec la méthode des moindres

carrés. Le centre de cette ellipse est alors déterminé. Afin de raffiner la position de l'ensemble des points du contour du disque solaire et de son centre, un processus itératif similaire à celui utilisé pour Vénus est appliqué (distance entre deux centres consécutifs inférieure à 0.001 pixel). Le rayon apparent du Soleil est finalement déterminé à partir de la position des différents points du contour.

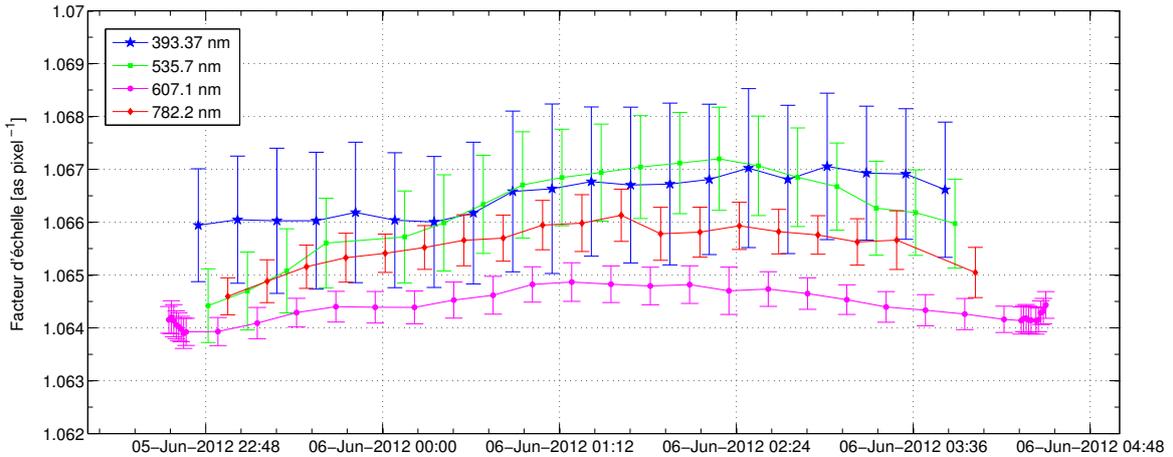
#### 2.3.4 Détermination du facteur d'échelle de l'instrument SODISM

Le passage de Vénus a été utilisé pour étalonner l'instrument SODISM (facteur d'échelle et psf). Le passage d'une planète devant le Soleil (Mercure et Vénus) a parfois été utilisé pour étalonner des télescopes solaires spatiaux [Auchère *et al.*, 2000; Shimizu *et al.*, 2007; Meftah *et al.*, 2014c]. Pour déterminer le facteur d'échelle du télescope SODISM, il est nécessaire de calculer les positions de Vénus et du Soleil obtenues à partir des images acquises par l'instrument (Sections 2.3.2 et 2.3.3). Il faut aussi déterminer les éphémérides de Vénus et du Soleil vues depuis le satellite PICARD (Annexe B). Le calcul des éphémérides nécessite la connaissance de la position du satellite au niveau de son orbite, de la position de Vénus et de la position du Soleil dans le système de coordonnées J2000 (jour julien 2,451,545.0, soit le premier janvier 2000). Les coordonnées du satellite PICARD sont corrigées de la précession [Capitaine *et al.*, 2003], de la nutation [Seidemann, 1992] et des aberrations dues à la vitesse du satellite (Annexe B). Ces calculs introduisent une incertitude sur la mesure du rayon solaire qui est de l'ordre de 0.1 mas. Les théories planétaires [Fienga *et al.*, 2008] sont utilisées pour déterminer les positions de Vénus et du Soleil. Ces calculs introduisent une incertitude dans la détermination du rayon solaire qui est de l'ordre de 5 mas (Table 2.4). Cette incertitude peut être considérée comme négligeable, contrairement à l'incertitude associée à la datation des images (80 mas d'incertitude vis à vis de la détermination du rayon solaire). Cependant, l'incertitude liée à la datation peut être considérée comme identique pour toutes les acquisitions d'images réalisées pendant le passage de Vénus (introduction d'un biais systématique quasi identique pour toutes les images acquises). Ainsi, l'incertitude associée à la datation peut être considérée comme nulle. La principale incertitude dépend de la détermination précise de la position de Vénus et du Soleil à partir des méthodes de détection développées (jusqu'à quelques dixièmes de pixels d'erreur dans la détection des centres). Pour rappel, les positions de Vénus et du Soleil sont déterminées pour chaque image acquise par l'instrument ; la distance entre le centre de Vénus et du Soleil est calculée en pixels. A partir des éphémérides, la distance entre le centre de Vénus et le centre du Soleil est calculée en secondes d'arc. Ainsi, pour chaque image acquise au cours du passage de Vénus, un facteur d'échelle est déterminé (seconde d'arc par pixel).

**TABLE 2.4** Budget d’erreurs ( $\xi$ ) associé à la détermination du facteur d’échelle du télescope SODISM (à 607.1 nm) en fonction de la nature de l’erreur (A pour une erreur aléatoire et S pour une erreur systématique).

Source d’erreur	$\xi$ typique	$\xi$ du facteur d’échelle	Type
Centre de Vénus	$<0.2$ pixel	$<2.3 \times 10^{-4}$ as pixel $^{-1}$	A
Centre du Soleil	$<0.01$ pixel	$<1.2 \times 10^{-5}$ as pixel $^{-1}$	A
Position des étoiles et des planètes	5 mas	$5.8 \times 10^{-6}$ as pixel $^{-1}$	S
Datation des images	80 mas	$9.3 \times 10^{-5}$ as pixel $^{-1}$	S
Position du satellite PICARD	0.1 mas	$1.2 \times 10^{-7}$ as pixel $^{-1}$	A

La Figure 2.15 représente l’évolution au cours du temps du facteur d’échelle ( $PS$ ) de l’instrument SODISM pour les différentes longueurs d’onde d’observation. Le facteur d’échelle de l’instrument dépend de la longueur d’onde d’observation ( $\lambda$ ), du temps ( $t$ ), de la position radiale du centre vers le bord solaire ( $r$ ) et de la position angulaire ( $\theta$ ) au niveau de l’image (Figure 2.16, gauche).

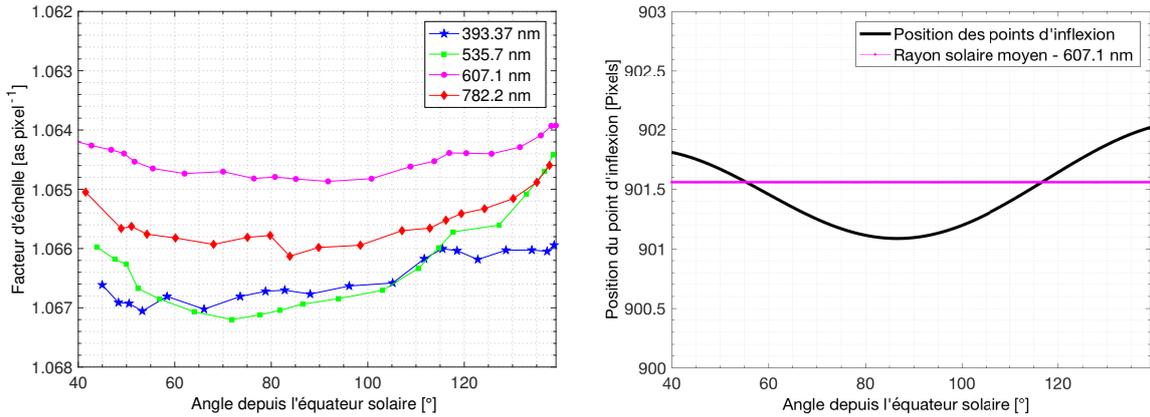


**FIGURE 2.15** Evolution du facteur d’échelle de l’instrument SODISM pendant le passage de Vénus pour plusieurs longueurs d’onde. La valeur moyenne du facteur d’échelle à 607.1 nm est de  $1.0643$  as pixel $^{-1}$  avec un écart-type de  $3 \times 10^{-4}$  as pixel $^{-1}$  à  $1\sigma$ .

### 2.3.5 Distorsion optique et déformation de l’image

Par ailleurs, les images acquises par l’instrument SODISM montrent qu’il existe une distorsion optique non négligeable au niveau du télescope. Par conséquent, les mesures réalisées doivent être corrigées de cet effet de déformation de l’image. L’erreur sur la

connaissance de la distorsion de l'image est extrêmement faible puisque 1040 images sont utilisées pour obtenir cette information. En effet, la fonction de correction de la déformation de l'image solaire ( $F_d^{t_d}(\theta)$ ) est obtenue lors des opérations d'étalonnage de l'instrument SODISM (rotations du satellite) à un instant donné ( $t_d$ ) et à une longueur d'onde donnée ( $\lambda$ ). Un exemple de distorsion optique obtenue à 607.1 nm est représenté au niveau de la Figure 2.16 (droite). La distorsion de l'image obtenue à partir de la détermination de la position des points d'inflexion à 607.1 nm est de l'ordre du pixel. Cette distorsion est principalement causée par la psf de l'instrument qui est non-isotrope et non-axisymétrique.



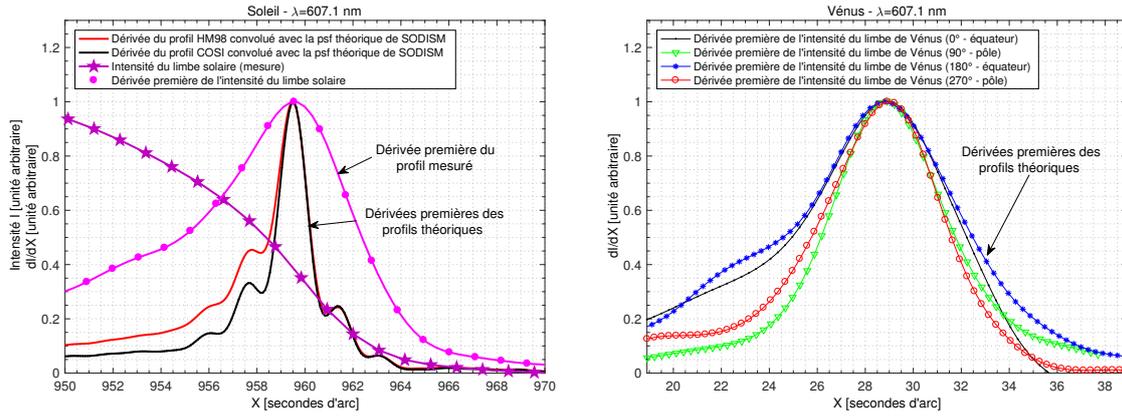
**FIGURE 2.16** (Gauche) Evolution du facteur d'échelle en fonction de la position angulaire (de l'équateur vers le pôle Nord du Soleil en sens trigonométrique) et pour chaque longueur d'onde d'observation. (Droite) Distorsion optique du télescope mesurée à 607.1 nm lors d'une opération de rotation du satellite réalisée en août 2012 (1040 images ont été utilisées). La distorsion de l'instrument SODISM explique de manière satisfaisante la variation du facteur d'échelle. La correction de distorsion optique est nécessaire.

### 2.3.6 Profils d'assombrissement centre bord du Soleil et de Vénus

L'analyse des profils d'assombrissement centre bord du Soleil et de Vénus nous renseigne sur la qualité d'image du télescope ( $\text{psf}_t$ ). Le profil observé à 607.1 nm ( $LDF_t$ ) a été comparé à deux profils théoriques vus par l'instrument ( $LDF_t(\text{HM98})$  et  $LDF_t(\text{COSI})$ ). Un profil théorique dépend de la psf théorique du télescope ( $\text{psf}_t$ ) et du modèle d'assombrissement centre bord utilisé (HM98 [Hestroffer et Magnan, 1998] ou COSI [Haberreiter et al., 2008; Shapiro et al., 2010]).

$$LDF_t(\text{HM98}) = LDF_{\odot}(\text{HM98}) \otimes \text{psf}_t$$

$$LDF_t(\text{COSI}) = LDF_{\odot}(\text{COSI}) \otimes \text{psf}_t$$



**FIGURE 2.17** (Gauche) Courbe d’assombrissement centre bord du Soleil (intensité du limbe solaire) mesurée par l’instrument SODISM à 607.1 nm le 6 juin 2012 à 04h27 UTC. Dérivées premières des profils d’assombrissement centre bord théoriques et mesurés. (Droite) Dérivées premières des profils d’assombrissement centre bord de Vénus mesurés lors du passage de la planète (6 juin 2012 à 04h27 UTC). Plusieurs profils sont proposés en fonction des différentes directions angulaires.

L’étalement de l’image (largeur à mi-hauteur ou FWHM de la dérivée première de la courbe d’assombrissement centre bord du Soleil) représente un critère de qualité d’image ; il est obtenu à partir de la dérivée première de la courbe d’assombrissement centre bord mesurée avec l’instrument SODISM ( $LDF_t$ ). L’étalement de l’image observé (Figure 2.17, gauche) a été comparé à ceux obtenus à partir des profils théoriques  $LDF_t(\text{HM98})$  et  $LDF_t(\text{COSI})$ . La largeur à mi-hauteur observée par l’instrument SODISM (environ 5 secondes d’arc à 607.1 nm) est beaucoup plus grande que la valeur théorique attendue (moins de 2 secondes d’arc à 607.1 nm quel que soit le profil solaire utilisé). Par conséquent, la configuration optique de l’instrument n’est pas nominale (dégradation des performances de l’instrument liée aux effets de l’environnement spatial). La dérivée première du profil d’assombrissement centre bord de Vénus est représentée au niveau de la Figure 2.17 (droite). L’étalement obtenu au niveau des profils de Vénus est cohérent avec ceux déterminés à partir des profils du Soleil observés par le télescope. Le facteur d’échelle du télescope déterminé localement nous renseigne sur la valeur du rayon solaire obtenu localement. Ainsi, à un facteur d’échelle déterminé à une position angulaire donnée ( $PS(\theta)$ ) correspond un rayon solaire calculé à la même position angulaire ( $R_{\text{image}}(\theta)$ ).

### 2.3.7 Détermination du rayon solaire à 607.1 nm

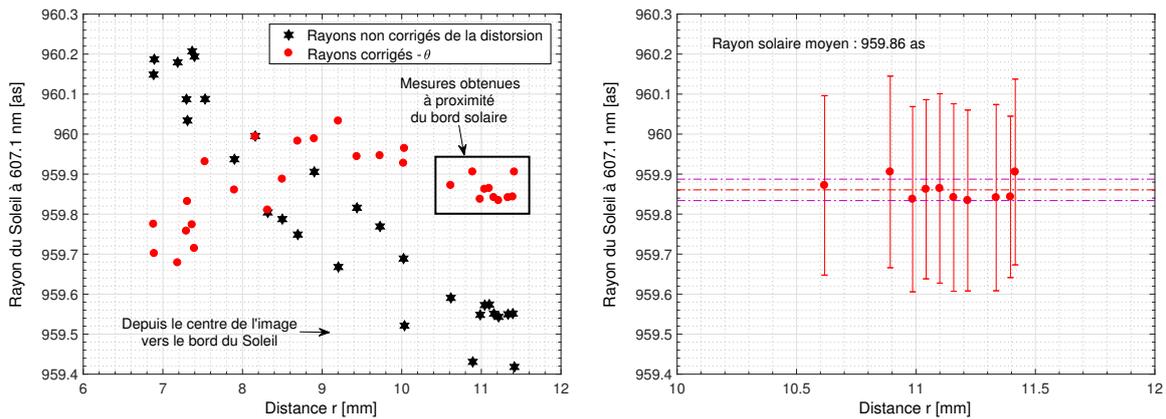
Le rayon solaire à 607.1 nm est obtenu à partir de la détermination de plusieurs paramètres : le facteur d’échelle du télescope ( $PS(\theta)$  en seconde d’arc par pixel), la fonction

de distorsion optique ( $F_d^t(\theta)$  qui est sans unité) et le rayon solaire moyen de l'image normalisé à une unité astronomique ( $\langle R_{\text{image}} \rangle$  en pixels). La fonction de distorsion optique est obtenue au cours d'un étalonnage de l'instrument (détermination de la distorsion du télescope à partir de la rotation du satellite et en utilisant 1040 images).  $\langle R_{\text{image}}^{t_d} \rangle$  (en pixels) représente la valeur du rayon solaire moyen obtenue au cours de l'étalonnage et  $R_{\text{image}}^{t_d}(\theta)$  correspond à la valeur du rayon (en pixels) à la position angulaire souhaitée ( $\theta$ ). La fonction de distorsion optique est obtenue à partir d'un grand nombre d'images acquises pour plusieurs positions angulaires du satellite. Ainsi, l'erreur de type aléatoire associée à sa détermination est très faible. Pour chaque image acquise pendant le passage de Vénus, le rayon solaire moyen est déterminé en utilisant l'Equation 2.9.

$$R_{\odot} = \langle R_{\text{image}} \rangle PS(\theta) F_d^t(\theta) \quad (2.9)$$

$$F_d^{t_d}(\theta) = \frac{R_{\text{image}}^{t_d}(\theta)}{\langle R_{\text{image}}^{t_d} \rangle}$$

A partir de la connaissance du facteur d'échelle du télescope et de sa fonction de distorsion, la valeur du rayon solaire à 607.1 nm a été déterminée pour chaque acquisition d'image (Figure 2.18, gauche). La correction de distorsion est fondamentale; elle est valable lorsque le facteur d'échelle déterminé se situe à proximité des bords solaires. Ainsi, l'Equation 2.9 est applicable lorsque la position radiale ( $r$ , du centre du Soleil vers le bord solaire) est supérieure à 10 mm. La taille de l'image du Soleil au niveau du CCD est proche de 24 mm à une unité astronomique ( $d_t = 2 f_t R_{\odot}$ , voir la Section 1.7).



**FIGURE 2.18** (Gauche) Détermination du rayon solaire à 607.1 nm avec et sans correction de la fonction de distorsion ( $F_d^t(\theta)$ ). La distribution des mesures (rayons corrigés) suit une loi normale gaussienne. (Droite) Valeurs du rayon solaire déterminées à 607.1 nm à proximité du bord solaire avec un bilan d'erreurs par mesure (Table 2.4). L'écart-type sur la série de mesures est de 0.03 as (à  $1\sigma$ ) avec un rayon solaire moyen de 959.86 as.

A 607.1 nm, la valeur absolue du rayon solaire est estimée à 959.86 as (Figure 2.18, droite) avec une erreur proche de 0.20 as (budget d’erreurs à  $1\sigma$ ) et un écart-type de 0.03 as (à  $1\sigma$ ) sur la série de mesures. Il s’agit d’une nouvelle valeur de référence et de la première mesure obtenue hors atmosphère avec un budget d’erreurs détaillé.

### 2.3.8 Détermination du rayon solaire pour d’autres longueurs d’onde

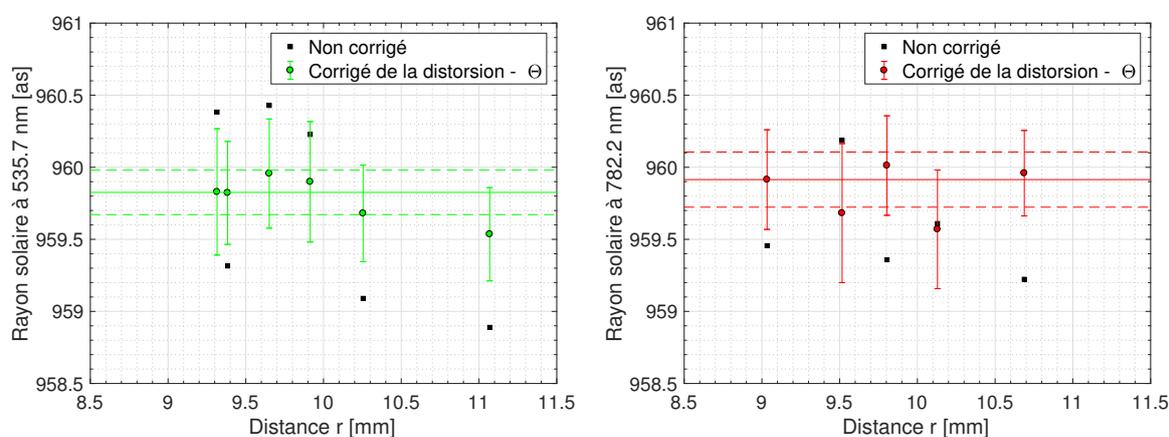
A partir des mesures réalisées par les instruments de la mission PICARD, le rayon du Soleil a été déterminé suivant plusieurs longueurs d’onde (Table 2.5). Pendant le passage de Vénus de juin 2012 (où  $\Theta$  représente une position angulaire), le rayon du Soleil a entre autres été déterminé à 535.7 et à 782.2 nm grâce à l’instrument spatial SODISM (Figure 2.19). Le rayon du Soleil a aussi été déterminé suivant plusieurs longueurs d’onde à partir de l’instrument sol (SODISM II) [Meftah *et al.*, 2014a]. Les résultats obtenus montrent que la dépendance en longueur d’onde du rayon solaire dans le visible et dans le proche infrarouge est extrêmement faible (Figure 2.20). Les mesures PICARD réalisées dans le continuum solaire (535.7 nm, 607.1 nm, 782.2 nm et 1025.0 nm) correspondent à des observations réalisées au niveau de la basse photosphère (altitude comprise entre 0 et  $\sim 20$  km). SODISM et SODISM II permettent aussi d’observer la chromosphère. Le rayon solaire a été déterminé à 393.37 nm (où une dégradation du filtre peut affecter la bande passante et par conséquent introduire un biais au niveau de la mesure).

**TABLE 2.5** Principaux résultats associés à la détermination du rayon solaire.  $S$  représente l’écart-type de la série de mesures ( $\sigma=1$ ).  $B_\xi$  représente l’erreur absolue de la mesure associée à un bilan d’erreurs.  $\Delta\lambda$  correspond à la bande passante du filtre interférentiel utilisé.

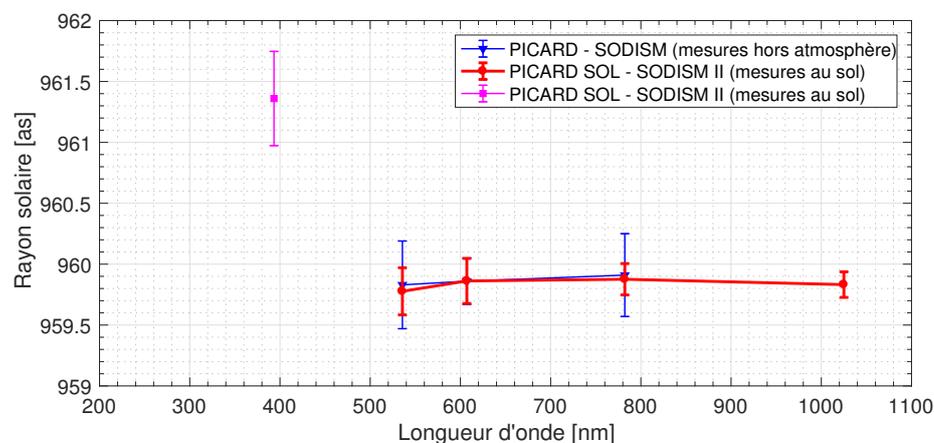
$\lambda$ [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]	$R_\odot$ à 1 ua	$S$ (as)	$B_\xi$ (as)	Instrument	Références
535.7	0.5	959.83 as	$\pm 0.15$	$\pm 0.36$	SODISM	[Meftah <i>et al.</i> , 2016c]
607.1	0.7	959.86 as	$\pm 0.03$	$\pm 0.20$	SODISM	[Meftah <i>et al.</i> , 2016c]
782.2	1.6	959.91 as	$\pm 0.19$	$\pm 0.34$	SODISM	[Meftah <i>et al.</i> , 2016c]
393.37	0.7	961.360 as	$\pm 0.106$	$\pm 0.387$	SODISM II	[Meftah <i>et al.</i> , 2016c]
535.7	0.5	959.777 as	$\pm 0.125$	$\pm 0.194$	SODISM II	[Meftah <i>et al.</i> , 2016c]
607.1	0.7	959.862 as	$\pm 0.126$	$\pm 0.185$	SODISM II	[Meftah <i>et al.</i> , 2016c]
782.2	1.6	959.876 as	$\pm 0.099$	$\pm 0.129$	SODISM II	[Meftah <i>et al.</i> , 2016c]
1025.0	6.4	959.832 as	$\pm 0.181$	$\pm 0.105$	SODISM II	[Meftah <i>et al.</i> , 2016c]

Une des raies spectrales les plus proéminentes est celle du Ca II K qui peut être divisée en trois régions (Section 1.7). Chaque région montre une zone précise de la chromosphère (Figure 1.11). Les hauteurs de formation selon Vernazza *et al.* (1981) sont comprises entre 450 et 650 km (K1 : à 0.15 nm de  $\lambda_{K3}$ ), entre 700 et 1450 km (K2) et entre 1800

et 2000 km (K3 :  $\lambda_{K3}=393.37$  nm) où les proéminences solaires peuvent être observées. L'observation de la raie Ca II K est influencée par le choix de la bande passante du filtre interférentiel sélectionné au niveau d'un télescope d'observation du Soleil. Les filtres de la mission PICARD dans la raie Ca II K ont une bande passante large ( $\Delta\lambda$ ) de 0.7 nm autour de la longueur d'onde centrale de 393.37 nm, couvrant toutes les régions K1, K2 et K3. Ainsi, l'imagerie PICARD dans la raie Ca II K révèle des structures magnétiques du Soleil d'environ 450 à 2000 km au-dessus de la photosphère. La mesure absolue du rayon solaire obtenue à 393.37 nm correspond à une mesure « pseudo-chromosphérique ». A 393.37 nm, la valeur absolue du rayon solaire est estimée à 961.36 as avec un écart-type de 0.11 as (à  $1\sigma$ ) et une erreur absolue proche de 0.39 as (budget d'erreurs). Ce résultat est cohérent avec l'altitude moyenne de la photosphère/chromosphère telle qu'elle est observée aux différentes longueurs d'onde.



**FIGURE 2.19** (Gauche) Détermination du rayon solaire à 535.7 nm. (Droite) Détermination du rayon solaire à 782.2 nm. Les traits horizontaux représentent la valeur moyenne et l'écart-type ( $1\sigma$ ) des différentes mesures.



**FIGURE 2.20** Evolution du rayon solaire en fonction de  $\lambda$ .

## 2.4 Etude des variations du diamètre solaire

### 2.4.1 Introduction

Le diamètre du Soleil est un paramètre fondamental qui est utilisé, entre autres, dans les modèles physiques de notre étoile. Il renseigne notamment sur la quantité d'énergie transmise à la Terre et donc l'impact que cela pourrait avoir sur le climat de notre planète. Le Soleil représente la seule source d'énergie de la Terre. Le sol, les océans et l'atmosphère reçoivent de l'énergie du Soleil sous forme de rayonnement électromagnétique. Une variation de cette quantité d'énergie entraîne une modification de la température moyenne de la Terre de manière directe ou indirecte. Le système climatique de la Terre est un réseau complexe d'interactions dans lequel interviennent différents paramètres (les océans, l'atmosphère, l'orographie, les aérosols, l'albédo des sols, la biosphère, le Soleil, *etc.*). Ces différents paramètres sont tous susceptibles de donner lieu à des mécanismes de rétroaction positive et négative. Dès lors, l'étude des variations du diamètre solaire peut représenter un intérêt scientifique. Ainsi, le diamètre du Soleil est-il remarquablement constant ? Cette constance serait déroutante, étant donné les changements que nous observons parfois au niveau du Soleil et les fluctuations enregistrées au cours d'un cycle solaire d'une période moyenne de 11 ans (cycle de Schwabe). Par ailleurs, de possibles variations temporelles du diamètre solaire sont importantes en tant que indicateur de stockage de l'énergie interne et en tant que mécanisme de changement de l'éclairement solaire total. De manière simplifiée, les variations cycliques de l'éclairement solaire total peuvent être liées à des variations du rayon solaire et à des variations de la température effective du Soleil (Equation 2.10).

$$\frac{\Delta L_{\odot}}{L_{\odot}} = \frac{\Delta TSI}{TSI} = 2 \times \frac{\Delta R_{\odot}}{R_{\odot}} + 4 \times \frac{\Delta T_{\odot}}{T_{\odot}} \quad (2.10)$$

Il paraît alors extrêmement intéressant de mesurer avec précision les variations du rayon solaire ( $\Delta R_{\odot}$ ) au cours du temps (plusieurs cycles solaires). Pendant un cycle solaire, l'éclairement solaire total ( $TSI$ ) peut varier sur des échelles de temps allant de quelques minutes à quelques années. La  $TSI$  peut atteindre des baisses notoires de  $5 \text{ W m}^{-2}$  pendant quelques jours. Ces variations sont entre autres liées à la présence ou à l'absence de taches solaires (lien avec l'activité solaire). Au cours d'un cycle solaire, la variation de l'éclairement solaire total est de  $\sim 0.1\%$  crête à crête (en utilisant une moyenne glissante de  $\sim 54$  jours ou plus habituellement de  $\sim 81$  jours). En considérant uniquement la variation de la  $TSI$  au cours d'un cycle solaire, et en supposant aucune variation de la température effective du Soleil ( $T_{\odot}$ ), la variation théorique du rayon solaire ( $\Delta R_{\odot}$ ) serait alors de 0.5 seconde d'arc (Equation 2.10). Par ailleurs, des périodes de l'activité solaire

plus longues que celles du cycle solaire ont été mises en évidence (cycle de Gleissberg de 80 à 90 ans, cycle de Suess de 150 à 200 ans, *etc.*) et alimentent une intense discussion vis à vis de l'influence de la variabilité solaire sur le climat de la Terre [Braun *et al.*, 2005]. Les mesures précises du rayon solaire sur de longues périodes peuvent enrichir cette discussion.

Eddy et Boornazian (1979) ont été des pionniers de la métrologie solaire, notamment de la détermination du rayon solaire et de ses variations (Table 2.2). L'étude de cette caractéristique physique du Soleil revient à la mode à la fin des années 1970 (Table 2.1). Elle a mis en évidence le regain d'intérêt pour l'analyse des variations du rayon de notre astre. En 1979, Eddy et Boornazian annoncèrent que le rayon du Soleil avait diminué de manière significative entre 1836 et 1953 (environ 1.13 seconde d'arc par siècle à partir de l'étude des données de Greenwich). Plus tard, Gilliland (1981) a montré que la variation séculaire du rayon solaire était beaucoup plus faible (environ 0.15 seconde d'arc par siècle à partir de l'analyse d'un ensemble de données couvrant plus de 265 années). D'autres études (utilisant un ensemble de mesures couvrant 250 ans, [Parkinson *et al.*, 1980]) ont affirmé qu'aucune variation séculaire du rayon solaire n'était détectable. Toulmonde (1997) a compilé un grand nombre de mesures solaires réalisées entre 1660 et 1995. Il est arrivé à la conclusion que le rayon solaire moyen était égal à  $960.0 \pm 0.1$  secondes d'arc à une unité astronomique (distance entre la Terre et le Soleil). Ses analyses n'ont pas révélé de variation séculaire du rayon solaire [Toulmonde, 1997]. Il est extrêmement difficile d'extraire une tendance à partir de l'analyse des données historiques (différents instruments de mesure, méthodes utilisées, effets de l'atmosphère, *etc.*). Ainsi, une éventuelle tendance à long terme de la variation du rayon solaire reste toujours un sujet de débat. La mesure des variations du rayon solaire au cours d'un cycle solaire paraît plus accessible (utilisation du même instrument pendant la durée des observations). Les mesures historiques du rayon solaire effectuées sur le site de Calern (Astrolabe) ont révélé une anti-corrélation avec l'activité solaire entre 1978 et 1994 (au cours des cycles 21 et 22, [Laclare *et al.*, 1996]). Cependant, au cours du cycle solaire 23, les mesures réalisées sur le site de Calern (Astrolabe et DORAYSOL) n'ont montré aucune corrélation ou anti-corrélation claire entre la mesure du rayon solaire et l'activité du Soleil [Morand *et al.*, 2010]. Par ailleurs, l'instrument SDS (Solar Disk Sextant) a mis en évidence des variations du rayon solaire au travers de ses sept vols en ballon réalisés entre 1992 et 2011 (au cours des cycles 22, 23 et 24). Les mesures réalisées par SDS ont montré que le rayon solaire pouvait varier jusqu'à 0.2 seconde d'arc sans mettre en évidence une relation avec l'activité solaire [Sofia *et al.*, 2013]. L'instrument MDI (Michelson Doppler Imager) à bord de SoHO (Solar and Heliospheric Observatory) a permis de réaliser des mesures hors atmosphère au cours du cycle solaire 23. Aucun signe de variation du rayon

solaire imputable au cycle de Schwabe de environ 11 ans n'a été mis en évidence. Les changements systématiques au niveau du rayon solaire issus des mesures de MDI ont été plus petits que 23 mas crête-à-crête pendant le cycle solaire 23 [Kuhn *et al.*, 2004; Bush *et al.*, 2010]. Plusieurs mesures du rayon solaire ont été obtenues à partir de différents instruments utilisant différentes méthodes. De même, les périodes de mesures ont été différentes et les mesures elles-mêmes ont été effectuées dans des domaines spectraux variables d'un instrument à l'autre. Les différents résultats obtenus présentent alors des contradictions et font l'objet de débats scientifiques et de controverses. En conséquence, le rayon solaire est-il variable au cours du temps et existe-t-il une tendance au cours du cycle solaire ? Pour essayer de répondre à cette épineuse question, nous allons exploiter les mesures réalisées par les différents instruments de la mission PICARD.

#### 2.4.2 Problématique liée à la mesure des instruments en orbite et au sol

A partir des mesures réalisées par les instruments SODISM et SODISM II, l'évolution du rayon solaire a été déterminée au cours du cycle 24 (entre juillet 2010 et début 2017). En orbite héliosynchrone (altitude de environ 730 km, inclinaison proche de  $98^\circ$  et heure locale au nœud ascendant à 06h00), le télescope PICARD/SODISM a permis de déterminer la valeur du diamètre solaire. SODISM a observé le Soleil depuis l'espace de juillet 2010 à mars 2014. Pour rappel, les principaux objectifs du télescope SODISM [Meftah *et al.*, 2014d] sont listés ci-après :

- La mesure du diamètre solaire suivant trois longueurs d'onde dans le continuum photosphérique en fonction de la latitude héliographique (à 535.7, à 607.1 et à 782.2 nm dans des domaines spectraux excluant les raies de Fraunhofer) ;
- La détection des régions actives (facules et taches solaires) susceptibles de perturber les mesures au limbe solaire. La longueur d'onde retenue est celle de l'émission du Ca II K à 393.37 nm qui en outre sera utilisée pour la mesure de la rotation différentielle ;
- L'étude des effets de l'activité solaire sur l'éclairement solaire spectral et l'image du Soleil acquise par le télescope SODISM à 215.0 nm ;
- L'étude de l'influence des régions actives sur le diamètre solaire ;
- La réalisation d'un sondage profond du Soleil (héliosismologie) en utilisant un autre filtre à 535.7 nm avec un temps de pose plus long.

Au sol, le télescope SODISM II observe le Soleil depuis mai 2011 (mesures réalisées à l'Observatoire de la Côte d'Azur depuis le plateau de Calern). Il s'agit de mesures complémentaires permettant de mieux comprendre les effets de l'atmosphère sur la mesure du diamètre solaire. SODISM II est toujours opérationnel mi-2017. Les mesures au sol

du diamètre solaire doivent être corrigées de la réfraction atmosphérique (trajectoire non rectiligne de la lumière à la traversée de l'atmosphère et qui est dû à la variation de la densité de l'air avec l'altitude). De plus, elles sont affectées par l'effet de dispersion de l'atmosphère et en raison de son état plus ou moins turbulent. Pour caractériser la turbulence atmosphérique, un moniteur de turbulence a été développé (MISOLFA). Cependant, MISOLFA n'a pas permis de déterminer toutes les caractéristiques de la turbulence atmosphérique nécessaires à la correction du diamètre solaire (simultanéité des mesures, complexité des analyses, *etc.*). Malgré tout, MISOLFA nous renseigne sur la qualité du site de Calern (paramètre de Fried de l'ordre de 3 cm à 535.7 nm).

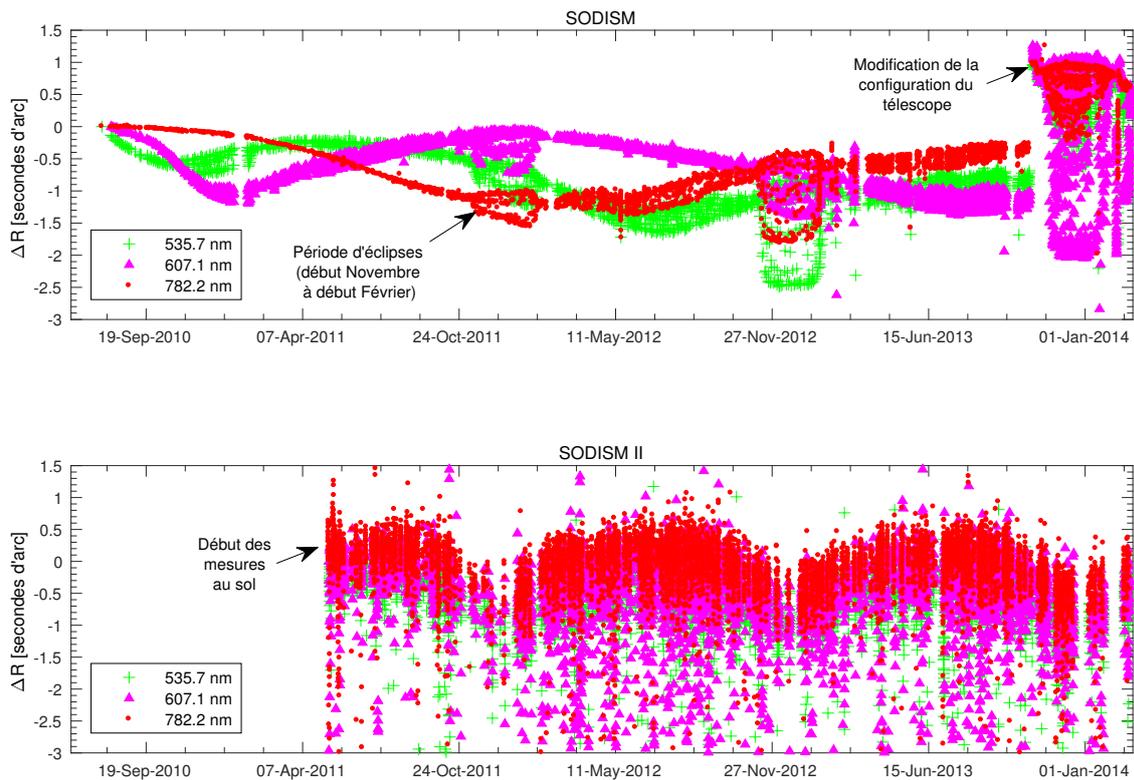
Les objectifs des deux télescopes PICARD sont décrits au niveau de la Table 2.6.

**TABLE 2.6** Principaux objectifs des deux télescopes PICARD.

$\lambda$ [nm]	SODISM (temps de pose)	SODISM II (temps de pose)
215.0	Activité solaire, O3 (1.6 s)	–
393.37	Régions actives (1.3 s)	Régions actives (1.7 s)
535.7 (a)	Diamètre solaire (1.0 s)	Diamètre solaire (1.3 s)
535.7 (b)	Héliosismologie (6.4 s)	Diamètre solaire (8.9 s)
607.1	Diamètre solaire (1.0 s)	Diamètre solaire (1.3 s)
782.2	Diamètre solaire (1.1 s)	Diamètre solaire (1.4 s)
1025.0	–	Diamètre solaire (1.7 s)

Vouloir mesurer avec précision le diamètre d'une sphère gazeuse, dont l'enveloppe est en perpétuel changement représente un défi qui semble irréalisable, et ceci d'autant plus que l'atmosphère terrestre, à travers laquelle les observations au sol sont faites, constitue un gros handicap. A ces difficultés s'ajoute celle de la définition du bord solaire qui sert de repère géométrique pour délimiter la sphère solaire. Et pourtant, malgré ces obstacles, la mesure du diamètre solaire et de ses variations constitue depuis très longtemps des programmes de recherches dans de nombreux observatoires. Les observations réalisées hors atmosphère sont a priori plus favorables. Cependant, l'environnement spatial (rayonnement UV, radiations, anomalie de l'Atlantique Sud, cyclage thermique, *etc.*) dégrade considérablement les instruments en orbite qui observent directement le Soleil (combinaison des effets de la contamination, des radiations, des variations de température et des réponses des détecteurs, [BenMoussa *et al.*, 2013]). Tous ces effets nécessitent des corrections (optiques, thermiques, électriques, *etc.*). Au sol, les instruments sont moins affectés par la dégradation et la maintenance est possible. Cependant, les mesures sont affectées par l'atmosphère et nécessitent d'autres types de corrections (réfraction, turbulence, *etc.*) qui ne facilitent pas la détermination absolue du diamètre solaire et ses variations au cours du temps.

Le rayon solaire apparent dépend de la distance Terre-Soleil qui varie avec la saison. Les mesures sont corrigées de cet effet de distance et elles sont toutes ramenées à la distance de une unité astronomique. L'amplitude de cet effet de distance est de l'ordre de 25 secondes d'arc sur le rayon solaire. La Figure 2.21 montre l'évolution du rayon solaire observé par l'instrument SODISM de juillet 2010 à mars 2014 (mesures corrigées de la distance Terre-Soleil). Cette évolution est largement supérieure à l'ordre de grandeur attendu. Comprendre l'origine de cette dérive représente un intérêt majeur afin de pouvoir essayer de corriger les données obtenues en orbite. Les différentes longueurs d'onde d'observation montrent une dérive temporelle; elles peuvent varier jusqu'à 3 secondes d'arc de 2010 à 2014. De plus, il n'existe pas de corrélation directe entre les différentes mesures réalisées suivant les différentes longueur d'ondes d'observation. L'évolution du rayon solaire obtenue à partir de l'instrument SODISM (trois longueurs d'onde concernées) manifeste une dérive beaucoup plus grande qu'attendue (Figure 2.21). L'un des objectifs de l'expérience spatiale est de pouvoir mesurer les variations relatives du rayon solaire avec une précision meilleure que  $\pm 5$  mas. Ces variations mettent en évidence la problématique associée à la mesure des instrument en orbite.



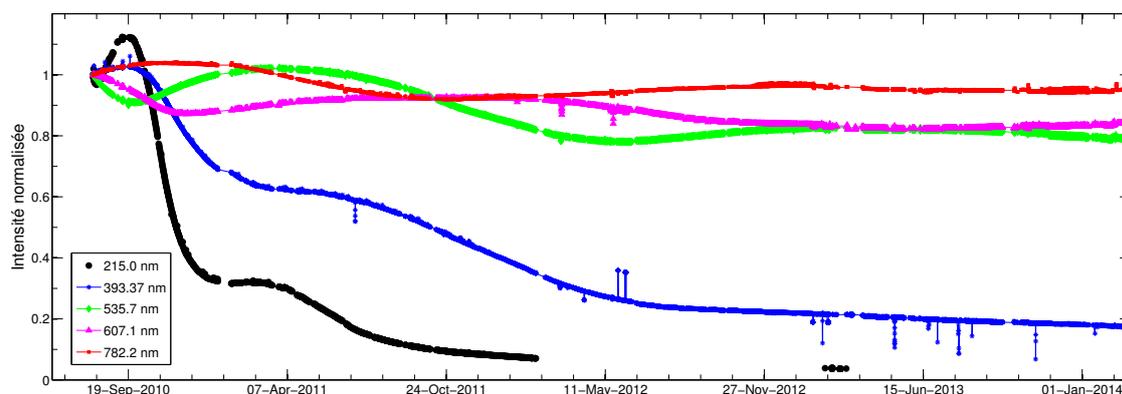
**FIGURE 2.21** (Haut) Mesures de la variation du rayon solaire réalisées par SODISM en orbite avec impact de l'environnement spatial. (Bas) Mesures réalisées par SODISM II au sol avec impact de l'atmosphère.

La Figure 2.21 montre aussi l'évolution du rayon solaire observé par l'instrument SODISM II depuis mai 2011. Les données sont uniquement corrigées de la distance Terre-Soleil. L'atmosphère affecte les mesures du rayon solaire réalisées depuis le sol. Ces variations mettent en évidence la problématique associée à la mesure des instrument au sol. Ces variations correspondent à des évolutions attendues pour des mesures au sol. Des corrections sont alors nécessaires (réfraction, turbulence atmosphérique, *etc.*) afin de pouvoir fournir des résultats acceptables.

### 2.4.3 Compréhension des phénomènes observés par l'instrument en orbite

#### - Intensité dans les images et contamination de l'instrument SODISM :

De juillet 2010 à mars 2014, SODISM a recueilli un grand nombre d'images du Soleil suivant plusieurs longueurs d'onde d'observation. A partir de l'exploitation des données, l'intensité intégrée du disque solaire de chaque image a été calculée (exemple d'image acquise, voir la Figure 1.8). La Figure 2.22 montre l'évolution au cours du temps de l'intensité du disque solaire observée par SODISM pour les différentes longueurs d'onde d'observation. Les intensités intégrées des différentes longueurs d'onde d'observation varient au cours du temps dans des proportions non négligeables. A 215.0 nm, l'intensité intégrée des images varie rapidement en début de mission et converge vers zéro après 30 mois d'observation en orbite. La chute rapide du signal dans l'UV met en évidence un mécanisme de dégradation rapide. Il est semblable à celui observé par l'instrument LYRA (Large Yield Radiometer) à bord de PROBA 2 (Project for On-Board Autonomy) [BenMoussa *et al.*, 2015]. Ainsi, les variations d'intensité observées par SODISM ne peuvent s'expliquer que par une modification des propriétés optiques de l'instrument.



**FIGURE 2.22** Séries temporelles normalisées de l'intensité intégrée du disque solaire pour plusieurs longueurs d'onde d'observation. Ces séries ont été obtenues à partir des images acquises par l'instrument SODISM.

Le mécanisme de dégradation constaté au niveau de l'instrument SODISM peut avoir plusieurs origines. Il peut s'agir d'une modification au cours du temps de la transmission de la fenêtre du télescope, d'une modification de la réflexion des miroirs, d'une modification de la transmission des filtres interférentiels du télescope, d'une modification de la transmission des couches superficielles du détecteur (CCD), *etc.* Ces différentes modifications des composants optiques du télescope (Figure 1.28) sont très certainement liées à un vieillissement des traitements optiques et à une contamination des surfaces optiques. La Figure 2.22 montre que le mécanisme de dégradation de l'instrument SODISM dépend de la longueur d'onde. Ainsi, les composants optiques les plus critiques au niveau du mécanisme de dégradation sont ceux fonctionnant en transmission. Dès lors, l'hypothèse la plus plausible correspond à une contamination de la fenêtre d'entrée du télescope et/ou à une contamination des filtres interférentiels. Nous pouvons constater au niveau de la Figure 2.22 que l'évolution de l'intensité intégrée à 215.0 nm continue de diminuer et ce malgré une utilisation réduite de la bande spectrale de mesure à 215.0 nm (du 13 février 2012 au 20 février 2013). Cette observation permet d'incriminer la fenêtre d'entrée de l'instrument SODISM comme étant le composant optique le plus critique. La température de la fenêtre d'entrée évolue en fonction du niveau de contamination.

#### - Impact de la température de la fenêtre d'entrée du télescope :

La température de la fenêtre d'entrée de SODISM influence fortement la réponse optique de l'instrument ( $psf_t$ ). Fin octobre 2013, une modification de la configuration du télescope a été réalisée (par télécommande depuis le sol) en agissant sur la position de la porte d'entrée du télescope (quelques °). L'objectif de cette opération était de démontrer l'influence de la température de la fenêtre d'entrée sur la mesure du rayon solaire. A l'issue de cette modification de configuration, la température d'interface de la fenêtre d'entrée avait augmenté de  $\sim 5^\circ\text{C}$ ; l'environnement thermique radiatif de la fenêtre d'entrée venait d'être modifié très rapidement. Au même instant, le rayon solaire obtenu à partir de SODISM avait évolué rapidement (Figure 2.21). Une variation de plus de 1 seconde d'arc a été constatée pour les différentes longueurs d'onde d'observation. Ainsi, la connaissance du champ de températures de la fenêtre d'entrée est fondamentale.

#### - Scénario retenu :

Il y a eu une contamination de la fenêtre d'entrée du télescope par le lanceur et/ou le satellite. La température de la fenêtre d'entrée a évolué au cours du temps (vieillessement du contrôle thermique) et a modifié l'indice de la fenêtre d'entrée. En conséquence de cet effet, la réponse optique de l'instrument a varié au cours du temps car la  $psf_t$  du télescope dépend de l'indice. Il est donc nécessaire de déterminer les relations qui existent entre la température de la fenêtre d'entrée et la réponse optique de l'instrument SODISM.

#### 2.4.4 Modèle thermique de la fenêtre d'entrée de l'instrument en orbite

Comme énoncé précédemment, les variations de la température de la fenêtre d'entrée ont un impact majeur sur les performances de l'instrument. Il est alors nécessaire de développer un modèle numérique qui permet d'expliquer les variations du rayon solaire observées avec l'instrument spatial de la mission PICARD. Cependant, le choix d'exprimer la température de la fenêtre d'entrée du télescope comme une fonction du rayon solaire (vu par l'instrument) n'est pas triviale. Dans ce paragraphe, nous allons établir l'équation différentielle relative à la température ( $T$ ) de la fenêtre d'entrée de l'instrument SODISM. Dans un premier temps, l'évolution du champ de températures de la fenêtre d'entrée doit être calculée pour toute la durée de la mission spatiale PICARD. Les paramètres de servitude du satellite (HK) seront utilisés comme des données d'entrée. La température de la fenêtre d'entrée sera une fonction de la coordonnée radiale  $r$ . Pour simplifier les calculs, nous nous placerons dans le cadre d'un matériau homogène et isotrope. On peut supposer que le coefficient de conductivité thermique du matériau ( $\Lambda$ ) est constant et indépendant à la fois des variables spatiales et du temps. Il s'agit d'un disque circulaire en silice de faible épaisseur ( $h$ ) et de rayon  $R_f$ , où  $dr$  représente un élément annulaire. Considérons un petit élément de volume  $dV$  (où  $dV = 2\pi r dr h$ ) de notre fenêtre d'entrée placée dans un champ de température caractérisé en tout point par un vecteur  $\vec{\nabla}T$  (ou  $\overrightarrow{\text{grad}}T$ ) donné. Effectuons le bilan énergétique sur l'élément de volume  $dV$ , au cours du temps  $t$  (Equations 2.11).

$$Q_{in} + Q_{out} + Q_{flux} + Q_{rad} = \rho C_v dV \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.11)$$

$$Q_{in} = -\Lambda 2\pi r h \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_r$$

$$Q_{out} = \Lambda 2\pi r h \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r+dr}$$

$$Q_{flux} = 2\pi r dr (\alpha_f \varphi_S + \varepsilon_{out} f v_{ir} \varphi_{IR} + \alpha_f f v_a \varphi_A)$$

$$Q_{rad} = 2\pi r dr \sigma (\varepsilon_{out} (T_\infty^4 - T^4) + \varepsilon_{in} (T_t^4 - T^4))$$

où les termes de conduction  $Q_{in}$  (surface interne) et  $Q_{out}$  (surface externe) sont exprimés par la loi de Fourier, le terme  $Q_{flux}$  correspond aux puissances externes appliquées à l'élément de volume  $dV$  de la fenêtre du télescope, le terme  $Q_{rad}$  correspond aux puissances échangées (fenêtre-espace et fenêtre-télescope) sous forme radiative et conformément à loi de Stefan-Boltzmann,  $\rho$  correspond à la masse volumique du matériau de la fenêtre, et  $C_v$  correspond à la chaleur massique à volume constant du matériau de la fenêtre d'entrée du télescope. L'émissivité  $\varepsilon_{out}$  rend compte de la capacité du matériau de la face

externe de la fenêtre à émettre de l'énergie par rayonnement avec l'espace froid dont la température correspond à  $T_\infty$ . De même, l'émissivité  $\varepsilon_{in}$  rend compte de la capacité du traitement de la face interne de la fenêtre à émettre de l'énergie par rayonnement avec l'intérieur du télescope dont la température correspond à  $T_t$ .  $\sigma$  représente la constante de Stefan-Boltzmann. La fenêtre d'entrée du télescope est soumise aux flux externes tels que le flux solaire ( $\varphi_S$ ), le flux IR de la Terre ( $\varphi_{IR}$ ) et le flux albédo ( $\varphi_A$ ). Le satellite de la mission PICARD observe en permanence le Soleil (hors période d'éclipses). Le facteur de vue entre le Soleil et la face externe de la fenêtre de l'instrument SODISM est égal à 1. La position relative de la face externe de la fenêtre d'entrée par rapport à la Terre (angle solide) varie au cours de l'orbite et au cours du temps. Les facteurs de vue  $fv_{ir}$  et  $fv_a$  prennent en considération cet effet. La conversion photo-thermique de l'énergie solaire peut constituer un apport d'énergie non négligeable pour un grand nombre d'applications thermiques. Dans notre système, la valeur de l'absorption solaire de la fenêtre d'entrée ( $\alpha_f$ ) représente un paramètre critique qui doit rester stable. Or ce n'est pas le cas, la fenêtre d'entrée du télescope se dégrade au cours du temps (contamination). En effet, l'augmentation de la température aux interfaces mécaniques de la fenêtre d'entrée et la modification de l'intensité mesurée au niveau des images acquises par l'instrument SODISM nous confirment que  $\alpha_f$  évolue au cours du temps. Une partie du spectre solaire joue un rôle majeur car elle contribue très fortement à la dégradation des traitements optiques de notre fenêtre d'entrée. La dégradation par les rayonnements UV et la polymérisation des contaminants constituent le facteur principal du vieillissement du contrôle thermique de notre dispositif, tout comme un grand nombre de systèmes spatiaux observant le Soleil [BenMoussa *et al.*, 2013].

Après avoir présenté tous les paramètres de notre modèle, et à partir des formulations générales, nous allons simplifier les équations (régime stationnaire, faibles puissances échangées sous forme radiative entre la fenêtre et le télescope et suppression des non-linéarités du problème mathématique) :

- Pour un régime stationnaire :  $\rho C_v dV \frac{\partial T}{\partial t} = 0$ ,
- Faibles puissances échangées :  $\varepsilon_{in} \leq 0.05$ ,
- Linéarisation :  $T_\infty^4 - T^4 = (T_\infty + T)(T_\infty^2 + T^2)(T_\infty - T)$ .

En arrangeant les différents paramètres des Equations 2.11, nous obtenons :

$$\frac{r \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r+dr} - r \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_r}{dr} + \frac{r}{\Lambda h} (Flux + \sigma \varepsilon_{out} \bar{T} (T_\infty - T)) = 0 \quad (2.12)$$

$$Flux = \alpha_f \varphi_S + \varepsilon_{out} fv_{ir} \varphi_{IR} + \alpha_f fv_a \varphi_A$$

$$\bar{T} = (T_\infty + T)(T_\infty^2 + T^2)$$

Dans la limite où  $dr$  tend vers 0, cette relation devient :

$$r^2 \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + r \frac{\partial T}{\partial r} - r^2 \frac{\varepsilon_{out} \sigma \bar{T}}{\Lambda h} \left( T - T_\infty - \frac{Flux}{\varepsilon_{out} \sigma \bar{T}} \right) = 0 \quad (2.13)$$

L'Equation 2.13 correspond à une équation différentielle de Bessel d'ordre 0 modifiée. En effet, le troisième terme de cette équation est négatif. Ainsi, nous allons simplifier cette équation afin de pouvoir résoudre mathématiquement cette équation (utilisation de l'unité imaginaire, où  $i^2 = -1$ ). Nous introduisons alors les équations suivantes :

$$\theta = T - T_\infty - \frac{Flux}{\varepsilon_{out} \sigma \bar{T}} \quad (2.14)$$

$$z = i r \sqrt{\frac{\varepsilon_{out} \sigma \bar{T}}{\Lambda h}}$$

A partir de ces modifications, l'Equation 2.13 devient alors :

$$z^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + z \frac{\partial \theta}{\partial z} + z^2 \theta = 0 \quad (2.15)$$

Ce qui donne respectivement pour solutions les équations de Bessel J et Y, d'ordre 0. Ainsi, nous obtenons la solution suivante :

$$\theta = C_1 J_0(i r C) + C_2 Y_0(i r C) \quad (2.16)$$

$$C = \sqrt{\frac{\varepsilon_{out} \sigma \bar{T}}{\Lambda h}}$$

où  $C_1$  et  $C_2$  sont des constantes arbitraires. A partir des conditions aux limites de notre système, nous allons pouvoir déterminer ces deux constantes. Dans notre application, nous pouvons mettre en évidence les conditions aux limites suivantes :

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial r} \right|_{r=r_c=0^+} = C_1 J_1(i r_c C) + C_2 Y_1(i r_c C) = 0 \quad (2.17)$$

$$\theta|_{r=r_{out}} = C_1 J_0(i r_{out} C) + C_2 Y_0(i r_{out} C) = \theta_{out}$$

$$\theta_{out} = T_{out} - T_\infty - \frac{Flux}{\varepsilon_{out} \sigma \bar{T}_{out}}$$

où  $r_c$  correspond au rayon intérieur de la fenêtre d'entrée du télescope et  $r_{out}$  représente le rayon extérieur de la fenêtre.  $T_{out}$  correspond à la température d'interface de la fenêtre (contour extérieur). Il s'agit d'un paramètre de servitude mesuré en orbite (HK).

$$T = T_\infty + \frac{Flux}{\varepsilon_{out} \sigma \bar{T}} + C_1 J_0(i r_c C) + C_2 Y_0(i r_c C) \quad (2.18)$$

$$C_1 = \frac{-\theta_{out} Y_1(i r_c C)}{J_1(i r_c C) Y_0(i r_{out} C) - J_0(i r_{out} C) Y_1(i r_c C)}$$

$$C_2 = \frac{\theta_{out} J_1(i r_c C)}{J_1(i r_c C) Y_0(i r_{out} C) - J_0(i r_{out} C) Y_1(i r_c C)}$$

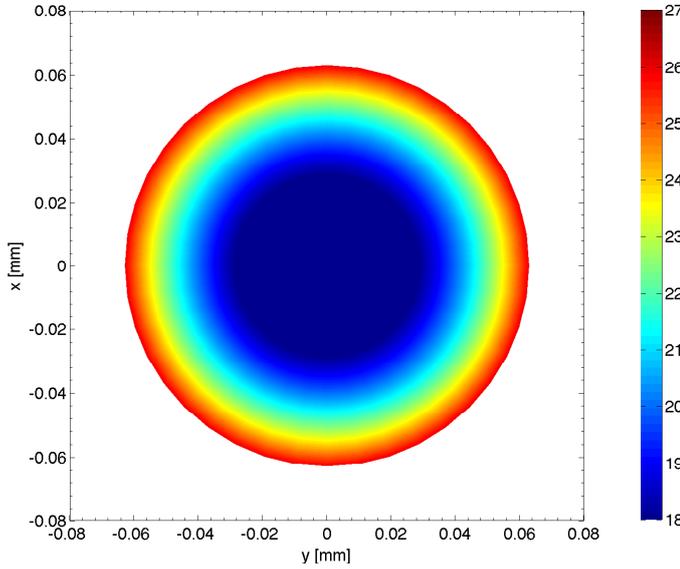


FIGURE 2.23  
Champ de températures de la fenêtre d'entrée de l'instrument SODISM.

Pour résoudre le système complet (Equations 2.18), j'ai utilisé la méthode suivante :

- 1. On "devine" les valeurs des températures  $T$  afin de déterminer le paramètre  $\bar{T}$ . Appelons  $Tg$  ces valeurs.
- 2. On remplace dans le système d'équations  $T$  par leurs valeurs devinées, sauf quand la différence  $(T - T_\infty)$  apparaît explicitement.
- 3. On résout le système d'équations.  $T$  sont des inconnues, alors que  $Tg$  sont considérées comme des constantes.
- 4. Sauf miracle, les solutions  $T$  diffèrent des valeurs devinées. On recommence le processus itératif à l'étape (2) en prenant comme valeur de  $Tg$  les solutions  $T$  trouvées.
- 5. On répète ce processus itératif jusqu'à ce que les différences entre les valeurs devinées et les solutions du problème diffèrent suffisamment peu (critère de convergence). En

général quelques étapes suffisent pour obtenir une précision tout à fait suffisante, sauf si les valeurs initiales  $Tg$  sont trop aberrantes. Dès lors, la convergence est garantie.

Le champ de températures de la fenêtre de l'instrument SODISM est représenté au niveau de la Figure 2.23. Pour ce cas de calcul, les températures sont comprises entre 18 et 27°C. Le gradient de température ( $\Delta T(\alpha_f)$ ) est de l'ordre de 9°C. Ce résultat a été obtenu avec les paramètres suivants (et dont les sensibilités à de petits écarts ont été étudiées par Meftah *et al.* (2015a)) :

$$h = 8 \times 10^{-3} m, r_{out} = 8 \times 10^{-3} m, \Lambda = 1.3 W.m^{-1}.K^{-1}, \varepsilon_{out} = 0.81, \sigma = 5.67 \times 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}, T_{\infty} = 4 K, T_{out} = 299 K, \alpha_f = 0.14 \text{ (mesure au sol)}, \varphi_S = 1320 W.m^{-2}, \varphi_{IR} = 231 W.m^{-2}, f_{vir} = 0.22, \varphi_A = 18 W.m^{-2}, f_{v_a} = 0.5.$$

### 2.4.5 Modèle optique de l'instrument en orbite

Le modèle optique de l'instrument SODISM a été décrit par Meftah *et al.* (2015a). Le front d'onde (position des photons à un instant donné et émis par une même source de lumière) est un des nombreux paramètres qui caractérisent un faisceau lumineux. Par ailleurs, j'ai choisi d'utiliser les polynômes de Zernike parce qu'ils sont orthogonaux sur le disque. Le front d'onde ( $w_0$  en nm) correspond à la somme de tous les polynômes de Zernike ( $Z_k(\rho, \theta)$ , voir Annexe C) combinés à des coefficients ( $C_k$ ). Le coefficient  $C_3$  correspond à un effet de focus (défocalisation du télescope ( $\delta$ ) et gradient de température de la fenêtre d'entrée ( $\Delta T(\alpha_f)$ ). Ainsi, le front d'onde dépend de la température de la fenêtre d'entrée de l'instrument SODISM. Le profil de limbe solaire observé par l'instrument ( $LDF_{SODISM}$ ) est lié à la fonction instrumentale ( $psf_t(w_0)$ ). Un code a été développé sous MATLAB afin de déterminer la valeur de  $psf_t(w_0)$  en fonction du gradient de température de la fenêtre d'entrée de l'instrument (Annexe D).

$$w_0 = \sum_{k=1}^{36} C_k Z_k(\rho, \theta) = f \left( \Lambda, \frac{\partial n}{\partial T}, \Delta T(\alpha_f), \dots \right) \quad (2.19)$$

$$C_3 = \frac{\delta D_{PS}^2}{16 \lambda f_S^2} + \frac{1}{2 \lambda} \frac{\partial n}{\partial T} h_w \Delta T(\alpha_f)$$

$$LDF_{SODISM} = psf_t(w_0) \otimes LDF_{\odot}$$

### 2.4.6 Evolution du rayon solaire des instruments en orbite et au sol

La méthode développée et les résultats obtenus ont été publiés dans une revue scientifique à comité de lecture (The Astrophysical Journal, ApJ). L'article scientifique qui synthétise cette étude est donné ci-après [Meftah *et al.*, 2015a].

# ON THE CONSTANCY OF THE DIAMETER OF THE SUN DURING THE RISING PHASE OF SOLAR CYCLE 24

M. MEFTAH<sup>1</sup>, A. HAUCHECORNE<sup>1</sup>, A. IRBAH<sup>1</sup>, T. CORBARD<sup>2</sup>, R. IKHLEF<sup>2</sup>, F. MORAND<sup>2</sup>, C. RENAUD<sup>2</sup>, F. RIGUET<sup>3</sup>, AND F. PRADAL<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, Sorbonne Universités, Université Paris VI—Pierre et Marie Curie, CNRS/INSU, Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales (LATMOS), Institut Pierre Simon Laplace (IPSL), 11 Boulevard d'Alembert, 78280 Guyancourt, France; Mustapha.Meftah@latmos.ipsl.fr

<sup>2</sup>Université de Nice Sophia-Antipolis, CNRS, Laboratoire Lagrange, UMR 7293, Observatoire de la Côte d'Azur (OCA), Boulevard de l'Observatoire, 06304 Nice, France; Thierry.Corbard@oca.eu

<sup>3</sup>Safran REOSC, Avenue de la Tour Maury, 91280 Saint-Pierre-du-Perray, France

Received 2014 December 8; accepted 2015 June 1; published 2015 July 14

## ABSTRACT

The potential relationship between solar activity and changes in solar diameter remains the subject of debate and requires both models and measurements with sufficient precision over long periods of time. Using the PICARD instruments, we carried out precise measurements of variations in solar diameter during the rising phase of solar cycle 24. From new correction methods we found changes in PICARD space telescope solar radius amplitudes that were less than  $\pm 20$  mas (i.e.  $\pm 14.5$  km) for the years 2010–2011. Moreover, PICARD ground-based telescope solar radius amplitudes are smaller than  $\pm 50$  mas from 2011 to 2014. Our observations could not find any direct link between solar activity and significant fluctuations in solar radius, considering that the variations, if they exist, are included within this range of values. Further, the contribution of solar radius fluctuations is low with regard to variations in total solar irradiance. Indeed, we find a small variation of the solar radius from space measurements with a typical periodicity of 129.5 days, with  $\pm 6.5$  mas variation.

*Key words:* space vehicles: instruments – Sun: activity – Sun: fundamental parameters – Sun: general – telescopes

## 1. INTRODUCTION

The Sun is an enormous ball of gas with a radius of 696,156  $\pm$  145 km (Hauchecorne et al. 2014; Meftah et al. 2014c). Before the growth of astrophysics, the study of our star concerned mainly its geometric properties. This is why measurement of the Sun's diameter started as far back as antiquity, and Aristarque of Samos ( $\sim 310$ –230 B.C.) was the first to carry out measurements of the diameter of our star. Nowadays, the diameter of the Sun is a fundamental parameter used in physical models of our star. In particular, it could indirectly provide information about the amount of energy transmitted to Earth and therefore about the impact that this could have on our planet's climate. In fact, the only source of energy for the Earth's ocean-atmosphere system is the Sun. Any significant variation in this amount of energy could lead to a more or less direct variation in its average temperature due to the complexity of the climatic system in which ocean, atmosphere, aerosols, ground albedo, and biosphere are all likely to give rise to positive and negative feedback. This is why the study of variations in solar diameter is of particular interest. Is the solar diameter very much constant? Possible temporal variations of the solar diameter are of great interest for solar physics and climatology, e.g., as a mechanism for changes in total solar irradiance (TSI). Cyclic variability in TSI can be related to the corresponding changes in the solar radius  $R_{\odot}$  and effective temperature  $T_{\text{eff}}$  of the Sun by deriving the Stefan–Boltzmann law. Thus, it is interesting to measure the changes in solar radius during an 11 yr cycle. If we assume that the variations observed over a solar cycle ( $\sim 0.1\%$ ) represent an upper limit for luminosity variation, and assuming no variation in temperature  $T_{\text{eff}}$ , the greatest possible variation in the Sun radius  $\Delta R_{\odot}$  cannot exceed 0.5 arcsec during a solar cycle. Periods of solar activity that are longer (the 87 yr Gleissberg cycle or the 210 yr Suess cycle) than those of the solar cycle, lasting an average period of 11.2 yr, have been found and have

fueled discussion about the influence of solar variability on the Earth's climate (Braun et al. 2005). The potential link between solar activity and variations in solar radius remains a matter of debate and requires models and measurements with sufficient precision over long periods of time.

Eddy & Boornazian (1979) were pioneers in the field of measuring solar radius variations. By analyzing Greenwich meridian transit measurements over a period of more than a century (1836–1953), they found a significant decrease in the solar diameter of around 0.1% per century. However, years later, by analyzing a larger data set covering 265 yr, Gilliland (1981) found a decrease of around 0.01% per century, or 10 times smaller than Eddy & Boornazian. Other analyses concluded that there has been no detectable change in the Sun over the course of the previous 250 yr (Parkinson et al. 1980). Hence, Shapiro (1980) argued that the solar radius had not decreased over time. Furthermore, Toulmonde collated all the solar radius measurements made between 1660 and 1995 and concluded that the mean solar radius at one astronomical unit is equal to  $960.0 \pm 0.1$  arcsec. His research did not find a substantial secular variation in the radius of the Sun (Toulmonde 1997). Nevertheless, it is extremely difficult to extract a trend in the Sun radius from historic data. Thus, the existence of any long-term trend in solar radius variability is still open to debate. In addition, studies of this variability during an 11 yr cycle or at least during a rising or descending phase of a solar cycle led to different results. Historic measurements of the solar radius carried out at the Calern site found anticorrelation with solar activity (Laclare et al. 1996) for a period covering solar cycles 21 and 22 (1978–1994). However, during solar cycle 23, ground-based measurements (with the solar astrolabe and *Définition et Observation du RAYon SOLaire*) found no clear correlation or anticorrelation between the solar radius and the activity of the Sun (Morand et al. 2010). The Solar Disk Sextant (SDS) experiment, using seven balloon flights between 1992 and 2011, showed solar

**Table 1**  
Scientific Objectives of the Two Instruments Dedicated to the Study of the Sun, One in Orbit (SODISM) and the Other on the Ground (SODISM II)

Wavelength (nm)	SODISM	SODISM II
215.0	SO (1): Solar activity, O3 — T <sub>e</sub> (2): ~1.6 s	...
393.37	SO: Active regions—T <sub>e</sub> : ~1.3 s	SO: Active regions—T <sub>e</sub> : ~1.7 s
535.7 (a)	SO: Solar diameter—T <sub>e</sub> : ~1.0 s	SO: Solar diameter—T <sub>e</sub> : ~1.3 s
535.7 (b)	SO: Helioseismology—T <sub>e</sub> : ~6.4 s	SO: Solar diameter—T <sub>e</sub> : ~8.9 s
607.1	SO: Solar diameter—T <sub>e</sub> : ~1.0 s	SO: Solar diameter—T <sub>e</sub> : ~1.3 s
782.2	SO: Solar diameter—T <sub>e</sub> : ~1.1 s	SO: Solar diameter—T <sub>e</sub> : ~1.4 s
1025.0	...	SO: Solar diameter—T <sub>e</sub> : ~1.7 s

**Note.**(1) SO: Scientific objectives. (2) Exposure time (T<sub>e</sub>) during image acquisition.

radius variations. The observations made with this experiment showed that the solar radius can vary up to 0.2 arcsec (Sofia et al. 2013). However, the measurements carried out by the SDS reveal that the solar radius is not in phase with solar activity. Data collected by the Michelson Doppler Imager (MDI) on board the *Solar and Heliospheric Observatory* cover the whole of solar cycle 23 and show no sign of variations attributable to the 11 yr solar cycle. Systematic changes in the solar radius with the sunspot cycle were found to be under 23 mas peak to peak (Kuhn et al. 2004; Bush et al. 2010). The question thus remains open: does the solar diameter vary as a function of time, and is it related to solar activity? In order to ascertain this we now have at our disposal ground-based measurements, balloon measurements, and measurements outside the atmosphere (space telescopes in orbit). Several measurements of the solar diameter were previously obtained by different methods (meridian transit, Mercury transit in front of the Sun, Venus transit in front of the Sun, astrolabes, imaging telescopes, eclipses, etc.). The measurement periods differed, and the measurements themselves were carried out in spectral domains that varied from one instrument to another and contained the Fraunhofer lines susceptible to variability as a function of chromospheric activity. Thus, it is difficult to get a coherent picture on long-term trends from these results, and the subject is still a matter of debate.

Using measurements taken with instruments of the PICARD mission, we will determine the change in solar radius during the rising phase of solar cycle 24. We first present the developed mathematical methods and then discuss whether there is any significant correlation between solar diameter variation and magnetic activity during that period.

## 2. OBSERVATIONS

The PICARD program owes its name to Jean Picard (1620–1682), who is considered to be a pioneer of modern astrometry. The project involves not only a space mission but also a ground-based observatory at Calern (latitude N 43°44' 53", longitude E 6°55'36", and altitude of 1271 m). Thus, measurements are taken in orbit by the PICARD mission satellite in order to avoid the impact of atmospheric effects. Nevertheless, it is important to understand and interpret the ground-based measurements, which actually constitute the longest series of currently available measurements. This is why an important ground-based measurement program ("PICARD SOL") is associated with the space operation before, during, and after the PICARD space mission. The observation fields of the two instruments dedicated to the study of the Sun are summarized in Table 1.

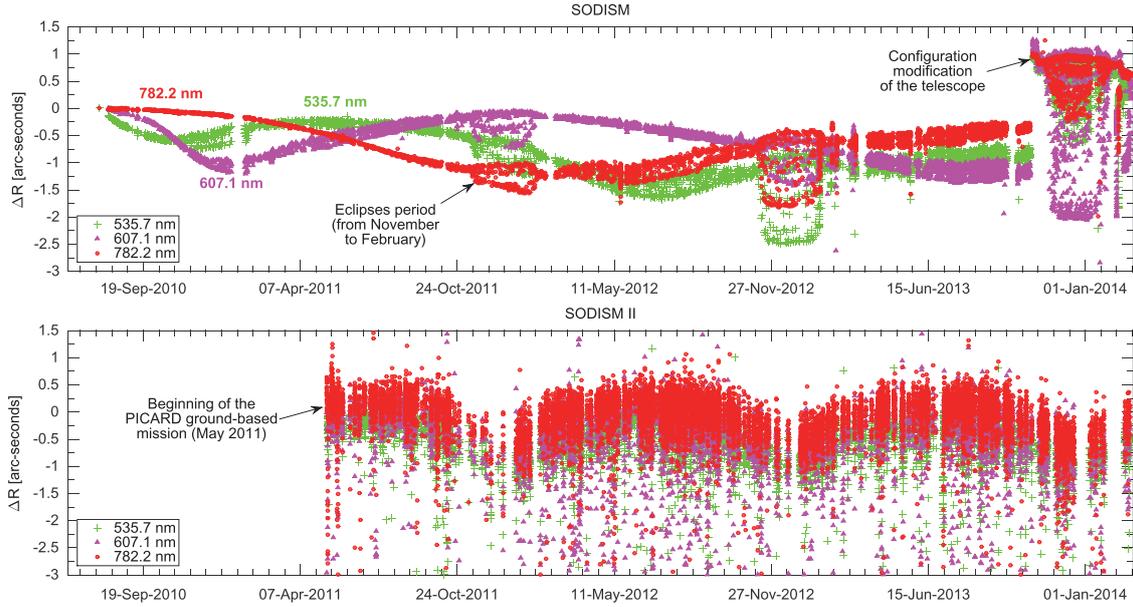
In orbit (~730 km altitude), the PICARD Solar Diameter Imager and Surface Mapper (SODISM) performed measurements of the Sun's diameter between 2010 August and 2014 March on the basis of an image of our star formed by a Ritchey–Chrétien telescope on a charge-coupled device (CCD). The main objectives of SODISM (Meftah et al. 2014d) are as follows:

1. Measurement of the solar diameter at three wavelengths in the photospheric continuum as a function of heliographic latitude (at 535.7, 607.1, and 782.2 nm in the spectral bands excluding the Fraunhofer lines).
2. Detection of active regions (faculae and sunspots). The wavelength chosen corresponds to the emission of Ca II at 393.37 nm, which is used also to measure differential rotation.
3. Study of the effects of solar activity (solar image taken at 215.0 nm).
4. Study of the impact of active regions on the solar diameter.
5. Carrying out a deep Sun survey (using another filter at 535.7 nm dedicated to helioseismology study).

On the ground (at Calern, France), the SODISM II telescope has been carrying out complementary measurements since 2011 May. Ground-based observations of solar diameter are affected by the transit of photons in the atmosphere where scattering, turbulence, and absorption degrade the measurements. A turbulence monitor (Moniteur d'Image SOLaire Franco-algérien [MISOLFA]) was developed in order to characterize atmospheric turbulence. In addition, the data have to be corrected for astronomical refraction.

### 2.1. Problems Associated with Solar Diameter Measurements

Measuring with precision the diameter of a gaseous sphere whose envelope is constantly changing represents a seemingly unachievable challenge, especially as the terrestrial atmosphere through which observations are made constitutes an immense handicap. To these difficulties are added the definition of the solar limb, which acts as a geometric reference point to demarcate the solar sphere. However, in spite of these hindrances, measurement of the solar diameter and its variations have been the subject of research programs in many observatories for many years. Indeed, the diameter of the Sun was a source of curiosity and study. Rozelot & Damiani (2012) gave a summary of efforts made since antiquity. The observations made outside the atmosphere are, in principle, more favorable. However, the effects of the space environment (ultraviolet [UV] effects, radiation, South Atlantic Anomaly, thermal cycling, etc.) lead to considerable degradation of the



**Figure 1.** Top: evolution of raw solar radius variability over time (measurements in orbit). This shows the impact of space environment on measurements carried out by the SODISM instrument. Bottom: evolution of raw solar radius variability over time (measurements on the ground). This shows the impact of atmosphere on measurements carried out by the SODISM II instrument.

instruments in orbit, which directly observe the Sun (combination of the effects of contamination, radiation, temperature variations, and detector responses). All these effects require correction (optical, thermal, electrical, etc.). On the ground, the instruments are far less affected by degradation processes and maintenance is possible. Nevertheless, measurements are affected by the atmosphere and require other types of correction (refraction, turbulence, etc.) that do not make it easy to obtain an absolute measurement of the Sun's diameter and to monitor variations in solar radius. Finally, the apparent solar radius is dependent on the distance between the Earth and the Sun and thus varies with the season. The amplitude of this distance effect is on the order of 25 arcsec on the solar radius. Measurements are thus corrected for this distance effect and are all adjusted to the distance of one astronomical unit (AU).

## 2.2. Measurements Carried out by PICARD Instruments

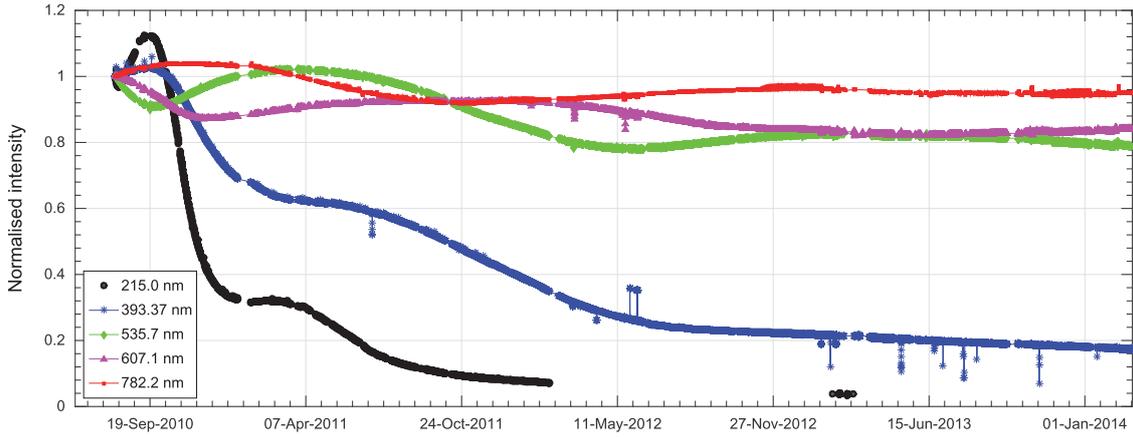
Figure 1 shows the evolution of variations in solar radii observed at one AU by the two telescopes of the PICARD mission. We determined the solar radius from the inflection point position (IPP) of solar limb profiles taken at different angular positions of the image. The IPP for a given angular position is obtained by locating the zero crossing of the second derivative of the solar limb profile. The mean radius is obtained from calculating all the inflection points of the different angular positions. For this study, we focused exclusively on observations carried out in the solar continuum (535.7, 607.1, and 782.2 nm), in order to understand the spectral behavior of the telescope. The ground-based measurements carried out by the SODISM II instrument show the expected variations (impact of atmosphere on measurements). On the other hand, measurements carried out in orbit by SODISM show solar radius variations that are much greater than the expected order of magnitude (several milliarseconds). The different measurements obtained from space show a temporal trend, which is wavelength dependent (this can be up to 3 arcsec on solar

radius variations). Moreover, the different variations associated with different wavelengths are not correlated. Understanding the source of this evolution is of major importance in order to correct the data obtained in orbit with SODISM.

## 2.3. Impact of the Space Environment on Measurements in Orbit

### 2.3.1. Evolution of the Intensity of Images Formed by SODISM

From 2010 August to 2014 March, SODISM collected more than a million images of the Sun at different wavelengths. Around 10 full-field, full-resolution images per day are produced in each wavelength. One of the primary roles of these images is to ensure a monitoring of the solar radius. From those images, we can also determine time series of the integrated intensities. Figure 2 shows the long-term evolution in the normalized integrated intensity of images for each wavelength. This evolution in intensity is a function of wavelength and can go up to 95% of degradation for the spectral band centered at 215 nm. This change in transmission is not considered to be a major problem in itself with regard to the scientific objective of metrology associated with measurements of variations in solar diameter. In fact, it was compensated for by modifying the exposure time and change in flat field. Nevertheless, this evolution reveals a phenomenon, which has an impact on the performance of SODISM. For a given spectral band, there are alternating periods of decreases and increases in intensity. These variations do not seem to be correlated from one spectral band to another. These changes can only be explained by a modification in the optical properties of SODISM. We could suspect that the detection pathway (detector, reading circuit, post-processing, etc.) also plays a role in this change. However, the observed phenomenon is wavelength dependent without following a monotone evolution. The hypothesis of a modification in optic configuration that highlights interference effects is therefore the preferred option. Thus, the only remaining hypothesis is



**Figure 2.** Normalized time series of integrated intensity from the beginning of the PICARD mission (normalized transmission  $t_\lambda$  of the telescope at a given wavelength). The degradation is considerable in the UV spectral bands.

contamination of the optical surfaces operating in transmission (contamination of the front window and/or contamination of interference filters). Generally, the first optical surface of a space instrument exposed to the Sun corresponds to the surface, which will suffer degradation before any other optical element. In the follow-up to this study, we will focus on analysis of SODISM's front window contamination effects, characterized by an increase in the temperature  $T(r, t)$  of this fundamental optical parameter. Computer-aided design representation of the SODISM telescope is shown in Figure 3, where the front window subassembly is represented. The appearance of the temperature gradient ( $\Delta T$ ) is represented in Figure 4.

### 2.3.2. Temperature Evolution of the SODISM Front Window

The temperature ( $\theta_{out}$ ) of the front window mechanical interface evolves over time (Figure 5). This change in temperature reveals contamination over the course of time of the telescope's optical surface (modification of thermo-optical properties  $[\alpha_f]$  of the front window induced by effects such as solar flux absorption). Just before the end of the PICARD space mission (2013 November), we modified the telescope configuration (modification of a temperature set point, which leads to the evolution of the front window radiative environment). From that moment, the temperature  $\theta_{out}$  changed significantly. Similarly, we observed a change in solar radius variability after that event (Figure 1). This clearly shows that there is indeed a relationship between the front window temperature and the evolution of the raw solar radius (Irbah et al. 2014). We wish to point out that these variations in solar radius are slow and not associated with noise.

### 2.3.3. Impact on SODISM Observations

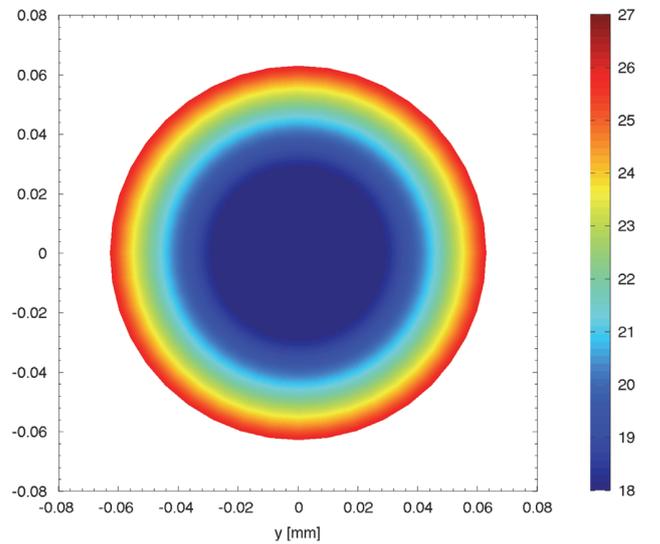
Owing to the increase of the space instrument degradation, the final results will be given from 2010 August to 2012 December (for a more extensive explanation, see Section 4.2).

### 2.4. Impact of Atmosphere on Ground-based Measurements

The main causes of disturbance acting on solar images are related to the transparency of the atmosphere and to turbulence effects (modifying the apparent mean solar radius up to over 1 arcsec). The installation of complementary instrumentation (photometer, pyranometer, and wide-field camera) provided us with additional information.



**Figure 3.** Location of the front window at the telescope.  $\theta_{out}$  represents the front window interface temperature, and  $r$  is the radial coordinate.

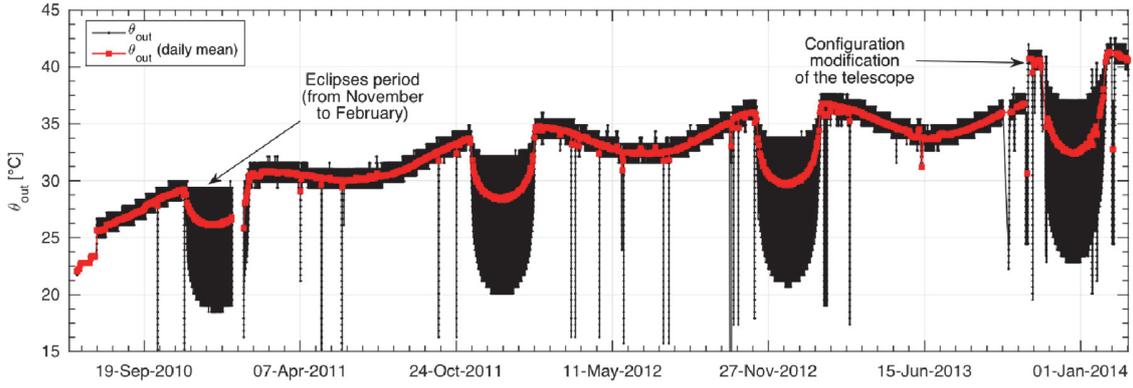


**Figure 4.** Front window temperature gradient ( $\Delta T = 9^\circ\text{C}$ ). Under this scenario, the front window temperatures ( $T(r, t)$ ) ranged between  $18^\circ\text{C}$  and  $27^\circ\text{C}$ .

## 3. MODELS

The observations that contribute to build the model are as follows:

1. Mechanical interface temperature of the front window ( $\theta_{out}$ ).



**Figure 5.** Evolution of the front window mechanical interface temperature ( $\theta_{out}$ ). The front window temperature ( $T(r, t)$ ) depends on the mechanical interface temperature ( $\theta_{out}$ ). Around two million temperatures were recorded (black curve with dots).

2. Normalized time series of integrated intensity at each wavelength.
3. Evolution over time of the absorbed solar flux and absorbed infrared (IR) flux.
4. Evolution of the uncorrected solar radii at one astronomical unit for each wavelength.

### 3.1. Models Associated with the Space Instrument SODISM

#### 3.1.1. Optical Model

In the previous section, we noted that the temperature of the front window  $T(r, t)$  could have an impact on solar radius measurements. We therefore developed an optical model in order to better understand the phenomena we had observed during the PICARD space mission. In fact, modification of the optical wavefront can disrupt the measurement. The wavefront  $w_0$  corresponds to the sum of all Zernike polynomials  $Z_k(\rho, \theta)$  combined with the terms  $C_k$ .

$$w_0 = \sum_{k=1}^{36} C_k \times Z_k(\rho, \theta) \quad (1a)$$

$$C_3 = \frac{\delta \times D_{PS}^2}{16 \times \lambda \times f_S^2} + \frac{1}{2 \times \lambda} \times \frac{\partial n}{\partial T} \times h_w \times \Delta T(\alpha_f) \quad (1b)$$

$$\frac{\partial n}{\partial T} = A_0 + A_1 \times \exp\left(\frac{-\lambda}{B_1}\right) + A_2 \times \exp\left(\frac{-\lambda}{B_2}\right), \quad (1c)$$

where  $\rho$  and  $\theta$  represent cylindrical coordinates.  $C_3$  corresponds to a focus term associated with de-focalization of the image plane ( $\delta$ ) and to a radial temperature gradient in the telescope front window ( $\Delta T(\alpha_f)$ ).  $D_{PS}$  represents the diameter of the telescope pupil (90 mm),  $f_S$  corresponds to the telescope focal length (2629 mm),  $\lambda$  corresponds to the observation wavelength (in nm),  $h_w$  represents the thickness of the telescope front window, and  $\frac{\partial n}{\partial T}$  (ppm K<sup>-1</sup>) corresponds to the variation in the useable wavelength indices (for silica:  $A_0 = 8.241466462$ ,  $A_1 = 524.4619629$ ,  $A_2 = 7.836746871$ ,  $B_1 = 45.22476821$ , and  $B_2 = 211.2250895$ ). The term  $C_9$ , combined with Zernike's polynomial  $Z_9$ , corresponds to an astigmatism defect ( $A_s$ ). The complex wavefront  $W$  takes into account central obstruction ( $A_{DPS}$  is a surface limited by the telescope spiders and

secondary mirror mask). The SODISM point-spread function (PSF) depends on the complex wavefront  $W(p_x, p_y)$ . The line-spread function (LSF) is obtained by integrating over the PSF columns. We carry a convolution (symbol  $\otimes$ ) of the LSF with the desired theoretical solar limb profile HM98 (see Hestroffer & Magnan 1998), where LDF( $r_S, \lambda$ ) represents the limb-darkening function ( $r_S$  represents the Sun's radial coordinates, and  $\alpha_S(\lambda)$  is a parameter given by the HM98 model, which is wavelength dependent). Whatever the solar profile used, when we have a significant defect (radial temperature gradient, focus, astigmatism, etc.), the PSF represents the predominant factor in our calculation. These relationships reveal the complexity of our system and the many parameters associated with it:

$$W(p_x, p_y) = A_{DPS} \times e^{2i \times \pi \times w_0} \quad (2a)$$

$$\text{PSF}_{\text{SODISM}}(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W(p_x, p_y) \times e^{2i \times \pi \times (x \times p_x + y \times p_y)} dp_x dp_y \quad (2b)$$

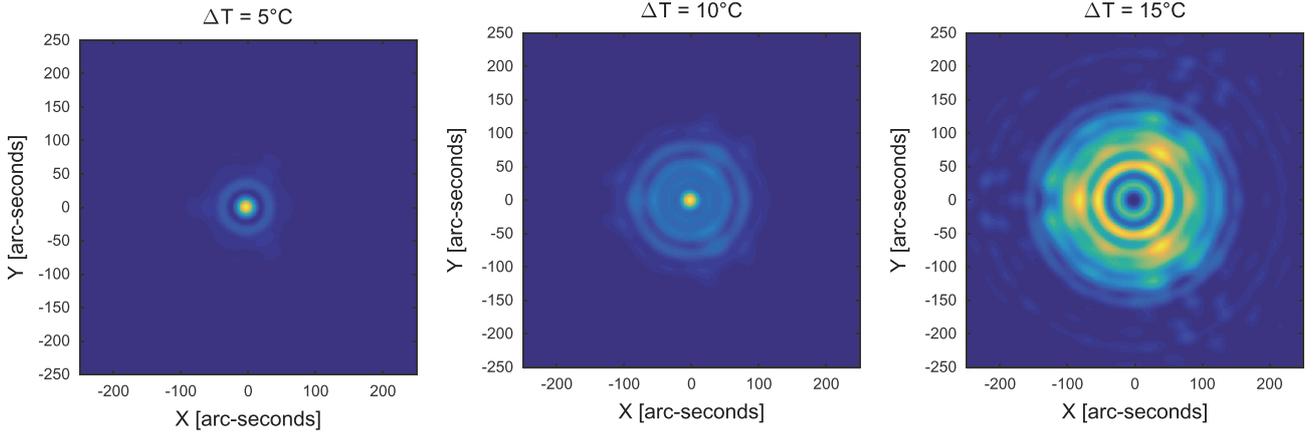
$$\text{LDF}(r_S, \lambda) = \sqrt{1 - r_S^2}^{\alpha_S(\lambda)} \quad (2c)$$

$$\text{LDF}_{\text{SODISM}} = \int_{y_1}^{y_2} \text{PSF}_{\text{SODISM}}(x, y) dy \otimes \text{LDF}(r_S, \lambda). \quad (2d)$$

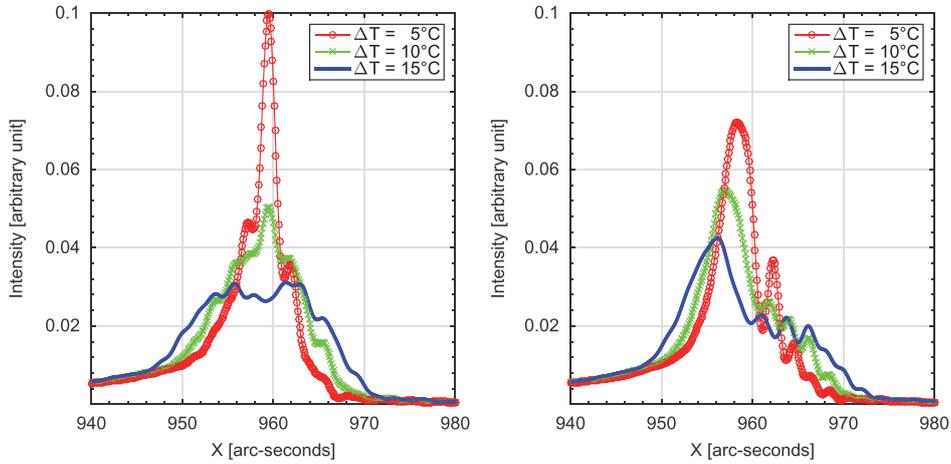
Using the optical model (see Equations (2a)–(2d)), we can determine the theoretical PSF of our telescope at a given wavelength and for a given temperature gradient. The effect of a temperature gradient on the PSF of our telescope at 782.2 nm is shown in Figure 6. The change in the first derivative of the solar limb at 782.2 nm convolved to the PSF of the instrument is given in Figure 7 ( $\text{LDF}_{\text{SODISM}}$ ). These various simulations show the sensitivity of our telescope when it is subjected to a temperature gradient. Finally, evolution of the solar radius as a function of the temperature gradient can be seen in Figure 8 and reveals the dependency with wavelength.

#### 3.1.2. Thermal Model

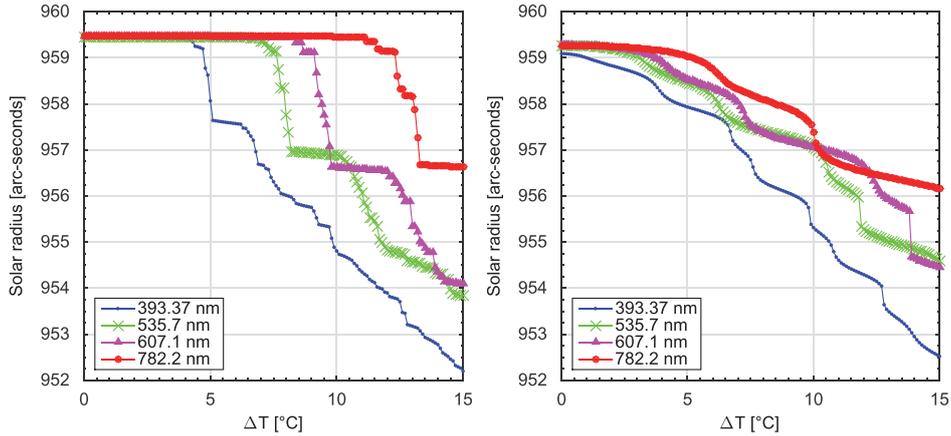
In this section, we will establish the equation for the temperature of the SODISM instrument front window as a function of the various input fluxes. As stated in the previous section, the temperature of the telescope front window has a major impact on the instrument's performance. This model is



**Figure 6.** Evolution of SODISM telescope PSF for different temperature gradient values ( $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ ,  $10^\circ\text{C}$ , and  $15^\circ\text{C}$ ) at the front window.



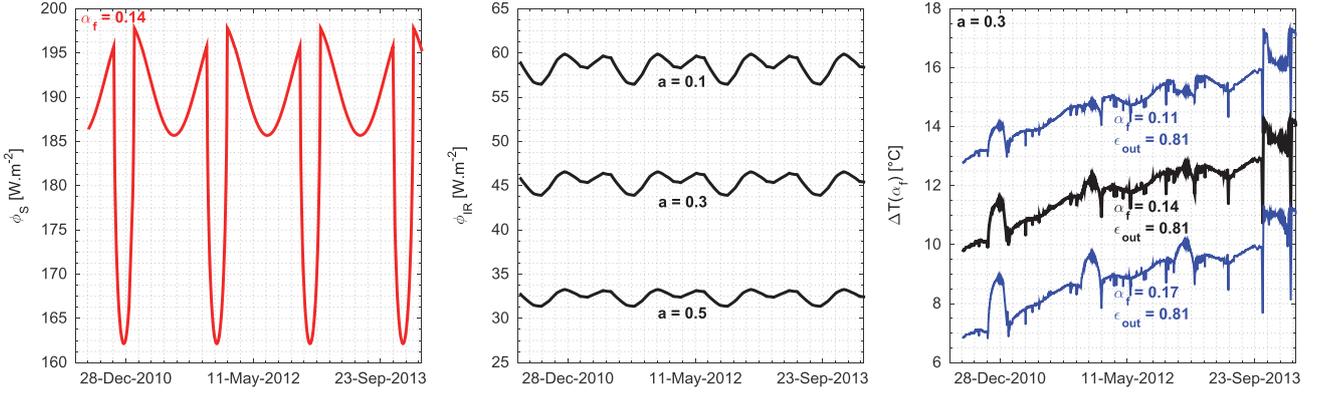
**Figure 7.** Evolution of the solar limb first derivative  $\text{LDF}_{\text{SODISM}}$  as seen by the SODISM instrument (from the LDF of the Sun convolved with the instrument's PSF). Left: effect of a temperature gradient ( $\Delta T$ ). Right: effect of a temperature gradient ( $\Delta T$ ) combined with an astigmatism defect ( $C_0 = -0.25$ ).



**Figure 8.** Left: evolution of the solar radius (determined by the inflection point method) as a function of a temperature gradient ( $\Delta T$ ) for different wavelengths. Right:  $\Delta T$  effects combined with an astigmatism defect ( $C_0 = -0.25$ ) on solar radius measurements.

necessary and explains the variations in solar radius observed with the space instrument of the PICARD mission. It is thus important to characterize the evolution of the temperature range of the front window over time, and this is why we wanted to set up a numerical model. The front window temperature ( $T(r, t)$ ) is a function of the radial coordinate  $r$  (Figure 3). To simplify the calculations, we will assume that we have the context of

a homogeneous isotropic material, where it can be assumed that the thermal conductivity coefficient of the material ( $\Lambda$ ) is constant and independent of both the spatial variables and time (data depending on daily mean parameters). It consists of a circular silica disk of limited thickness ( $h_w = 8$  mm) and an external radius of 57 mm ( $R_f = r_{\text{out}}$ ). Considering a small element of volume  $dV = 2\pi r \times dr \times h_w$  of our front window,



**Figure 9.** Left: evolution over time of the solar flux (orbital mean) absorbed by the front window ( $\Phi_S = \alpha_f \times \varphi_S$ ). Middle: evolution of the IR flux absorbed by the front window ( $\Phi_{IR} = \epsilon_{out} \times f_{v_{ir}} \times \varphi_{IR}$ ) for different values of the albedo (seasonal and spatial evolution of albedo  $[a]$ ). Right: evolution over time of the front window temperature gradient ( $\Delta T$ ) for different values of the solar absorption coefficient ( $\alpha_f$ ).

where  $dr$  represents a ring element, and placed in a temperature range characterized at all points by a given vector  $\text{grad } T$ , and after solving the differential equation, we obtain

$$T_{it+1}(r, t) = T_\infty + \frac{\text{Flux}(t)}{\epsilon_{out} \times \sigma_b \times \overline{T}(t)} + C_1(t) \times J_0(i \times r \times C(t)) + C_2(t) \times Y_0(i \times r \times C(t)) \quad (3a)$$

$$\text{Flux}(t) = \alpha_f(t) \times \varphi_S(t) + \epsilon_{out} \times f_{v_{ir}}(t) \times \varphi_{IR}(t) + \alpha_f(t) \times f_{v_A}(t) \times \varphi_A(t) \quad (3b)$$

$$\overline{T}(t) = (T_\infty + T_{it}(r, t)) \times (T_\infty^2 + T_{it}(r, t)^2) \quad (3c)$$

$$C(t) = \sqrt{\frac{\epsilon_{out} \times \sigma_b \times \overline{T}(t)}{\Lambda \times h_w}} \quad (3d)$$

$$C_1(t) = \left( -\theta_{out}(t) \times Y_1(i \times r_c \times C(t)) \right) / \left( J_1(i \times r_c \times C(t)) \times Y_0(i \times r_{out} \times C(t)) - J_0(i \times r_{out} \times C(t)) \times Y_1(i \times r_c \times C(t)) \right) \quad (3e)$$

$$C_2(t) = \frac{-C_1(t) \times J_1(i \times r_c \times C(t))}{Y_1(i \times r_c \times C(t))}, \quad (3f)$$

where the sum of the absorbed fluxes by the front window is represented by the parameter “Flux,” which evolves over time. Emissivity  $\epsilon_{out}$  takes into account the capacity of the material on the external side of the window to emit energy by radiation toward cold space (4 K), whose temperature corresponds to  $T_\infty$ .  $\sigma_b$  represents the Stefan–Boltzmann constant. The telescope front window is subjected to external fluxes such as solar flux ( $\varphi_S$ ), infrared flux ( $\varphi_{IR}$ ), and albedo flux ( $\varphi_A$ ). The PICARD satellite permanently observes the Sun (outside of eclipse periods). The view factor between the Sun and the external side of the front window of SODISM is equal to 1. The relative position of the external side of the front window with respect to the Earth evolves during an orbit and over time. The view factors  $f_{v_{ir}}$  and  $f_{v_A}$  take into consideration this effect.  $J_0$ ,  $J_1$ ,  $Y_0$ , and  $Y_1$  represent Bessel functions  $J$  and  $Y$  of order 0 and order 1;  $r_c$  represents the internal radius of the front window and tends toward 0 (numerical stability of calculation). The

imaginary unit is represented by  $i$ . This model is associated with an iterative process (it).

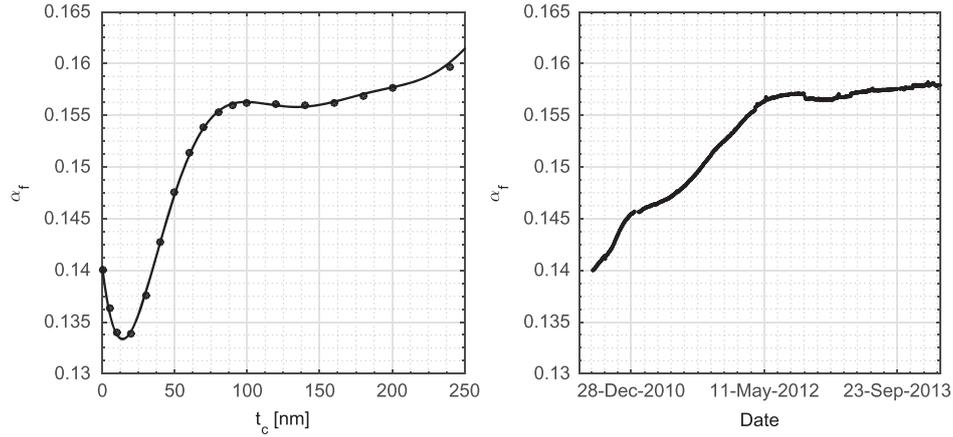
Using the thermal model, we can determine the evolution of the front window temperature gradient over time. Starting with values measured in the laboratory ( $\alpha_f = 0.14$  and  $\epsilon_{out} = 0.81$ ) and assuming that no degradation of our system takes place ( $\alpha_f$  is constant),  $\Delta T(\alpha_f)$  can vary from  $10^\circ\text{C}$  to  $14^\circ\text{C}$  (Figure 9). This variation is related to the evolution over time of the front window temperature interface (see Figure 5). These temperature gradients have a significant impact on the PSF of the telescope and on the performance of our system (see Figure 8). They cause a shrinking back in the IPP of the measured solar radius (value below 957 arcsec) whatever the observation wavelength. This model shows the criticality of our optical configuration when it is subjected to a temperature gradient, which is difficult to characterize on the ground (environment tests on space instrumentation). A thermal vacuum test with a solar simulator does not allow us to identify this type of effect. In fact, the sensitivity of our system is manifested through parameters, which vary with time ( $\alpha_f$  varies [contamination], absorbed IR flux varies, etc.).

### 3.1.3. Model Associated with $\alpha_f$ Coefficient Determination

In order to characterize our system, we developed a model allowing us to estimate evolution of the solar absorption coefficient ( $\alpha_f$ ) over time (Appendix A). Evolution of the intensity of the images formed by SODISM can be explained by contamination of the front window (glass indices:  $n = 1.46$  and  $k = 4.2 \times 10^{-8}$ ). With regard to the nature and physico-chemical origin of the contamination, this can be a derivative of carbon (indices:  $n = 2$  and  $k = 0.1$ ) or a derivative of silicone. By varying the thickness of the contaminating layer, the transmission  $\tau(\lambda)$  of our front window can change. We can thus calculate the change in  $\alpha_f$  as a function of the thickness of the carbon contaminant (Figure 10). Similarly, using the intensity of images formed by the telescope, we estimated the evolution of  $\alpha_f$  over time (Figure 10). This evolution leads to a change in the temperature  $T(r, t)$  of our telescope.

### 3.1.4. Mechanical Model

In order to characterize the mechanical effects on the optic wavefront, we created a mechanical model. We therefore considered the telescope window to be a thin disk subjected to



**Figure 10.** Left: evolution of solar absorption ( $\alpha_f$ ) obtained as a function of the thickness ( $t_c$ ) of a carbon contaminant (using the Thin Film Calculation program). Right: evolution of solar absorption ( $\alpha_f$ ) obtained from normalized telescope transmissions  $t_\lambda$ . This variability ( $\Delta\alpha_f$ ) is weak (mainly degradation in UV) but has an enormous influence on the performance of our telescope.

**Table 2**  
Model Uncertainties

Uncertainty Sources	Typical Values	Uncertainty	Error on $\Delta T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Uncertainty Type
$\alpha_f^a$	0.140	$\pm 0.001$	$\pm 0.10$	Test (S) and aging (R)
$\varepsilon_{out}^b$	0.81	$\pm 0.01$	$\pm 0.30$	Test (S)
$\Lambda^b$	$1.38 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$\pm 0.04 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	$\pm 0.31$	Test (S)
$\theta_{out}^a$	$22.00 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.10$	$\pm 0.03$	Calibration and measurement (S)
$\varphi_S^c$	$1,362.1 \text{ W m}^{-2}$	$\pm 2.4 \text{ W m}^{-2}$	$\pm 0.02$	Measurement (S)
$\varphi_{IR}^c$	$238.0 \text{ W m}^{-2}$	$\pm 6.0 \text{ W m}^{-2}$	$\pm 0.02$	Literature (S and R)
$\varphi_A^c$	$\sim 20.0 \text{ W m}^{-2}$	$\pm 9.0 \text{ W m}^{-2}$	$\pm 0.02$	Literature (S and R)

**Note.** Some uncertainties may be considered random (R), while others are systematic (S).

<sup>a</sup> Parameter that varies over time, which is subject to the effects of instrumental degradation.

<sup>b</sup> Parameter that remains constant.

<sup>c</sup> Parameter that varies over time on a seasonal basis.

a radial temperature field  $T(r, t)$ . The displacement field  $u(r, t)$  can be expressed as follows:

$$u(r, t) = \frac{\alpha_m}{r} \times \left( (1 + \nu) \int_0^r T(r, t) \times r \times dr + \frac{(1 - \nu) \times r^2}{r_{out}^2} \int_0^{r_{out}} T(r, t) \times r \times dr \right), \quad (4)$$

where  $\alpha_m$  represents the thermal dilatation coefficient of the optical material ( $0.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) and  $\nu$  represents the Poisson coefficient, which is equal to 0.17. The temperature field generates a displacement field, which has a negligible impact on the wavefront and on instrument performance. In fact,  $\alpha_m$  is very weak, and therefore the thermo-elastic effects on telescope performance are very limited (a few mas).

### 3.1.5. Thermal Model's Limitations

Thermal models range from simple, steady-state simulations to complex, transient, finite element method (FEM) codes with tens of thousands of nodes. The models are very useful in that they provide a straightforward means to incorporate the numerous physical variables that affect our solar radius measurements. Our model is applied to complex situations. Upon setting up the proper boundary conditions and homogeneous isotropic material properties (constant thermal

properties, except for  $\alpha_f$ ), the temperature field at front window level was calculated. Our thermal model has limitations, which include the accuracy of the inputs to the model. The main inputs are the mechanical interface temperature of the front window (accuracy impact), the absorbed solar flux (TSI absolute value knowledge impact), the absorbed IR flux (impact of variations during an orbit from  $30$  to  $60 \text{ W m}^{-2}$ ), and the evolution of the solar absorption coefficient ( $\Delta\alpha_f$  variations impact). Our thermal model has another limitation, which is related to the model that is valid for steady-state simulations. The adopted hypothesis (steady-state model) shows the limitation of our model during the eclipses. In the case of a transient model, the computation time would be very long. Indeed, around two million temperatures ( $\theta_{out}$ ) were recorded. Moreover, we need to use the data (IR flux and albedo fluxes) provided by the National Oceanic and Atmospheric Administration. Finally, a complex FEM would be more appropriate for a transient case.

### 3.1.6. Model's Uncertainties

Uncertainties of the model are given in Table 2. Spectral reflection ( $\rho_0(\lambda)$ ) and transmission ( $\tau_0(\lambda)$ ) measurements were performed with a spectrophotometer (Agilent Cary 5000 UV-NIS-NIR). The estimated tolerances are expected to be less than  $\pm 1\%$ . Solar absorption ( $A_0(\lambda)$ ), depending on the wavelength, is given by Meftah et al. (2014d). From these

measurements, we deduct  $\alpha_f$ . Temperatures sensors have been calibrated so as to offer an accuracy of  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  (sensor calibration to measure  $\theta_{\text{out}}$  temperature). Near-normal IR reflectance ( $1 - \varepsilon_{\text{out}}$ ) measurements were performed in accordance with ASTM E408 by using an IR Reflectometer model DB100. The estimated tolerances are expected to be less than  $\pm 1.5\%$ . Thermal conductivity ( $\Lambda$ ) measurements were performed in accordance with ASTM E1530 Standard (with a DTC-300 thermal conductivity meter). The estimated tolerances are expected to be less than  $\pm 3\%$ . PICARD radiometers measure the solar flux ( $\varphi_S$ ). The PICARD measurements in the summer of 2010 yielded a TSI value of  $1362.1 \text{ W m}^{-2}$  with an uncertainty of  $\pm 2.4 \text{ W m}^{-2}$  (Meftah et al. 2014b). Linked to the satellite's position (view factor impact), the other parameters have a limited effect ( $\varphi_{\text{IR}}$  and  $\varphi_{\text{A}}$ ). Thus, they do not require a great accuracy. Thus, in closing, these measurements make it possible to establish a model uncertainty budget. While the systematic uncertainties affect only the absolute measurements, random uncertainties affect the absolute and relative measurements. Therefore, random uncertainties have an impact on the correction model of the solar radius variations.

### 3.2. Models Associated with the SODISM II Ground Instrument

#### 3.2.1. Refraction

Astronomical refraction (Ref) influences the solar radius measurements (more than 1 arcsec for observations made above  $70^\circ$  of zenith distance  $z$ ) that we obtain from images taken with SODISM II. In fact, the heliographic latitude of the observed solar diameter changed during the year as a result of the inclination in the Earth's orbit along an ecliptic plane and the inclination of the axis of solar rotation. We therefore use a numerical method to correct mean solar radius measurements at whatever wavelength ( $\lambda$ ). This correction also depends on air temperature ( $T_a$ ), pressure ( $P_a$ ), and relative humidity ( $f_h$ ). In order to quantify the effect of refraction at the observatory position, we can incorporate the length of the trajectory of the rays from the local refractive index of the atmosphere  $n = n_{\text{obs}}$  and the local zenith distance  $\xi = z$  at the observatory position, and this up to  $n = 1$  (beyond the atmosphere). An approximate formula for correction is given in Equation (5b), which shows the relationship between the corrected solar radius for refraction ( $R_{\text{cor}}$ ), the observed solar radius ( $R_{\text{obs}}$ ), and the refraction correction coefficient ( $C_{\text{ref}}(T_a, P_a, f_h, \lambda, z)$ ):

$$\text{Ref} = \int_1^{n_{\text{obs}}} \tan \xi \frac{dn}{n} \quad (5a)$$

$$R_{\text{cor}} \simeq R_{\text{obs}} \times \left( C_{\text{ref}}(T_a, P_a, f_h, \lambda, z) \right)^{-1} \quad (5b)$$

$$C_{\text{ref}}(T_a, P_a, f_h, \lambda, z) = 1 - k(T_a, P_a, f_h, \lambda) \times \left( 1 + 0.5 \times \tan^2(z) \right) \quad (5c)$$

$$k(T_a, P_a, f_h, \lambda) = \alpha_r(T_a, P_a, f_h, \lambda) \times \left( 1 - \beta(T_a) \right), \quad (5d)$$

where  $\alpha_r(T_a, P_a, f_h, \lambda)$  is the air refractivity for local atmospheric conditions at a given wavelength (Ciddor 1996), and  $\beta(T_a)$  (see (Appendix B)) is the ratio between the height of the equivalent homogeneous atmosphere and the Earth radius of curvature at observer position assuming the ideal gas law for dry air (Ball 1908). In our calculation, we used a mean value of  $k(T_a, P_a, f_h, \lambda)$ .

#### 3.2.2. Turbulence

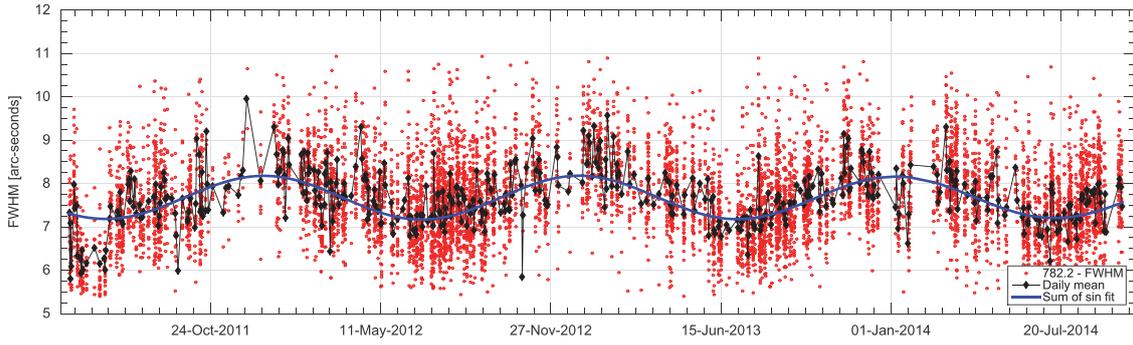
When an optical measurement is carried out on the ground, the photons originating from a source such as the Sun undergo a diffusion effect by molecules in the atmosphere and a turbulence effect. These effects lead to spreading the solar limb and affect the position of its inflection point, as well as its variability. Turbulence represents the main source of uncertainty in the measurements we carry out using SODISM II. The effects of turbulence on the ground could be compared to the effects of the changes in the temperature gradients observed with our space instrument. Fried (1966) compared the resolution of a telescope affected by turbulence following a Kolmogorov statistic with that of a smaller telescope but affected only by light diffraction (if it is in space, for example). The Fried parameter ( $r_0$ ) corresponds to the equivalent diameter of such a telescope limited by diffraction (entirely circular pupil of diameter  $D_{\text{PS}}$ ). This is why one of the objectives of the MISOLFA instrument is to quantify the effects of atmospheric turbulence on measurements of solar diameter carried out by SODISM II. Thus, taking into consideration the Kolmogorov model,  $r_0$  is related to angle-of-arrival fluctuation variance  $\sigma_\alpha^2$  (Borgnino et al. 1982) by

$$r_0 = 8.25 \times 10^5 \times D_{\text{PS}}^{-\frac{1}{5}} \times \lambda^{\frac{6}{5}} \times \left( \sigma_\alpha^2 \right)^{-\frac{3}{5}}. \quad (6)$$

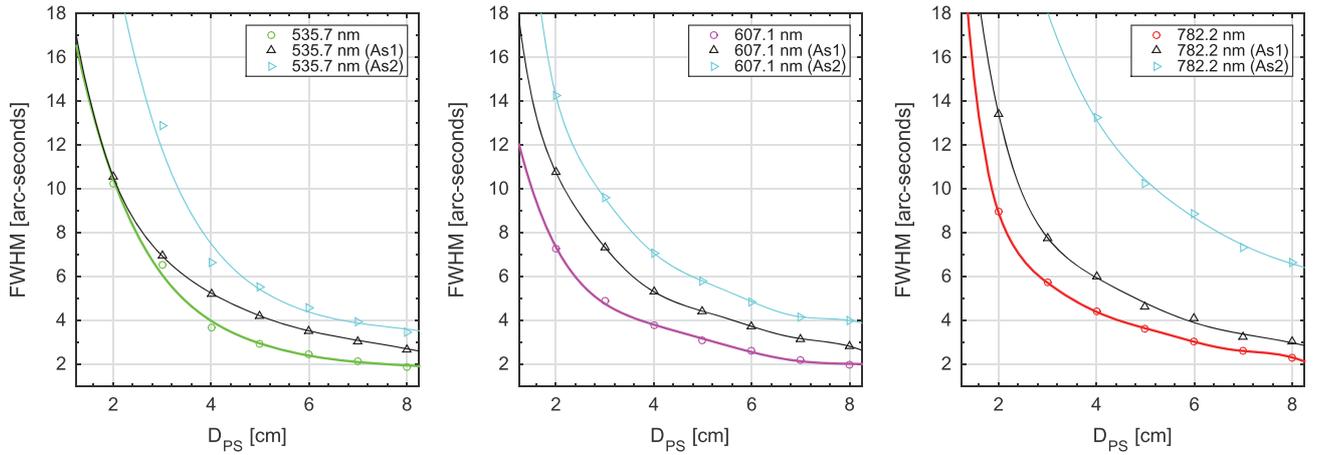
We used this equation to determine  $r_0$  at a given wavelength (measurements carried out using MISOLFA at 535 nm with  $D_{\text{PM}} = 25 \text{ cm}$ ). We note that  $r_0$  is dependent on the wavelength and proportional to  $\lambda^{\frac{6}{5}}$ . This dependence is the reason why the wavefront is relatively less phase disrupted for the longer wavelengths. The change in FWHM of the first derivative of the solar limb observed by SODISM II (Figure 13 of Meftah et al. 2014a at 535.7 nm, and Figure 11 at 782.2 nm) can also be used as a relative indicator of turbulence given the relationship between the FWHM and the pupil diameter  $D_{\text{PS}}$ . This indicator is relative because a small defect in the telescope optics such as a triangular astigmatism produces a bias in the SODISM observables (Figure 12).

## 4. RESULTS AND DISCUSSION

SODISM has taken more than one million images of the Sun at several wavelengths. The replica of the space instrument (SODISM II) installed at the Calern site has taken more than 100,000 measurements of the solar radius at several wavelengths over a period of more than 3 yr. Using measurements carried out by instruments on the PICARD mission, we established the variations in the solar radius during the rising phase of cycle 24. Moreover, we also investigated correlations between solar activity, measurements of TSI, and fluctuations in the radius of our star. The TSI varies over a number of different timescales ranging from several minutes to several decades (a daily variability can reach peak-to-peak amplitudes of around 0.3%, a variability of around 27 days that is a function of the evolution of sunspots and faculae, a variability of around 11 yr with an amplitude on the order of 0.1%, etc.). Could we attribute part of the variations in TSI to variations in solar radius? The precision of measurements is a critical point that requires space observations to be used since the terrestrial atmosphere constitutes an impediment (see ground-based measurements obtained with SODISM II; Figure 1). In spite



**Figure 11.** Evolution of the FWHM of the solar limb first derivative, which is observed by the SODISM II instrument at 782.2 nm.



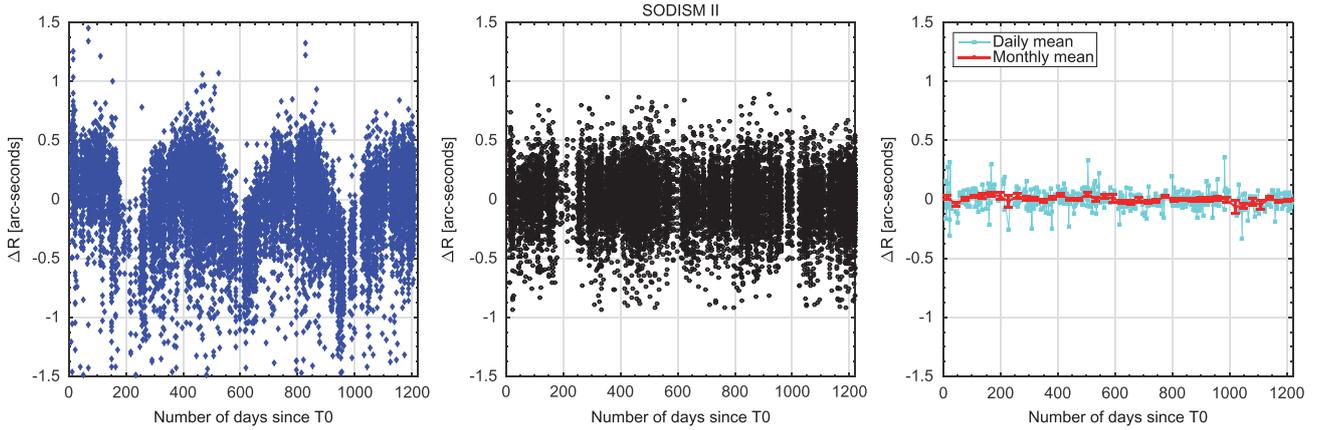
**Figure 12.** Impact of a 19 nm rms triangular astigmatism defect of the telescope (As1) and of a 57 nm rms defect (As2). Evolution of the solar limb first derivative FWHM for different wavelengths (535.7 nm, left panel; 607.1 nm, middle panel; and 782.2 nm, right panel) as a function of the telescope pupil diameter ( $D_{PS}$ ), which is comparable to the Fried parameters ( $r_0$ ).

of these observations outside the atmosphere, we were able to note that the space environment (UV effects, contamination, thermal cycling, etc.), combined with initial defects in telescope calibration (astigmatism, position of the focal plane, etc.), can considerably degrade the measurements taken by our instrument (see measurement obtained with SODISM; Figure 1). The various observations we carried out on the ground and in orbit reveal the usefulness of the developed models (see Section 3) for data correction. In addition, we found that images taken at 782.2 nm were relevant both on the ground and in orbit, and this for different reasons (wavefront of ground-based measurements less subject to phase disturbance by turbulence in the higher wavelengths, and impact of temperature gradient of the space telescope window on PSF lower at 782.2 nm).

#### 4.1. Solar Radius Measurements Obtained by the PICARD Ground-based Facility

Using the different images acquired by the SODISM II instrument, we calculated the observed mean solar radius. It is determined by the IPP of the solar-limb profiles taken at different angular positions of the image. The results presented in Figure 13 (uncorrected data, on the left) were obtained from images acquired at 782.2 nm. The results that we obtain for other wavelengths are similar (Meftah et al. 2014a). They show daily variations of the observed solar radius that are higher at 535.7 nm and at 607.1 nm than at 782.2 nm (effect of

turbulence where  $r_0$  is proportional to  $\lambda^{\frac{6}{5}}$ ). The IPP can be obtained from the different solar models. The differences ( $\Delta$ IPP) in the IPP at 607.1 nm and at 782.2 nm with respect to a reference position at 535.7 nm are relatively small—roughly 30 mas for 782.2 nm, regardless of the solar model used (Table 3). Consequently, the measurements carried out at 782.2 nm are considered as baseline measures. One of the first steps consists in eliminating aberrant measurements through data analysis and in correcting refraction effect data (see graph in the middle of Figure 13). The data selection is explained in more detail by Meftah et al. (2014a). Aberrant measurements were identified as originating from incomplete images (pointing, etc.) and data contaminated by atmospheric effects. Over 25,000 measurements have been made at 782.2 nm since 2011 May. A measurement is obtained from calculating over 4000 inflection points of an image as a function of the angular position ( $\theta$ ). During a day, the various solar radius measurements observed on the ground and corrected for refraction can vary by up to  $\pm 0.5$  arcsec. Among other things, these variations correspond to the effects of turbulence. By analyzing the change in the solar limb first derivative FWHM at 782.2 nm over time (Figure 11), we find evidence of cyclical fluctuations during the course of the year (mean FWHM at 782.2 nm is near 7.6 arcsec). The fact that these cyclical fluctuations are found to be similar from one year to the next allows us to confirm the stability of our device (very slight instrumental drift). In order to reduce the effect of daily



**Figure 13.** Evolution of the solar radii at one astronomical unit (uncorrected [left panel] and corrected [middle panel]) since the first measurements carried out by SODISM II in 2011 May (70). Right: daily and monthly averages of the corrected solar radius evolution.

**Table 3**

Difference ( $\Delta$ IPP) of the Position of the Inflection Point Position at 607.1 nm and 782.2 nm with Respect to the Reference Position at 535.7 nm (for Different Solar Models)

Solar Models	607.1 nm	782.2 nm
$\Delta$ IPP VAL81	11.9 mas	30.2 mas
$\Delta$ IPP FCH09	13.6 mas	32.8 mas
$\Delta$ IPP COSI	10.0 mas	28.0 mas
$\Delta$ IPP SH09	9.4 mas	21.2 mas

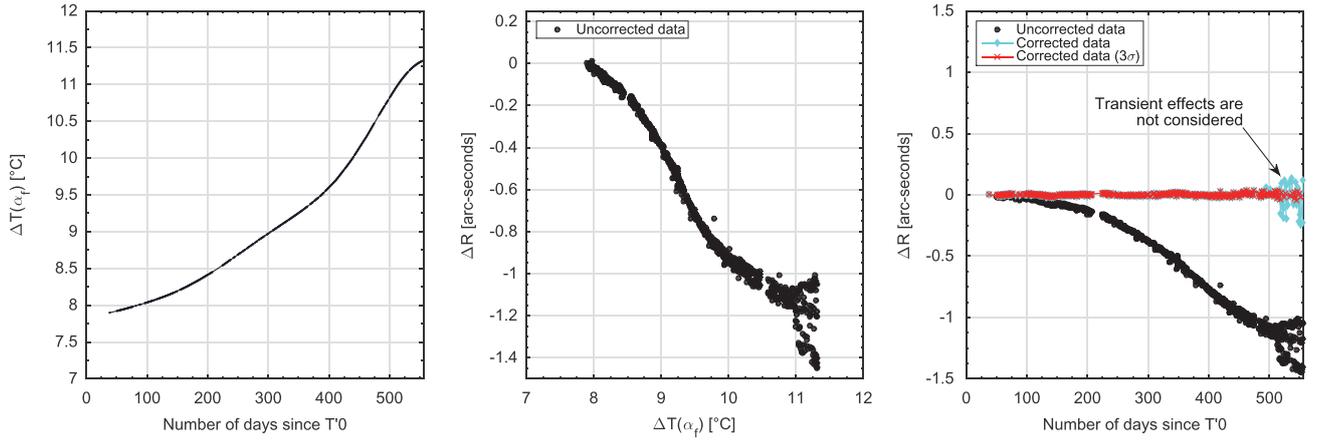
**Note.** Some models use theoretical approaches, such as VAL81 (Vernazza et al. 1981), FCH09 (Fontenla et al. 2009), and COSI (COde for solar irradiance; Shapiro et al. 2010). Others are based on physical principles (SH09; Short & Hauschildt 2009).

variation in turbulence, we first take daily mean values from our data (right-hand graph in Figure 13). Additionally, we estimate that the Fried parameter is between 2.3 and 7 cm at 782.2 nm (relationship among the solar limb first derivative FWHM that it is measured by SODISM II, the pupil diameter  $D_{PS}$  of the telescope equated to  $r_0$ , and the possible astigmatism defect). Similarly, we have a measure at 535.7 nm of the solar limb first derivative FWHM considered near 8.6 arcsec (see Figure 13 of Meftah et al. 2014a). Thus, we estimate that the average Fried parameter is between 2.3 and 3.7 cm at 535.7 nm (see Figure 12 to better understand the likelihood of astigmatism defect). This result is similar to the one we obtained using measurements performed by the MISOLFA instrument. In this study, we are not interested in absolute determination of the solar diameter (impact of measurement bias) but rather in variations in solar diameter over time. Daily mean solar radii are obtained from measurements that are derived from different atmospheric conditions. However, the solar limb first derivative FWHM at 782.2 nm shows no sign of change for long-term measurements. Thus, the monthly averages of solar radii are excellent indicators for our measurements. Finally, we carry out monthly averages of the observed solar radii (on the right in Figure 13). At the start of 2014, the weather conditions were very bad and observations were very limited. We can see the effects of these conditions on our monthly averages of solar radii (Figures 13 and 18). The operation repeatability is important, as is the SODISM II instrumental stability. The SODISM II solar radius at 782.2 nm shows amplitudes (cloud of points) below  $\pm 50$  mas

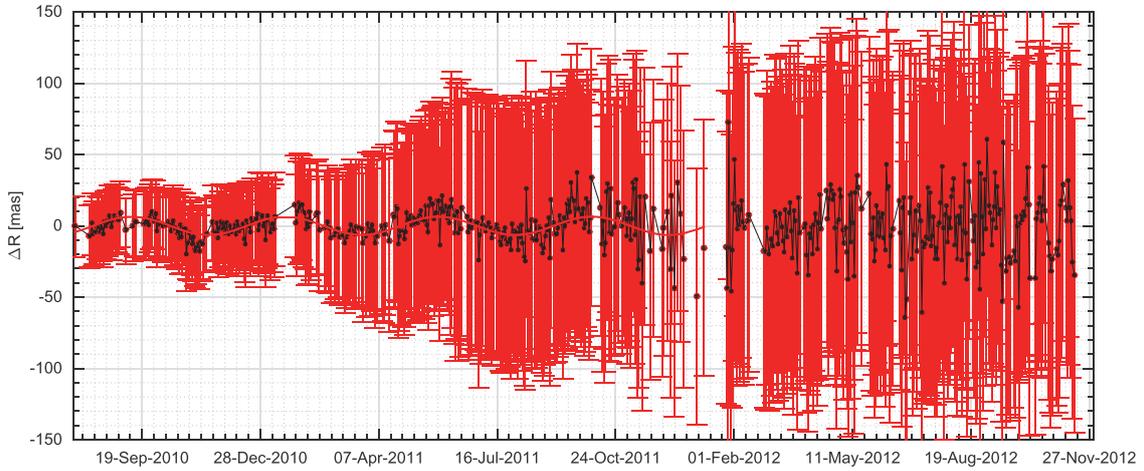
after 40 months of measurement (Figure 18). The trend of our measurements during the period 2011–2014 shows a solar radius evolution below 25 mas (tendency with a nonsignificant negative slope). This result requires a more detailed analysis (turbulence affects impact, etc.). Indeed, the trend may be of solar origin, of instrumental origin, of atmospheric origin, or a combination of the three.

#### 4.2. Solar Radius Measurements Obtained by PICARD Space Mission

Using various images acquired by SODISM, we calculated the value of the observed mean solar radius over time. The different measurements taken show a temporal drift that is a function of wavelength (see Figure 1). As stated in the previous sections, a temperature gradient in the telescope’s front window greater than  $5^\circ\text{C}$  leads to significant variations in solar radius measurements related to degradation of the telescope’s PSF (Figure 8). Thus, on the basis of optical coating degradation evaluation by a contamination effect ( $\alpha_f$  variations), we estimated the evolution of the temperature gradient in the SODISM front window over time (Figure 14). Temperatures range from  $8^\circ\text{C}$  to  $11.5^\circ\text{C}$ . These temperature variations are compatible with those we calculated (Figure 9) when  $\alpha_f$  was taken to be constant. Thus, the slow variations in solar radius observed by SODISM can only be explained by instrumental effects associated with a temperature gradient in the telescope front window and by initial calibration errors. In fact, comparison with the very good measurements taken on the ground demonstrates this state of affairs. Similarly, the spectral effects that we observe are not in phase and can be explained by a temperature gradient, in accordance with the models, which we developed in Section 3.1. Consequently, we can consider SODISM to be a very good indicator of variation in solar radius for short-term period, contrary to SODISM II. The ground instrument is subject to atmospheric effects (short-term, medium-term, and long-term effects) but remains instrumentally stable with time, whereas SODISM is subject to the effects of the space environment (long-term effects). For SODISM, more the wavelength of observation is great (e.g., at 782.2 nm) and more the instrumental effects on the PSF (front window temperature gradient impact) are reduced. Similarly, for SODISM II, more the wavelength of observation is great and more the effects of atmospheric turbulence are less important



**Figure 14.** Left: evolution of SODISM front window temperature gradient (obtained from the steady-state thermal model). Middle: relation between temperature gradient and uncorrected solar radii at one astronomical unit. Right: evolution of the solar radii at one astronomical unit (uncorrected and corrected) since the first measurements carried out by SODISM in 2010 August ( $T'_0$ ).

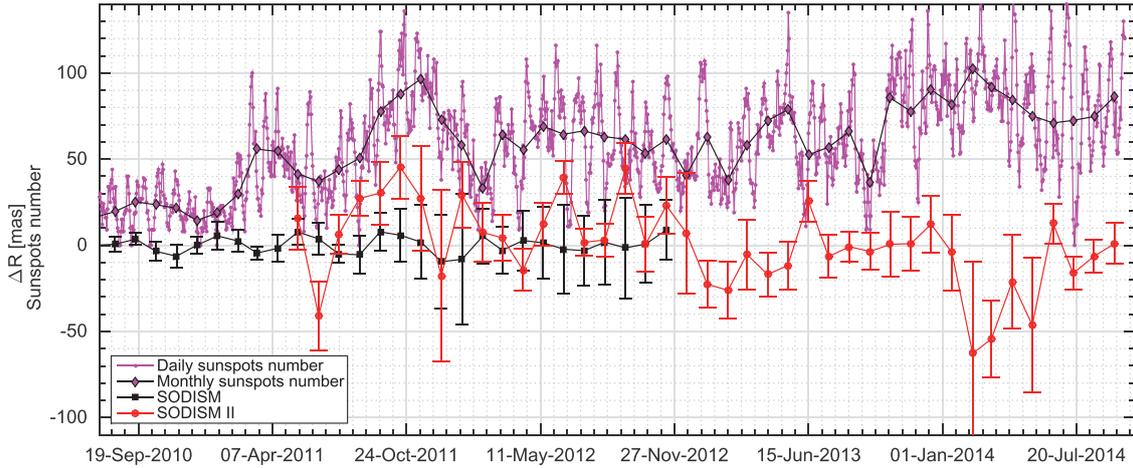


**Figure 15.** Evolution of daily mean solar radius measured by SODISM, together with associated uncertainties. The evolution is given by the continuous red line (sinusoidal fit). The period of 129.5 days is clearly observable in 2010 and 2011.

(turbulence bias on solar radius measurements). In the PICARD case, the channel at 782.2 nm is optimal. We highlight the importance of ground-based and space measurements. Indeed, our measurements show the benefit of simultaneous measurements obtained from ground and space observatories. As a result, these two means are complementary to each other and represent a feedback for solar observations. We therefore focused in particular on SODISM measurements taken at 782.2 nm. The correction of the solar radius, which is associated with slow drift of our measurements, is shown in Figure 14 (right panel). The cyan curve in Figure 14 shows the evolution of the solar radius obtained after applying the temperature correction (Figure 14, left panel) connected to the solar radius adjustment (see Figure 8). The transient effects observed during eclipses are not taken into account in our model (thermal model's limitation). We thus filter data at  $3\sigma$  in order to obtain an evolution that corresponds to the stabilized phases of our instrument. Figure 15 gives the evolution of SODISM solar radius, together with associated uncertainties that increase over time. The cloud of points (solar radius measurements) is then fitted by a sine function with a frequency, an amplitude, and a phase. The goodness of the fit is excellent ( $R^2$  coefficient of determination of 0.97). Peak-to-

peak amplitude of the solar radius fit is close to  $13 \pm 1$  mas (statistical uncertainty with 95% confidence bounds). Moreover, the obtained results highlight a periodicity of  $129.5 \pm 1.0$  days. In 2012, this periodicity is difficult to detect (Figure 16). In closing, SODISM solar radius amplitudes (cloud of points) are smaller than  $\pm 20$  mas (i.e.  $\pm 14.5$  km) for the years 2010–2011.

By the end of 2011, the variations of the solar radius during an orbit become more important. Similarly, periods of eclipses from 2011 November have a significant impact on the variations of the solar radius (Figure 1). In late 2011, the deterioration in the UV band (Figure 2) is significant (more than 90% at 215.0 nm). In late 2011, the front window mechanical interface temperature ( $\theta_{out}$ ) continues to increase (about  $35^\circ\text{C}$ ), which is between  $20^\circ\text{C}$  and  $35^\circ\text{C}$  during periods of eclipses between 2011 November and 2012 February (Figure 5). But what is most critical is that the temperature gradient of the front window has found a balance between  $10^\circ\text{C}$  and  $12^\circ\text{C}$ . This temperature gradient range corresponds to an unstable region of the solar radius determination (Figure 8, right panel). Indeed, in this temperature gradient range, determining the inflection point is more complex (Figure 7). In addition, from mid-2011, the uncertainty of the temperature



**Figure 16.** Evolution of monthly mean solar radius variations (SODISM and SODISM II) vs. daily and monthly mean number of sunspots. Error bars represent statistical uncertainty at  $1\sigma$ . The period of 129.5 days is not clearly visible in 2012, where the dispersion of the data in this period is greater.

gradient determination increases significantly (Figure 15). This demonstrates that the problem is not trivial and requires a more detailed analysis during this period.

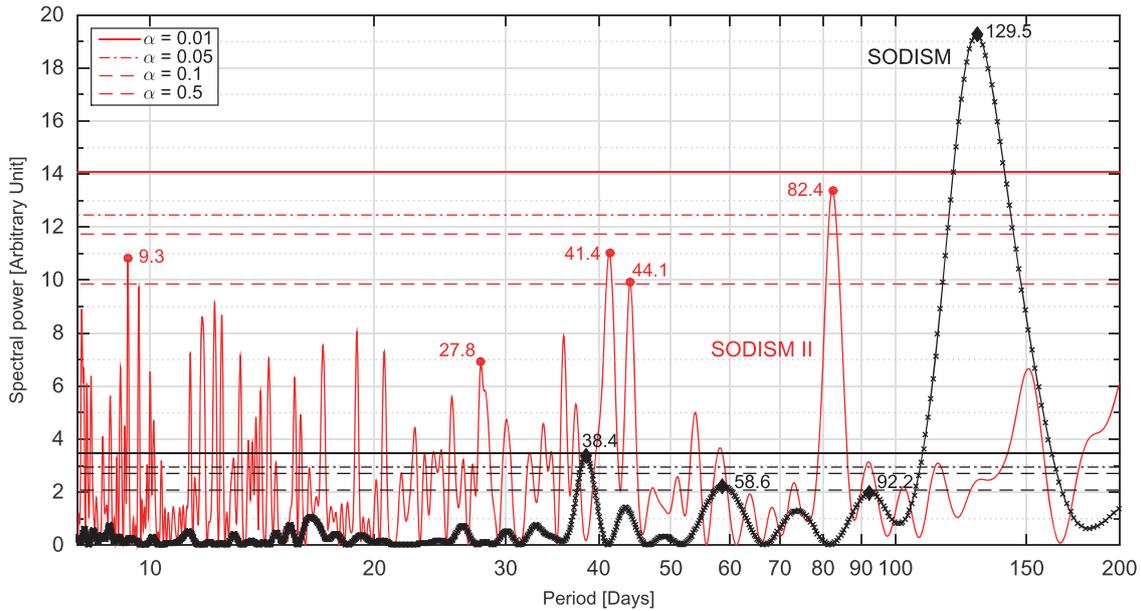
#### 4.3. Source of Signal Taken by Both Instruments

PICARD ground-based and space observatories represent a joint venture to study the Sun. Thus, we need to establish data linkages with SODISM and SODISM II. Figure 16 gives PICARD solar radius variations based on the monthly averaged values. Through these data, there is no significant common source of signal taken by both instruments. Pearson's correlation coefficient ( $k_p$ ) between SODISM and SODISM II solar radius variations is near 0.1. Similarly, Pearson's correlation coefficient between SODISM solar radius variations and monthly mean sunspot numbers is close to 0.04. Moreover, there is a very low decreasing linear relationship (anticorrelation) between SODISM II solar radius variations and monthly mean sunspot number. However, this relationship is not clearly defined ( $k_p = -0.14$ ). To better analyze the signal taken by both instruments, we also used spectral analysis. In order to further look for periodicities, we computed the Lomb–Scargle (Lomb 1976; Scargle 1982) periodograms using the full time series of SODISM and SODISM II solar radius measurements. The Lomb–Scargle periodogram analysis is a commonly used first approach for spectral analysis of uneven time series. Its main interest is that it avoids the use of interpolation or any other means of filling the gaps, which are needed when applying a classical Fourier transform. In Figure 17, we show the two Lomb–Scargle periodograms with estimates of significance levels against the null hypothesis of random noise. For space data covering years 2010–2011 (SODISM), the peak around 129 days of periodicity, already obtained from our sine-wave fitting, is found to be significant at the 99% confidence level. There is also a periodicity around 38 days (99% confidence level) associated with solar radius variation of very low amplitude ( $\pm 2$  mas). For ground-based data, covering years 2011–2014 (SODISM II), only one peak for periodicity around 82 days is found to be significant at the 95% confidence level. A periodicity around 27 days, corresponding to the synoptic solar rotation rate, was previously found in the analysis of Calern and Rio Astrolabe measurements over cycles 21, 22, and 23 (Moussaoui et al. 2001; Qu

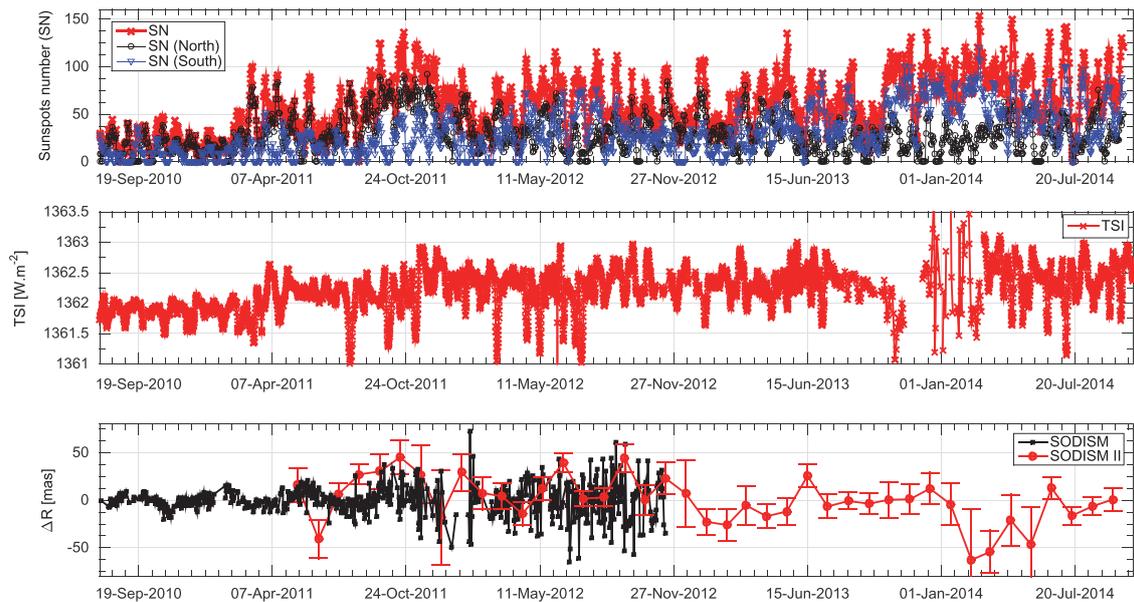
et al. 2015). This periodicity is not found to be significant in our analysis of both space- and ground-based full-time data over the rising phase of cycle 24. The periodicity around 82 days has previously been interpreted as a possible second harmonic of the rotation rate. However, without significant signal for the main peak (27 days) and first harmonic (54 days), this interpretation is doubtful in our case. The interpretation of the only significant periodicity around 129 days found in the SODISM space data is not obvious, but we notice that a similar periodicity has been reported in solar flare occurrence during cycle 23 (Bai 2003) and a close periodicity was found in the frequency shifts of low-degree  $p$ -modes over cycle 22 and the rising phase of cycle 23 (123.7 days; Salabert et al. 2002). In the Calern Astrolabe solar radius measurements over cycles 21 and 22, a periodicity of 122.3 days was also found to be significant by Moussaoui et al., but it was not found by Qu et al. (2015) in their analysis of the Rio Astrolabe data over cycle 23. This is a first attempt to look for high-frequency signal in our new time series of ongoing radius measurements covering more than 4 yr. With the main periodicity for solar activity being around 11 yr, it is clear, however, that we have to wait for a longer homogeneous time series, over which we will be able to perform more detailed spectral analysis.

#### 4.4. Fluctuations in the Solar Radius as a Function of Solar Activity

From PICARD measurements and models, we can determine solar radius fluctuations as a function of solar activity during the rising phase of cycle 24 (Figure 18). This particular cycle is the smallest since solar cycle 14. Our ground-based observations (2011–2014 period) could not find any direct link between solar activity and significant fluctuations in solar radius (with amplitudes around  $\pm 50$  mas). In fact, we find no relationship between the significant fluctuations in solar radius and the change in the TSI, which is connected with the number of sunspots. By contrast, measurements taken by SODISM (2010–2011 period) highlight a  $\pm 6.5$  mas variation in the solar radius with a periodicity of  $129.5 \pm 1.0$  days. However, no significant variation of the solar radius (greater than  $\pm 20$  mas) has been observed. Thus, there is no direct link with solar activity for significant variation of the solar radius for the years



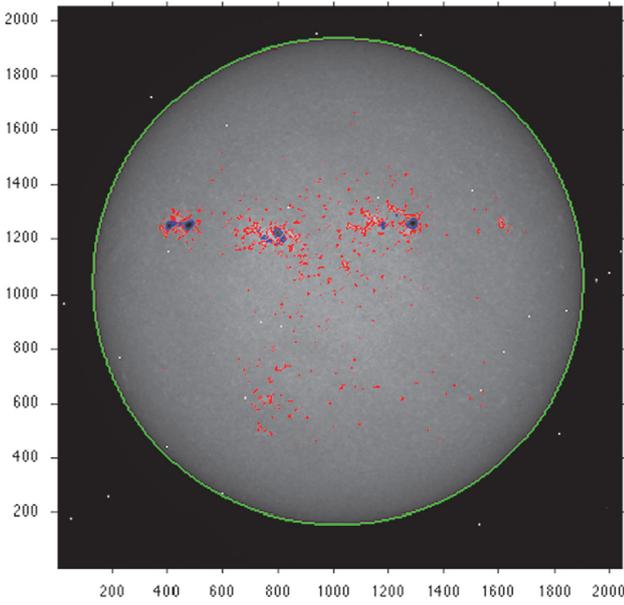
**Figure 17.** Lomb–Scargle periodogram of two time series (SODISM and SODISM II solar radius variations) with statistical significance levels ( $\alpha = 0.01$  corresponds to 99% significance level). Periodicities of the solar radius variations from a few days to 200 days. SODISM observations were made from 2010 to 2011. SODISM II observations were made from 2011 to 2014.



**Figure 18.** Top: evolution of solar activity characterized by the number of sunspots. Middle: evolution of total solar irradiance since 2010 August. Bottom: evolution of solar radius measured by the SODISM space instrument and by the SODISM II ground instrument.

2010–2011. Moreover, we obtain overlapping results between those obtained by SODISM and those obtained by SODISM II. After 2012, the amplitudes measured by SODISM are greater owing to the increase of the instrument degradation. The rising phase of solar cycle 24 became apparent as of 2011, a period in the course of which we have useable observations, and where no significant relationship with TSI is detectable. The study of variations in TSI is important in order to understand how the Sun affects the Earth’s climate. In fact, it seems that the observed TSI variations result from the contribution of a certain number of solar surface characteristics with different combinations of magnetic and radiative intensities. These

characteristics are traditionally classified according to different structures (the quiet Sun, the photospheric sunspots, the plages and faculae that are characterized by strong magnetic fields, and the network that is intermediate in the intensity of the magnetic field and intensity of radiation). All these structures (Figure 19) contribute partially to variations in the TSI. Using solar images in the continuum, along with magnetograms, the Spectral And Total Irradiance REconstructions (SATIRE) model makes it possible to reconstruct TSI during solar cycles 21 to 23. This model thus explains 92% of TSI variations between 1978 and 2009 and over 96% during solar cycle 23 (Ball et al. 2012). From the measurements we performed, we



**Figure 19.** Image at 393.37 nm taken by the SODISM instrument (CCD with  $2048 \times 2048$  pixels) that can highlight sunspots (blue areas), plages, and faculae (red areas). The image is at a wavelength that allows the active region detection, which provides information for solar limb measurements. The solar disk is represented by the green contour.

can confirm that the contribution of solar radius fluctuations is weak with regard to TSI variations and that they are estimated to be less than 3% during the rising phase of solar cycle 24. Our results are compatible with the work of Ball et al. and with measurements carried out by MDI. As a conclusion, combining the measurements made by MDI, SODISM II, and SODISM, we can create a composite associated with the evolution of the solar radius, which shows no clear relationship between solar activity and significant fluctuations in the observed solar radius during cycles 23 and 24 (Figure 20).

## 5. CONCLUSIONS

The measurements taken by the instruments on board the *PICARD* satellite were completed by the ground-based measurements. This has made it possible to understand and model the disruptive effect of the Earth's atmosphere on solar observations conducted from the ground. Among the ground-based instruments, a replica of the SODISM imaging telescope coupled to a MISOLFA turbulence monitor were and continue to be used. Measurements performed by instruments on the *PICARD* mission have allowed us to establish the evolution of the solar radius during the rising phase of solar cycle 24. It highlights the complementarity of the measurements made on the ground and outside the atmosphere. For this, we developed specific methods in order to correct the various measurements. Fluctuations in the observed solar radius with the SODISM II instrument show amplitudes below  $\pm 50$  mas after 40 months of measurement. The 50 mas amplitudes obtained from SODISM II could be from the instrument and/or Earth atmosphere for periods when the comparison is possible with the space instrument SODISM (in 2011, where there is a relatively large variation in the solar activity). Moreover, ground-based measurements over the period 2011–2014 show a nonsignificant negative trend. Indeed, the trend uncertainty requires a more detailed

analysis. Our ground-based observations could not find any direct link between solar activity and significant fluctuations in solar radius, considering that the variations, if they exist, are included in measurement uncertainty. Similarly, on the basis of measurements carried out by SODISM in orbit, we obtain amplitudes in the solar radius that are smaller than  $\pm 20$  mas (i.e.  $\pm 14.5$  km) for the years 2010–2011. Our space observations could not find any direct link between solar activity and significant fluctuations in solar radius (greater than  $\pm 20$  mas). Thus, we were able to confirm, from the measurements we made, that the contribution of solar radius fluctuations is low with regard to variations in TSI. However, we must continue our ground-based measurements to better quantify these variations during this very particular solar cycle. Indeed, we find a small variation of the solar radius from space measurements with a typical periodicity ( $\pm 6.5$  mas variation in the solar radius with a periodicity of  $129.5 \pm 1.0$  days).

We hope that the *PICARD* ground-based mission will continue its measuring campaign during the descending phase of solar cycle 24.

This work has been supported by the CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) and by the French Space Agency (Centre National d'Etudes Spatiales). We also wish to thank PNST (Programme National Soleil-Terre) for his support. We acknowledge OCA, LAGRANGE, and LATMOS for their continuous support in maintaining and operating the “*PICARD SOL*” instruments.

## APPENDIX A DETERMINATION OF THE SOLAR ABSORPTION COEFFICIENT ( $\alpha_f$ )

Radiative thermal exchanges are related to electromagnetic ray emission and absorption phenomena by the areas in question. In the case of a semitransparent material such as our front window, absorption  $A(\lambda)$  is dependent on transmission  $\tau(\lambda)$ ,  $\varrho_0(\lambda)$ , and wavelength  $\lambda$ :

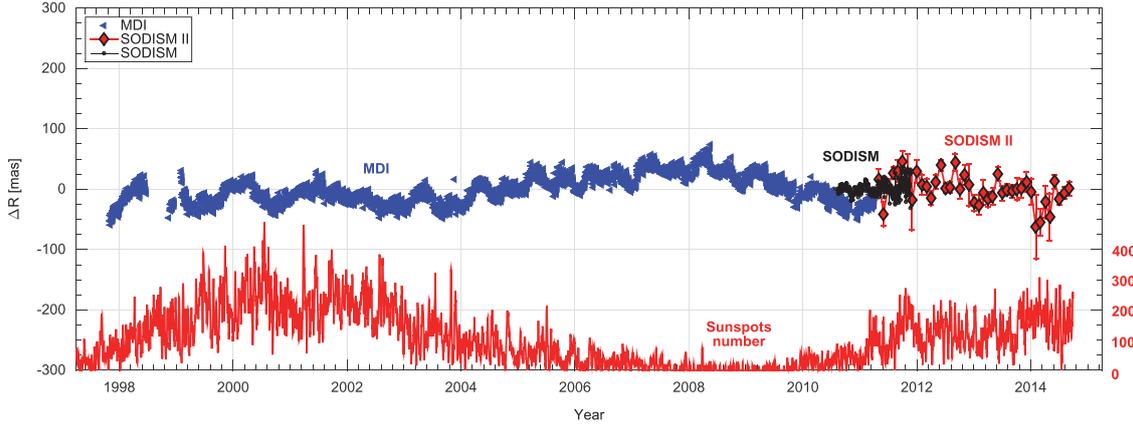
$$A(\lambda) = 1 - \tau(\lambda) - \varrho_0(\lambda) \quad (7)$$

$$\tau(\lambda) = f(\tau_0(\lambda), t_\lambda) \quad (8)$$

$$\varphi_S \simeq \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} 2\pi \times \frac{R_\odot}{d_{\text{Sun}}} \times \frac{h \times c^2}{\lambda^5 \times e^{\frac{h \times c}{\lambda \times k \times T_{\text{eff}}}} - 1} d\lambda \quad (9)$$

$$\alpha_f = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} 2\pi \times \frac{R_\odot}{d_{\text{Sun}}} \times \frac{h \times c^2}{\lambda^5 \times e^{\frac{h \times c}{\lambda \times k \times T_{\text{eff}}}} - 1} \times A(\lambda) d\lambda}{\varphi_S}, \quad (10)$$

where  $\tau_0(\lambda)$  corresponds to the initial transmission of our window measured in the laboratory as a function of wavelength (Meftah et al. 2014d), and  $t_\lambda$  corresponds to normalized telescope transmissions. The solar spectrum ranges from a few nm ( $\lambda_1$ ) to several dozen  $\mu\text{m}$  ( $\lambda_2$ ).  $R_\odot$  corresponds to the solar radius (696,156 km),  $d_{\text{Sun}}$  represents the Earth–Sun distance at one astronomical unit (149, 597, 870 km),  $h$  is associated with Planck's constant ( $6.626 \times 10^{-34}$  J s),  $c$  represents the speed of light in vacuum (299, 792, 458  $\text{m s}^{-1}$ ),  $k$  is the Boltzmann constant ( $1.38 \times 10^{-23}$  J  $K^{-1}$ ),



**Figure 20.** Evolution of solar radius variations measured by the two space instruments (MDI and SODSIM), and by the ground reference instrument (SODISM II) during solar cycles 23 and 24.

and  $T_{\text{eff}}$  is the effective temperature of the Sun assimilated to a blackbody (5778 K).

#### APPENDIX B DETERMINATION OF THE REFRACTION PARAMETERS ( $\alpha_r(T_a, P_a, f_h, \lambda)$ and $\beta(T_a)$ )

$\alpha_r(T_a, P_a, f_h, \lambda)$  is the air refractivity for local atmospheric conditions at a given wavelength, and  $n(T_a, P_a, f_h, \lambda)$  is the refractive index of air at the instrument (Ciddor 1996):

$$\alpha_r(T_a, P_a, f_h, \lambda) = n(T_a, P_a, f_h, \lambda) - 1. \quad (11)$$

$\beta(T_a)$  is the ratio between the height of the equivalent homogeneous atmosphere and the Earth radius of curvature at the observer position assuming the ideal gas law for dry air:

$$\beta(T_a) = \frac{P_a}{\rho \times g \times r_c} = \frac{C_a \times T_a}{r_c}, \quad (12)$$

where  $\rho$  is the air density,  $g$  is the gravity acceleration,  $C_a$  is a constant equal to  $29.255 \text{ m K}^{-1}$  (on the assumption that the ideal gas law is obeyed), and  $r_c$  represents the curvature of the Earth at Calern ( $\sim 6,367,512 \text{ m}$ ).

#### REFERENCES

Bai, T. 2003, ApJ, 591, 406  
Ball, R. S. 1908, A Treatise on Spherical Astronomy (Cambridge: Cambridge Univ. Press)  
Ball, W. T., Unruh, Y. C., Krivova, N. A., et al. 2012, A&A, 541, A27

Borgnino, J., Ricort, G., Ceppatelli, G., & Righini, A. 1982, A&A, 107, 333  
Braun, H., Christl, M., Rahmstorf, S., et al. 2005, Natur, 438, 208  
Bush, R. I., Emilio, M., & Kuhn, J. R. 2010, ApJ, 716, 1381  
Ciddor, P. E. 1996, ApOpt, 35, 1566  
Eddy, J. A., & Boornazian, A. A. 1979, BAAS, 11, 437  
Fontenla, J. M., Curdt, W., Haberreiter, M., Harder, J., & Tian, H. 2009, ApJ, 707, 482  
Fried, D. L. 1966, JOSA, 56, 1372  
Gilliland, R. L. 1981, ApJ, 248, 1144  
Hauchecorne, A., Meftah, M., Irbah, A., et al. 2014, ApJ, 783, 127  
Hestroffer, D., & Magnan, C. 1998, A&A, 333, 338  
Irbah, A., Meftah, M., Hauchecorne, A., et al. 2014, Proc. SPIE, 9143, 42  
Kuhn, J. R., Bush, R. I., Emilio, M., & Scherrer, P. H. 2004, ApJ, 613, 1241  
Laclare, F., Delmas, C., Coin, J. P., & Irbah, A. 1996, SoPh, 166, 211  
Lomb, N. R. 1976, Ap&SS, 39, 447  
Meftah, M., Corbard, T., Irbah, A., et al. 2014a, A&A, 569, A60  
Meftah, M., Dewitte, S., Irbah, A., et al. 2014b, SoPh, 289, 1885  
Meftah, M., Hauchecorne, A., Crepel, M., et al. 2014c, SoPh, 289, 1  
Meftah, M., Hochedez, J.-F., Irbah, A., et al. 2014d, SoPh, 289, 1043  
Morand, F., Delmas, C., Corbard, T., et al. 2010, CRPhy, 11, 660  
Moussaoui, R., Irbah, A., Fossat, E., et al. 2001, A&A, 374, 1100  
Parkinson, J. H., Morrison, L. V., & Stephenson, F. R. 1980, Natur, 288, 548  
Qu, Z. N., Kong, D. F., Xiang, N. B., & Feng, W. 2015, ApJ, 798, 113  
Rozelot, J. P., & Damiani, C. 2012, EPJH, 37, 709  
Salabert, D., Jiménez-Reyes, S. J., Fossat, E., Gelly, B., & Schmider, F. X. 2002, From Solar Min to Max: Half a Solar Cycle with SOHO, ed. A. Wilson (ESA SP-508; Noordwijk: ESA), 95  
Scargle, J. D. 1982, ApJ, 263, 835  
Shapiro, A. I., Schmutz, W., Schoell, M., Haberreiter, M., & Rozanov, E. 2010, A&A, 517, A48  
Shapiro, I. I. 1980, Sci, 208, 51  
Short, C. I., & Hauschildt, P. H. 2009, ApJ, 691, 1634  
Sofia, S., Girard, T. M., Sofia, U. J., et al. 2013, MNRAS, 436, 2151  
Toulmonde, M. 1997, A&A, 325, 1174  
Vernazza, J. E., Avrett, E. H., & Loesser, R. 1981, ApJS, 45, 635

## 2.5 Conclusions

A partir des mesures réalisées par les instruments de la mission PICARD, la valeur absolue du rayon solaire a été déterminée suivant plusieurs longueurs d’onde (393.37, 535.7, 607.1, 782.2 et 1025 nm). La mesure la plus précise a été obtenue à 607.1 nm lors du passage de Vénus de juin 2012. L’instrument spatial SODISM a permis de fournir une détermination précise du rayon solaire. Il s’agit d’une des rares mesures obtenues hors atmosphère. Le rayon du Soleil est égal à  $959.86 \pm 0.20$  secondes d’arc ; l’écart-type sur la mesure est d’environ  $\pm 0.03$  secondes d’arc. Il s’agit de la première détermination du rayon solaire hors atmosphère où un bilan d’erreurs détaillé est proposé ( $B_\xi = \pm 0.20$  secondes d’arc). **Dès lors, le rayon solaire mesure  $696\,156 \pm 145$  km (à  $1\sigma$ ).** Cette valeur est supérieure à celle recommandée par l’UAI (Union Astronomique Internationale) lors de la XXIX<sup>ème</sup> Assemblée Générale ( $R_\odot^N = 695\,700$  km). Cette normalisation a été jugée nécessaire et particulièrement utile pour les astronomes. Cependant, la valeur nominale recommandée par l’UAI est légèrement différente de la valeur canonique [Auwers, 1891] utilisée jusqu’à présent. Elle est aussi différente des dernières déterminations du rayon solaire obtenues à partir des instruments spatiaux (MDI, HMI et SODISM). Il semblerait donc que la valeur adoptée par l’UAI en 2015 soit sous estimée. Dès lors, une réévaluation est fortement souhaitée. Disposant d’une nouvelle valeur du rayon solaire, il y a encore des questions débattues, parmi lesquelles la dépendance en longueur d’onde et la variabilité temporelle du rayon solaire.

Tout d’abord, **la dépendance du rayon solaire en fonction de la longueur d’onde est très faible.** Les résultats obtenus par les instruments de la mission PICARD sont proches de ceux obtenus à partir des modèles théoriques du limbe solaire (VAL81, FCH09, COSI, SH09, Modèle 3-D). Entre 535.7 et 782.2 nm, la valeur du rayon solaire varie avec la longueur d’onde (plus  $\lambda$  augmente, et plus le rayon solaire augmente). A partir des mesures réalisées en orbite, la différence entre le rayon solaire mesuré à 535.7 nm et celui mesuré à 782 nm est de environ 0.08 secondes d’arc ( $\sim 58$  km). Cette différence est supérieure à celle obtenue à partir des modèles théoriques du limbe solaire ( $\sim 30$  km). A 1025.0 nm, le rayon solaire mesuré par l’instrument SODISM II est quasiment identique à celui obtenu à 607.1 nm. La différence entre les deux mesures est de l’ordre de 0.03 secondes d’arc ( $\sim 22$  km). A 1025.0 nm, le rayon solaire mesuré par l’instrument SODISM II est plus petit que celui mesuré à 782.2 nm. Lorsque la température de l’atmosphère solaire (photosphère) diminue, l’altitude augmente (Figure 1.7). Entre 535.7 et 850.0 nm, la température du Soleil diminue (Figure 2.24) ; dans cette bande spectrale, le rayon solaire ne peut que augmenter avec la longueur d’onde. A partir de 850.0 nm et jusqu’à  $\sim 1600.0$  nm, plus la longueur d’onde augmente et plus le rayon

solaires diminue. Dès lors, les mesures obtenues à partir des instruments de la mission PICARD sont cohérentes avec les modèles de physique solaire.

Enfin, **aucune tendance long-terme du rayon solaire au cours du cycle 24 n'est détectable** (Figure 2.25). Ce résultat est cohérent avec celui proposé par Antia (2003) où aucune évidence de la variation du rayon solaire n'a été détectée à partir de l'analyse des « modes f ». Il n'y a aucune corrélation entre la mesure du rayon solaire et l'activité du Soleil sur de longues périodes de temps (aucune tendance à long-terme entre 2010 et 2017). A l'inverse, sur des périodes de courtes durées, des variations du rayon solaire de faibles amplitudes ont été décelées (variations de  $\pm 6.5$  mas ( $\pm 4.7$  km) avec une périodicité de  $\sim 130$  jours entre 2010 et 2011 dont l'origine reste à déterminer).

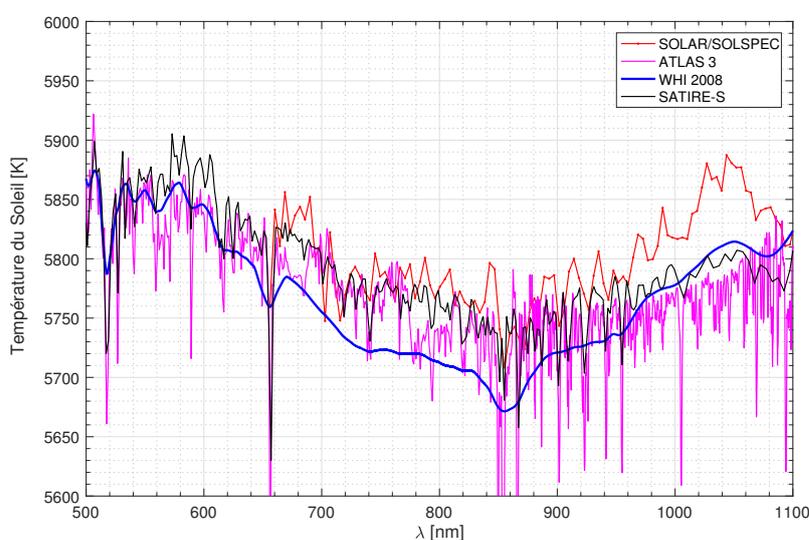


FIGURE 2.24 Evolution de la température du Soleil en fonction de la longueur d'onde. Valeurs obtenues à partir de SOLAR/SOLSPEC, ATLAS 3, WHI 2008 et SATIRE-S.

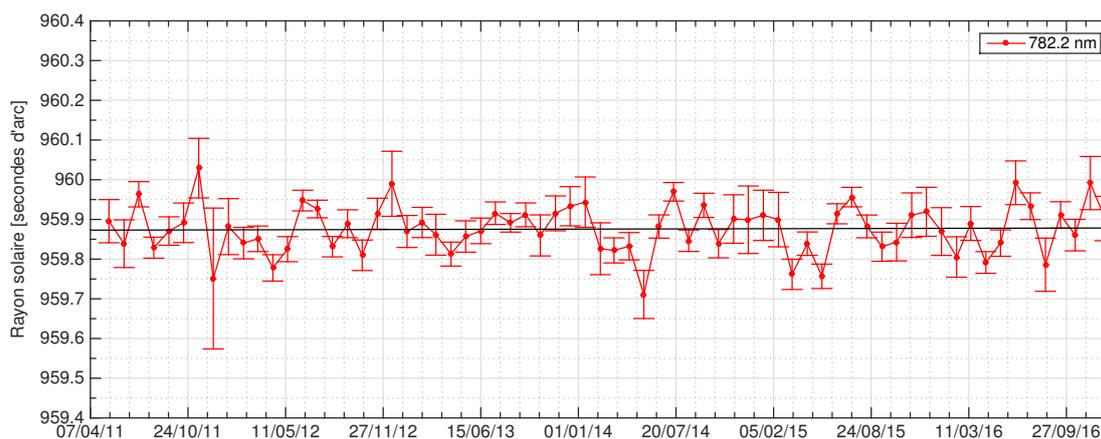


FIGURE 2.25 Evolution du rayon solaire au cours du temps (mesures acquises par SODISM II de mai 2011 à janvier 2017). Au cours de cette période, la variation long-terme du rayon solaire ( $\Delta R_{\odot}$ ) est très faible (tendance de  $-1 \pm 26$  mas à  $1 \sigma$  pendant 5.5 ans).

# Chapitre 3

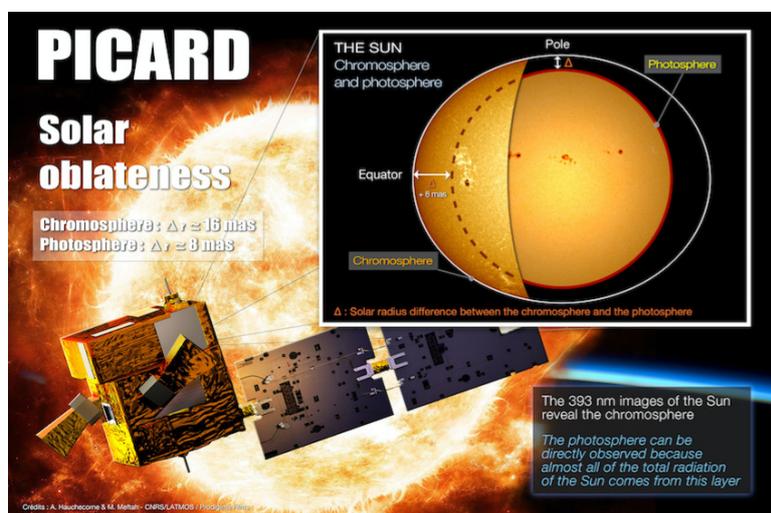
## La forme du Soleil et ses variations au cours du cycle 24

### Sommaire

---

3.1	Historique des mesures . . . . .	116
3.2	Expression de l'aplatissement solaire . . . . .	118
3.3	Détermination absolue de l'aplatissement solaire . . . . .	121
3.4	Etude des variations de l'aplatissement solaire . . . . .	121
3.5	Conclusions . . . . .	152

---



**FIGURE 3.1** Forme du Soleil pour deux régions de l'atmosphère solaire (la chromosphère (393.37 nm) et la photosphère (535.7, 617.3 et 782.2 nm)). La différence entre le rayon équatorial et le rayon polaire du Soleil peut varier en fonction de la région solaire observée (différence de 8 mas entre la chromosphère et la photosphère ; résultat obtenu avec l'instrument SODISM de la mission spatiale PICARD).

### 3.1 Historique des mesures

Depuis plus de cent ans, plusieurs mesures de l’aplatissement solaire ont été réalisées et montrent une grande dispersion au niveau des résultats (Table 3.1). Les premières déterminations théoriques ont été obtenues par Paul Harzer (1857–1932) [Harzer, 1891] et par Simon Newcomb (1835–1909) [Newcomb, 1895].

**TABLE 3.1:** Principales mesures de la différence entre le rayon équatorial et le rayon polaire ( $\Delta r_{\odot}$ ). Principale référence utilisée :  $a \rightarrow$  Rozelot et Damiani (2011).  $\Delta r_{\odot}$  est proche de 10 mas pour un corps homogène en équilibre hydrostatique.

Auteur(s)	Dates	Méthode / Instrument	$ \Delta r_{\odot} $ [mas]
Harzer (1891) <sup>a</sup>	1891	Détermination théorique	6029.23
Newcomb (1895) <sup>a</sup>	1895	Détermination théorique	500.00
<a href="#">Auwers (1891)</a>	1874–1882	Heliomètre	38.00 ± 23.00
Ambromm and Schur (1905) <sup>a</sup>	1890–1905	Heliomètre	499.81 ± 23.00
Poor (1905) <sup>a</sup>	1860–1894	Plaques photographiques	200.00 ± 20.00
Gialanella (1953) <sup>a</sup>	1874–1937	Lunette méridienne	163.14 ± 40.00
Dicke (1967) <sup>a</sup>	1966	Télescope	43.30 ± 3.30
Lieske (1969) <sup>a</sup>	1949–1968	Orbites planétaires	33.72 ± 28.79
Hill and Stebbins (1975)	1973	Télescope (SCLERA)	9.20 ± 6.30
Hill et al. (1982) <sup>a</sup>	1982	« Rotational splitting »	15.69 ± 1.87
Dicke et al. (1986) <sup>a</sup>	1983	Télescope	19.20 ± 1.40
Dicke et al. (1986) <sup>a</sup>	1984	Télescope	14.40 ± 4.10
Dicke et al. (1986) <sup>a</sup>	1984	Télescope	5.60 ± 1.30
Bearsley (1987) <sup>a</sup>	1983	Télescope	13.80 ± 1.30
Hill et al. (1986) <sup>a</sup>	1981–1985	« Rotational splitting »	15.11 ± 1.73
Dicke et al. (1987) <sup>a</sup>	1985	Télescope	14.60 ± 2.20
Landgraf (1992) <sup>a</sup>	1949–1987	Orbites planétaires	6.91 ± 8.35
Sadsakov (1988) <sup>a</sup>	1975–1986	Lunette méridienne	95.96 ± 150.00
Afanasava (1990) <sup>a</sup>	1980–1986	Orbites planétaires	8.72 ± 1.30
Maier et al. (1992) <sup>a</sup>	1990	Sextant (SDS)	5.37 ± 6.05
Egidi et al. (2006) <sup>a</sup>	1992	Sextant (SDS)	4.13 ± 1.92
Egidi et al. (2006) <sup>a</sup>	1994	Sextant (SDS)	8.16 ± 2.02
Egidi et al. (2006) <sup>a</sup>	1995	Sextant (SDS)	8.25 ± 1.34
Egidi et al. (2006) <sup>a</sup>	1996	Sextant (SDS)	9.88 ± 1.82
Rösch (2001) <sup>a</sup>	1996	Heliomètre	11.52 ± 3.36
Paternò (1996) <sup>a</sup>	1992–1994	SDS et héliosismologie	8.09 ± 0.00
Emilio et al. (2007) <sup>a</sup>	1997	MDI	8.70 ± 2.80
Pijpers (1998) <sup>a</sup>	1998	« Rotational splitting » SoHO	8.08 ± 0.01
Laclare (1999) <sup>a</sup>	1980–1998	Astrolabe (Calern, F)	80.00 ± 20.00
Emilio et al. (2007) <sup>a</sup>	2001	MDI	18.90 ± 1.90

TABLE 3.1: (suite)

Auteur(s)	Dates	Méthode / Instrument	$ \Delta r_{\odot} $ [mas]
Rösch (2003) <sup>a</sup>	2001	Heliomètre	9.04 ± 2.90
Noël (2003) <sup>a</sup>	1990–2002	Astrolabe	171.00 ± 30.00
Reis Neto (2003) <sup>a</sup>	1998–2000	Astrolabe	13.00 ± 4.00
Pitjeva (2005) <sup>a</sup>	1961–2003	Orbites planétaires	8.05 ± 0.04
Emilio (2005) <sup>a</sup>	1972–1998	Astrolabe	54.00 ± 30.00
Fivian et al. (2008) <sup>a</sup>	2002–2008	RHESSI	8.01 ± 0.14
Antia et al. (2008) <sup>a</sup>	1996–2006	« Rotational splitting » SoHO	8.09 ± 0.00
Damiani et al. (2010) <sup>a</sup>	1993–2008	Heliomètre	8.83 ± 2.85
<a href="#">Kuhn et al. (2012)</a>	2010–2012	HMI (617.3 nm)	7.20 ± 0.49
<a href="#">Irbah et al. (2014)</a>	2011	SODISM (535.7 nm)	8.40 ± 0.30
<a href="#">Meftah et al. (2015b)</a>	2010–2011	SODISM (782.2 nm)	7.90 ± 0.30
<a href="#">Meftah et al. (2016c)</a>	2011	SODISM (393.37 nm)	16.40 ± 3.10
<a href="#">Meftah et al. (2016d)</a>	2010–2015	HMI (617.3 nm)	8.36 ± 0.49

Dès la fin du dix-neuvième siècle, la mesure de l’aplatissement solaire a fasciné les astronomes. L’objectif de cette mesure était de pouvoir expliquer le résidu de l’avance observée au niveau du périhélie de Mercure ( $\sim 43.11$  secondes d’arc par siècle). Le résidu d’avance séculaire du périhélie de Mercure ( $\varphi$ ) mettait alors en évidence l’insuffisance de la théorie newtonienne. L’anomalie d’observation sera expliquée grâce à la théorie de la relativité générale [Einstein, 1916], où une valeur du résidu d’avance séculaire du périhélie de Mercure égale à 42.98 secondes d’arc peut être calculée à partir de l’Equation 3.1. Par ailleurs, l’aplatissement solaire permet d’expliquer une faible partie du résidu de l’avance observée au niveau du périhélie de Mercure ( $\sim 0.15$  secondes d’arc par siècle). En effet, un des tests les plus connus de la relativité générale résulte de la combinaison entre les mesures de la précession de l’orbite de Mercure [Shapiro et al., 1976; Anderson et al., 1987; Anderson et al., 1991; Anderson et al., 1992; Pijpers, 1998] et la détermination du moment quadropolaire gravitationnel du Soleil ( $J_2$ ). Lors de la révolution complète de Mercure autour du Soleil ( $\varphi = 2\pi$  ou  $T_{\varphi} = 87.96934$  jours), l’avance du périhélie de Mercure ( $\delta\bar{\omega}$ ) a donc pour expression :

$$\delta\bar{\omega} = \frac{6\pi GM_{\odot}}{a_{\varphi}(1 - e_{\varphi}^2)c^2} \times \lambda_p \simeq 5.019 \cdot 10^{-7} \times \lambda_p \text{ radians par révolution} \quad (3.1)$$

$$\delta\bar{\omega} \simeq 42.98 \times \lambda_p \text{ secondes d’arc par siècle}$$

$$\lambda_p = \frac{1}{3}(2 - \beta + 2\gamma) + \frac{R_{\odot}^2 c^2}{2GM_{\odot} a_{\varphi}(1 - e_{\varphi}^2)} J_2$$

où  $a_{\text{♁}}$  correspond au demi-grand axe de l'orbite de Mercure.  $e_{\text{♁}}$  représente l'excentricité de l'orbite de Mercure qui est relativement importante.  $\lambda_p$  est un coefficient de correction qui prend en considération les paramètres d'Eddington-Robertson ( $\beta$  et  $\gamma$ ) du formalisme PPN (théorie à paramètres post-newtoniens). Dans la théorie générale de la relativité, nous avons  $\beta=\gamma=1$ . Le coefficient  $\lambda_p$  dépend aussi du rayon du Soleil ( $R_{\odot}$ ), de sa masse ( $M_{\odot}$ ), de la vitesse de la lumière ( $c$ ), de la constante de gravitation ( $G$ ), des paramètres de l'orbite de Mercure ( $a_{\text{♁}}$  et  $e_{\text{♁}}$ ) et du moment quadrupolaire gravitationnel du Soleil ( $J_2$ ).  $\lambda_p$  est proche de 1.  $J_2$  est lié à la valeur de l'aplatissement solaire ( $\Delta r_{\odot}$ ). Dès lors, la mesure précise de  $\Delta r_{\odot}$  est nécessaire.

Aujourd'hui, la connaissance de la forme de notre étoile permet de répondre à d'autres problématiques scientifiques. Les modèles de la structure interne du Soleil (Section 1.7) prennent en compte une rotation à grande échelle de notre étoile. Ils reposent très souvent sur des hypothèses simplificatrices où le Soleil est considéré comme une sphère parfaite (équilibre à symétrie sphérique) ; les inhomogénéités à petite échelle sont rarement considérées. De plus, les modèles de l'intérieur solaire ne prennent pas en considération les variations mêmes faibles des principaux paramètres du Soleil. L'héliosismologie a permis d'obtenir une meilleure connaissance de la structure interne du Soleil. Cependant, cette technique est imprécise pour les couches situées juste sous la surface solaire et aux pôles [Di Mauro, 2003]. Dès lors, l'étude de la forme du Soleil peut être proposée comme une méthode complémentaire à l'héliosismologie. Ainsi, la mesure précise de l'aplatissement solaire permet d'enrichir notre connaissance du Soleil. En mesurant le diamètre du Soleil dans toutes les directions, il devient alors possible de caractériser la forme du Soleil aux pôles, au niveau des couches proches de la surface et en surface. Malgré tout, la mesure précise de la forme du Soleil demeure complexe comme en témoigne la multitude de résultats obtenus depuis plus de 100 ans (Table 3.1).

A partir des mesures réalisées hors atmosphère grâce aux instruments spatiaux (MDI, RHESSI, HMI, SODISM), la valeur la plus réaliste de la différence entre le rayon équatorial ( $R_{eq}$ ) et le rayon polaire ( $R_{pol}$ ) du Soleil est proche de 8 mas (pour la photosphère). La valeur de cette caractéristique physique du Soleil a été confirmée par d'autres analyses utilisant d'autres techniques de mesures (héliosismologie, orbites planétaires, *etc.*).

## 3.2 Expression de l'aplatissement solaire

### Le potentiel gravitationnel et le potentiel centrifuge

L'étude des déformées solaires se base sur la théorie des Figures [Moritz, 1990; Lefebvre, 2003]. Pour un corps ayant une masse non ponctuelle, il est nécessaire de

définir son potentiel gravitationnel ( $\Phi_1(r, \theta)$ ) et son potentiel centrifuge ( $\Phi_2(r, \theta)$ ). Dans le cas d'un corps en rotation rigide, l'expression du potentiel centrifuge s'exprime simplement. Lorsque la rotation du corps n'est plus rigide, l'expression du potentiel centrifuge nécessite le recours à une loi de rotation. La détermination analytique du potentiel centrifuge est complexe de par la nature du corps à étudier (corps gazeux, rotation différentielle, *etc.*).  $\Phi_1(r, \theta)$  et  $\Phi_2(r, \theta)$  s'expriment de la manière suivante :

$$\Phi_1(r, \theta) = -\frac{GM_{\odot}}{r} \left[ 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{R_{eq}}{r} \right)^n J_n P_n(\cos(\theta)) \right] \quad (3.2)$$

$$\Phi_2(r, \theta) = \int_0^{r \sin(\theta)} \Omega^2 r \sin(\theta) d(r \sin(\theta))$$

où  $r$  représente le rayon du Soleil à une colatitude donnée,  $\theta$  correspond à la colatitude héliographique et  $R_{eq}$  correspond au rayon équatorial du Soleil.  $P_n$  correspond à un polynôme de Legendre de degré  $n$  dont les 6 premiers termes sont développés dans la Table 3.2.  $J_n$  correspond à un moment gravitationnel de degré  $n$ ; tout changement de la sphère parfaite est quantifié par les moments gravitationnels multipolaires. Ces grandeurs sont des caractéristiques de la distorsion de la forme du corps considéré. Enfin, la variable  $\Omega$  correspond à la vitesse de rotation angulaire du Soleil.

**TABLE 3.2** Développement des six premiers polynômes de Legendre. En 1785, les études d'Adrien-Marie Legendre (1752–1833) ont permis de montrer que l'équation d'un corps en équilibre hydrostatique se développe en terme d'une série de puissances (polynômes de Legendre).

$P_0(x) = 1$	$P_0(\cos(\theta)) = 1$
$P_1(x) = x$	$P_1(\cos(\theta)) = \cos(\theta)$
$P_2(x) = \frac{1}{2}(3x^2 - 1)$	$P_2(\cos(\theta)) = \frac{1}{4}(3 \cos(2\theta) + 1)$
$P_3(x) = \frac{1}{2}(5x^3 - 3x)$	$P_3(\cos(\theta)) = \frac{1}{8}(5 \cos(3\theta) + 3 \cos(\theta))$
$P_4(x) = \frac{1}{8}(35x^4 - 30x^2 + 3)$	$P_4(\cos(\theta)) = \frac{1}{64}(35 \cos(4\theta) + 20 \cos(2\theta) + 9)$
$P_5(x) = \frac{1}{8}(63x^5 - 70x^3 + 15x)$	$P_5(\cos(\theta)) = \frac{1}{128}(63 \cos(5\theta) + 35 \cos(3\theta) + 30 \cos(\theta))$

Les moments gravitationnels multipolaires ( $J_n$ ) nous renseignent sur la déviation de la forme réelle du Soleil par rapport à une distribution purement sphérique. En faisant l'hypothèse que le Soleil est un corps à symétrie équatoriale, il est possible de ne prendre en considération que les termes d'ordre pair au niveau de l'Equation 3.2 (potentiel

gravitationnel). Cette hypothèse introduit une non-considération de la dissymétrie Nord-Sud liée à tous les phénomènes en surface (taches solaires, *etc.*). Le rayon solaire étant lié au potentiel gravitationnel, il est alors possible de l'exprimer en fonction des polynômes de Legendre en utilisant uniquement des termes d'ordre pair (Equation 3.3).  $r(\theta)$  dépend aussi du rayon de la meilleure sphère de même volume que l'ellipsoïde ( $\langle r \rangle$ ).

$$r(\theta) = \langle r \rangle \left[ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} C_{2n} P_{2n}(\cos(\theta)) \right] = \langle r \rangle [1 + C_2 P_2(\cos(\theta)) + C_4 P_4(\cos(\theta)) + \dots] \quad (3.3)$$

### Expression du rayon en utilisant les polynômes de Legendre

L'Equation 3.4 permet d'exprimer le rayon solaire ( $r(\theta)$ ) en fonction de la colatitude héliographique, du rayon équatorial, du coefficient associé au moment quadrupolaire du Soleil ( $C_2$ ) et du coefficient associé au moment octopolaire du Soleil ( $C_4$ ). La différence entre le rayon équatorial et le rayon polaire est déterminée à partir de l'Equation 3.5.  $\Delta r_{\odot}$  dépend du rayon de la meilleure sphère de même volume que l'ellipsoïde ( $\langle r \rangle$  est très proche de  $R_{\odot}$ ) et des coefficients  $C_2$  et  $C_4$ .

$$r(\theta) = \langle r \rangle \times \left( 1 + C_2 \times \frac{1}{4} \times (3 \times \cos(2\theta) + 1) \right) + \langle r \rangle \times \left( C_4 \times \frac{1}{64} \times (35 \times \cos(4\theta) + 20 \times \cos(2\theta) + 9) \right) \quad (3.4)$$

$$\Delta r_{\odot} = r\left(\frac{\pi}{2}\right) - r(0) = \langle r \rangle \times \left( -\frac{3}{2}C_2 - \frac{5}{8}C_4 \right) \simeq R_{\odot} \times \left( -\frac{3}{2}C_2 - \frac{5}{8}C_4 \right) \quad (3.5)$$

L'aplatissement du Soleil peut être exprimé de différentes manières (Equations 3.6). Enfin, le moment quadrupolaire du Soleil ( $J_2$ ) peut être exprimé en fonction de l'aplatissement du Soleil, de la vitesse de rotation angulaire du Soleil ( $\Omega$ ), du rayon du Soleil, de la masse du Soleil, et de la constante de gravitation (Equation 3.7).

$$\Delta_{\odot} = -\frac{3}{2}C_2 - \frac{5}{8}C_4 \quad (3.6)$$

$$\Delta_{\odot} = \frac{R_{eq} - R_{pol}}{R_{eq}} = \frac{\Delta r_{\odot}}{R_{eq}}$$

$$J_2 = \frac{2}{3} \left( \Delta_{\odot} - \frac{1}{2} \frac{\Omega^2 R_{\odot}^3}{GM_{\odot}} \right) \quad (3.7)$$

La détermination de  $J_2$  est fondamentale. C'est un des paramètres utilisés au niveau des modèles de la structure interne du Soleil. Tout comme l'aplatissement solaire, il permet de tester la représentativité des modèles. Le moment quadrupolaire gravitationnel du Soleil a été déterminé à partir de l'héliosismologie (Pijpers (1998), *etc.*). A partir des mesures d'aplatissement solaire, on peut aussi déterminer cette valeur avec précision et vérifier son évolution au cours du temps.

### 3.3 Détermination absolue de l'aplatissement solaire

Un article a été publié [Meftah *et al.*, 2015b] dans une revue scientifique à comité de lecture (Solar Physics) afin de présenter les résultats obtenus au niveau de la détermination absolue de l'aplatissement solaire. Cet article, intitulé « *On the Determination and Constancy of the Solar Oblateness* », est présenté ci-après. Les images acquises par l'instrument SODISM de la mission spatiale PICARD ont été utilisées. Une nouvelle méthode de calcul a été développée afin d'obtenir de nouveaux résultats. A 782.2 nm (PICARD/SODISM), la différence entre le rayon équatorial et le rayon polaire est égal à  $7.90 \pm 0.30$  mas ( $5.7 \pm 0.2$  km à  $1 \sigma$ ). Entre 2010 et 2011, les variations de l'aplatissement solaire obtenues sont très faibles tout comme l'activité solaire. Il n'y a pas de lien direct entre les mesures réalisées et l'activité solaire.

### 3.4 Etude des variations de l'aplatissement solaire

Un article a été publié [Meftah *et al.*, 2016d] dans une revue scientifique à comité de lecture (Advances in Space Research) afin de présenter les résultats obtenus au niveau de la détermination absolue de l'aplatissement solaire et de ses variations au cours du cycle 24 (utilisation des images acquises par l'instrument HMI de la mission SDO). Cet article, intitulé « *On HMI solar oblateness during solar cycle 24 and impact of the space environment on results* », est proposé dans les pages qui suivent. Plusieurs méthodes de calcul ont été développées afin d'obtenir ces résultats. A 617.3 nm (SDO/HMI), la différence entre le rayon équatorial et le rayon polaire est égal à  $8.36 \pm 0.49$  mas ( $6.1 \pm 0.4$  km à  $1 \sigma$ ). Entre 2010 et 2015, les variations de l'aplatissement solaire sont très faibles. Cependant, il semblerait que l'aplatissement solaire diminue faiblement lorsque l'activité solaire augmente.

# On the Determination and Constancy of the Solar Oblateness

M. Meftah<sup>1</sup> · A. Irbah<sup>1</sup> · A. Hauchecorne<sup>1</sup> · T. Corbard<sup>2</sup> ·  
S. Turck-Chièze<sup>3</sup> · J.-F. Hochedez<sup>1,4</sup> · P. Boumier<sup>5</sup> ·  
A. Chevalier<sup>6</sup> · S. Dewitte<sup>6</sup> · S. Mekaoui<sup>6</sup> · D. Salabert<sup>3</sup>

Received: 19 November 2013 / Accepted: 21 January 2015

**Abstract** The equator-to-pole radius difference ( $\Delta r = R_{\text{eq}} - R_{\text{pol}}$ ) is a fundamental property of our star, and understanding it will enrich future solar and stellar dynamical models. The solar oblateness ( $\Delta_{\odot}$ ) corresponds to the excess ratio of the equatorial solar radius ( $R_{\text{eq}}$ ) to the polar radius ( $R_{\text{pol}}$ ), which is of great interest for those working in relativity and different areas of solar physics.  $\Delta r$  is known to be a rather small quantity, where a positive value of about 8 milli-arcseconds (mas) is suggested by previous measurements and predictions. The *Picard* space mission aimed to measure  $\Delta r$  with a precision better than 0.5 mas. The *Solar Diameter Imager and Surface Mapper* (SODISM) onboard *Picard* was a Ritchey–Chrétien telescope that took images of the Sun at several wavelengths. The SODISM measurements of the solar shape were obtained during special roll maneuvers of the spacecraft by 30° steps. They have produced precise determinations of the solar oblateness at 782.2 nm. After correcting measurements for optical distortion and for instrument temperature trend, we found a solar equator-to-pole radius difference at 782.2 nm of  $7.9 \pm 0.3$  mas ( $5.7 \pm 0.2$  km) at one  $\sigma$ . This measurement has been repeated several times during the first year of the space-borne observations, and we have not observed any correlation between oblateness and total solar irradiance variations.

**Keywords** Solar diameter · Solar oblateness · Solar irradiance · Active regions

---

M. Meftah  
[Mustapha.Meftah@latmos.ipsl.fr](mailto:Mustapha.Meftah@latmos.ipsl.fr)

- <sup>1</sup> Université Versailles St-Quentin, Sorbonne Universités, CNRS/INSU, LATMOS-IPSL, UPMC Université Paris 06, 11 Boulevard d’Alember, 78280 Guyancourt, France
- <sup>2</sup> OCA–Observatoire de la Côte d’Azur, Laboratoire Lagrange, CNRS, Université de Nice-Sophia Antipolis, Parc Valrose, 06108 Nice Cedex 2, France
- <sup>3</sup> SAp/IRFU/CEA, Centre de Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, France
- <sup>4</sup> ORB, 3 Avenue Circulaire, 1180 Uccle, Belgium
- <sup>5</sup> IAS–Institut d’Astrophysique Spatiale, CNRS, Université Paris XI, 91471 Orsay, France
- <sup>6</sup> IRMB, 3 Avenue Circulaire, 1180 Uccle, Belgium

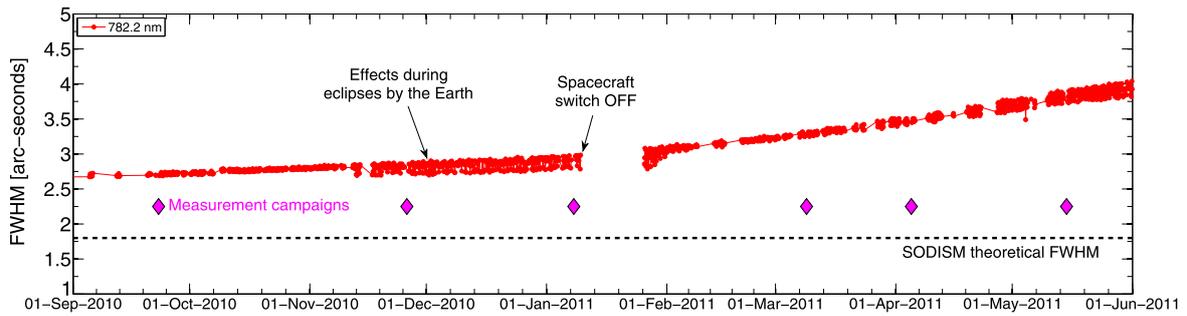
## 1. Introduction

The rotation of the Sun leads to a flattening of the polar regions. It is believed that the solar oblateness ( $\Delta_{\odot} = (R_{\text{eq}} - R_{\text{pol}})/R_{\text{pol}}$ ) results from the internal rotation of the Sun and from its mass distribution. The physical interest in the asphericity is described in *e.g.* Roxburgh (2001) or Fivian *et al.* (2008). If the solar surface deformation provides an indirect information on the inner rotation profile and on the distribution of matter, it could also provide information on the internal magnetic field (Duez, Mathis, and Turck-Chièze, 2010) or on the Earth–Sun relationship, which means that the magnitude of the solar oblateness remains an important observable for constraining models of the solar interior and predictions of its variability. It also places constraints on general relativity.

The interest in this knowledge began in the nineteenth century, when Urbain Le Verrier showed that there is a slow precession of Mercury’s orbit, *i.e.* its perihelion rotates around the Sun at about 574 arcseconds *per* century (Le Verrier, 1859). According to Newton’s theory, this value should be 531 arcseconds, *i.e.* there is a difference of 43 arcseconds between observation and theory. Mercury has a highly elliptical orbit. If the Sun and Mercury were the only objects in the Universe, Mercury’s perihelion would remain at the same place at each revolution, but because of the gravitational disturbance between the planets, this is not the case. At each revolution, Mercury’s orbit drifts by a few arcseconds. To explain the different results of the calculations of Newton’s theory and the observations made by Urbain Le Verrier, astronomers of that era even tried imagining the existence of a planet (Vulcan) between Mercury and the Sun. Finally, Albert Einstein calculated the correction that the general relativity (Einstein, 1916) brings to Newton’s theory and justified the 43 arcseconds difference. But the calculation did not take into account the shape of the Sun.

The main reasons are that the oblateness is difficult to measure because its value is very low and because it can be perturbed by the surface magnetic activity, *i.e.* by sunspots and faculae (Fivian *et al.*, 2008). Based on measurements collected from various instruments over the past 140 years (Rozelot and Damiani, 2011; Damiani *et al.*, 2011), the measured solar equator-to-pole radius difference ( $\Delta r = R_{\text{eq}} - R_{\text{pol}}$ ) has generally become smaller over time from 500 mas in 1870 (Poor, 1905) to 7.2 mas in 2012 (Kuhn *et al.*, 2012), mainly due to the instrument precision and data processing. Solar oblateness became of interest some decades ago when it was invoked to challenge the standard Einsteinian general relativity (Brans and Dicke, 1961; Dicke and Goldenberg, 1967). As of today, there are few measurements from space, which are very important, however, because they seem to achieve the required sensitivity in measuring the solar oblateness. Investigating solar oblateness issues (in value and trend) remains a worthwhile task (Rozelot and Fazel, 2013).

The *Picard* spacecraft was launched in June 2010 and was dedicated to studying the Sun. The *Solar Diameter Imager and Surface Mapper* (SODISM), a Ritchey–Chrétien telescope onboard *Picard* (Meftah *et al.*, 2014a), provided full-disk images of the Sun in five narrow-wavelength passbands (centered at 215.0, 393.37, 535.7, 607.1, and 782.2 nm). Measurement of the solar asphericity at several wavelengths was achievable with this instrument. However, its precise value required specific modes in the operations to reach an accuracy that allows us to check the different terms of the solar asphericity. The spacecraft maneuver was essential to determining the solar shape in order to remove the effect of instrument optical aberrations. During *Picard*’s measurement campaigns, the whole spacecraft revolved around the *Picard*–Sun axis. The first roll maneuver completed on September 2010 was made at 12 positions spaced at 30° roll steps, and we have taken 10 images *per* wavelength and *per* step. Such campaigns occurred several times, as shown in this article. Then the procedure was improved, and in May 2011, we achieved each roll step of *Picard* within an orbit



**Figure 1** Temporal evolution of the solar limb FWHM at 782.2 nm measured by SODISM (red circles) during the solar oblateness measurement campaigns. Measurement campaigns at 782.2 nm are indicated by pink diamonds.

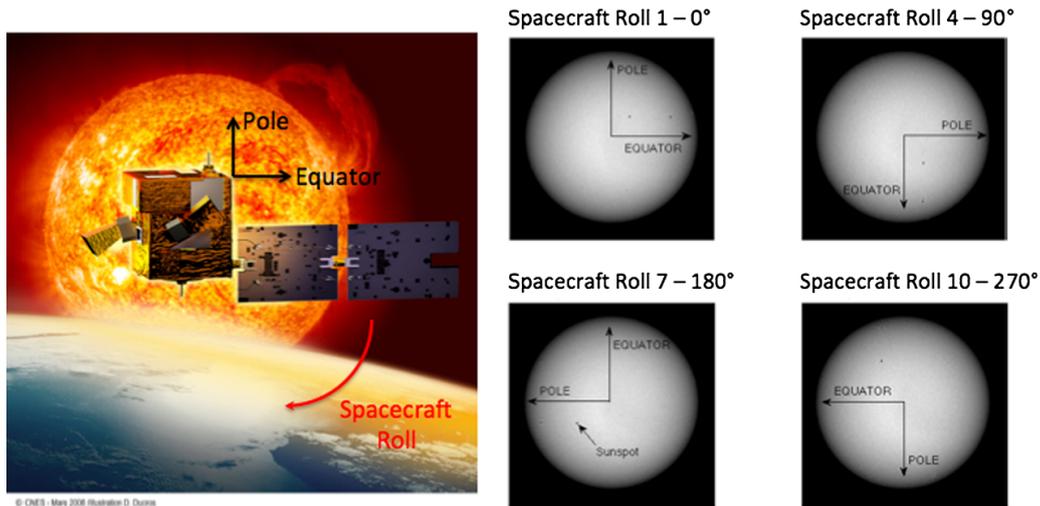
with  $\sim 58$  images at 782.2 nm for the same angular position of the spacecraft. Space is a harsh environment for optics, with many physical interactions leading to potentially severe degradation of the optical performance over time. The type of degradation that can affect SODISM is the degradation of image quality due to a combination of solar irradiation and instrumental contamination. The raw images have revealed some optical aberrations that blur the images (Meftah *et al.*, 2014a) increasingly with time (see Figure 1).

The SODISM point spread function (PSF) and its effects on the solar limb have been studied for different optical configurations, wherein the instrument is diffraction-limited. Thermal gradients in the front window result in a significant evolution of the full width at half maximum (FWHM) of the solar limb's first derivative. At 782.2 nm, the effect is weaker, therefore we focused on this wavelength. However, during each measurement campaign, the degradation of the instrument can be treated as constant. The spacecraft has to complete a roll within an orbit, so there was not enough time to take images at the other wavelengths. Indeed, an image is taken every two minutes to respect the telemetry budget. In addition, the solar radius measurement systematically varies in time and displays a modulation in phase with the orbit, which depends on the wavelength (see Figure 4). The solar radius measured by SODISM is correlated with the front window temperature. This led us to focus on a modification of the solar oblateness procedure (increase the number of measurements and using a single wavelength).

In this article, we report on the solar oblateness measurements of SODISM at 782.2 nm. These measurements were carried out between 2010 and 2011. One of the questions raised is how the solar oblateness changes with respect to the total solar irradiance.

## 2. Theoretical Solar Oblateness

The theoretical solar oblateness,  $\Delta_{\odot}$ , has been found to be between  $6.5 \times 10^{-6}$  and  $10.2 \times 10^{-6}$  (Rozelot, Godier, and Lefebvre, 2001). If only a rigid rotation in the radiative zone and the differential rotation in the convective zone (Mecheri *et al.*, 2004) are considered, the theoretical value of the solar oblateness is near  $9.1 \times 10^{-6}$ . In another study, this parameter was found to be between  $5.6 \times 10^{-6}$  and  $8.4 \times 10^{-6}$  (Fazel *et al.*, 2008). If the rotation of the core is also considered, the value exceeded  $8.4 \times 10^{-6}$  (Paterno, Sofia, and di Mauro, 1996). But some deformation coming from the internal magnetic field cannot be excluded, which, depending on its topology, can have a positive or negative supplementary term. Moreover, Gough's (2012) discussion of recent measurements shows that the Sun appears to be closer to spherical than current understanding predicts.



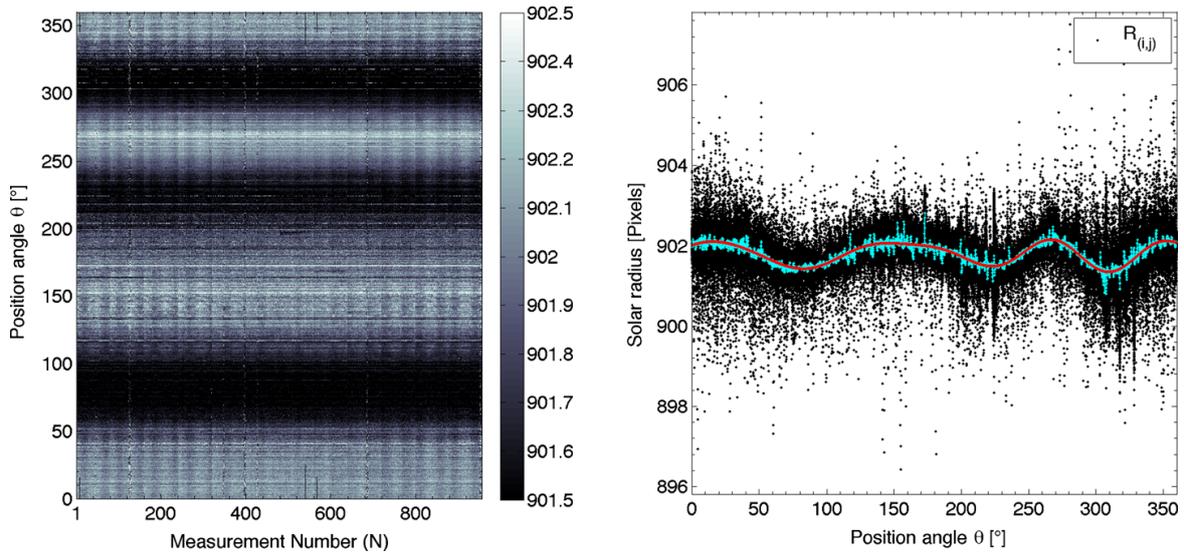
**Figure 2** During solar oblateness measurement campaigns, the *Picard* spacecraft revolves around the *Picard*–Sun axis by steps of  $30^\circ$  from north to west (clockwise). Solar images are taken for each roll step of the spacecraft.

It is clear that the solar oblateness is low, therefore it is difficult to measure precisely. An accurate measurement will bring new information on some processes that are difficult to obtain directly, such as the potential presence of magnetic field in the radiative zone, some effects on the orbital motions of the planets, or their influence on the solar shape. Moreover, the wavelength dependence of the solar oblateness is not yet obtained, only sparse information with totally different approaches can be found in the literature.

### 3. Method for Determining the Solar Oblateness

We describe in this section the method used to estimate the solar equator-to-pole radius difference in the solar continuum. After analyzing the data acquired by the telescope, we identified six sequences of images at  $782.2\text{ nm}$  taken during specific campaigns with a sufficient level of quality to determine the solar oblateness in value and trend. The optical distortion of SODISM solar images is a few orders of magnitude larger than what we would like to extract. Therefore the solar oblateness is extracted from different sequences of images taken at  $782.2\text{ nm}$  during specific campaigns, whose times are indicated in Figure 1. In addition, we have increased the number of images during the May 2011 campaign to improve the statistics of the measurement and to reduce the error bar.

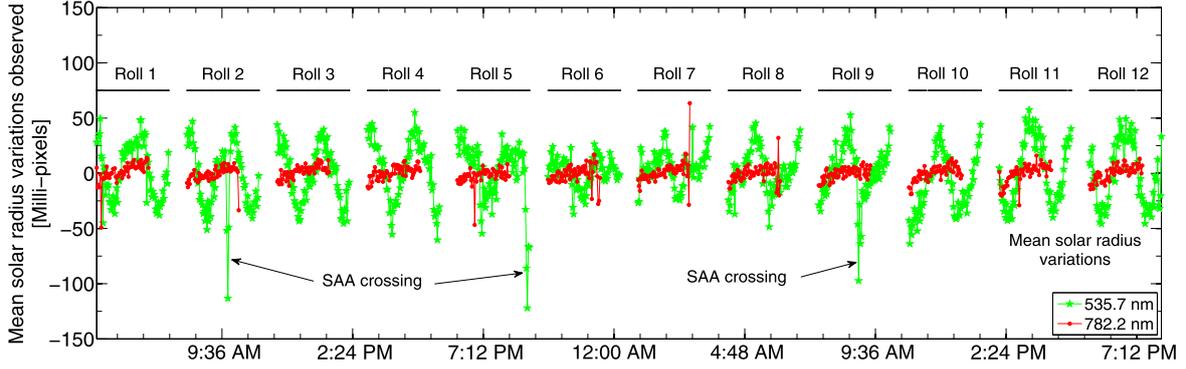
The solar oblateness measurement campaign allows determining and removing the effect of distortion in images and temperature effects of the instrument. In this mode, the spacecraft rotates around its axis directed at the Sun, taking 12 positions separated by  $30^\circ$  (Figure 2), thus the polar and equatorial diameters of the Sun successively take the 12 orientations on the charge-coupled device (CCD) image. The CCD detector array has  $2048 \times 2048$  pixels of  $13.5\text{ }\mu\text{m}$  pitch. A solar oblateness measurement campaign took less than two days, therefore the drift of the instrument parameters may be neglected. As shown in Figure 1, the evolution of the solar limb at FWHM is slow and persistent, which justifies our hypothesis. This section describes the method used to obtain the necessary parameters (solar radius, distortion, and temperature correction) to determine the solar equator-to-pole radius difference in seven steps.



**Figure 3** (Left) Measured solar radii  $R_{(i,j)}$  where the units of the color bar are in pixels. In this sample, the roughly 900 images are distributed over 12 sections containing the images for each orientation angle. (Right) Solar radii (black dots) vs. CCD angle in a polar coordinate system. Average limb position (cyan dots) vs. CCD angle plotted in pixel units. Distortion curve obtained by fitting a sum of sines (the correlation coefficient,  $R^2$ , is 0.975).

**Solar Radius Determination** We define the solar radius of each image by the inflection point position (IPP) of the solar-limb profiles taken at different angular positions of the image ( $N_\theta$ ). Solar limb profiles are obtained through creating a line associated with virtual pixels that is oriented in the desired angular position. Each virtual pixel of the line is located in an area of four physical pixels on the CCD. The intensity of the virtual pixel is calculated using a bilinear interpolation of the four pixels. Then, the resolution of the line associated with the virtual pixels is oversampled (using the Fourier transform). Thus, we obtain a solar limb profile observed by the SODISM instrument at a given angular position. From this solar limb profile, we can determine the best polynomial fit (of fifth order for this application) and obtain its point of inflection. After computing 4 000 IPP according to the different angular positions, we can obtain the best fit of the solar contour (ellipse) using the least-squares method. From this method, we obtain a result with a resolution of sub-pixel level. Thus, we can obtain the location of the center of the solar image. We repeat all the IPP calculation until the center of the solar image is found at a precision better than 0.05 pixel (criterion used in this analysis) after a few successive iterations. In summary, the IPP is obtained by the passage through zero of the solar limb second derivative. The contour of all the IPP is calculated independently for each of the  $N$  images. Then, we describe the series of solar radii measured ( $R_{(i,j)}$ ) by a  $N \times N_\theta$  matrix (see Figure 3, left panel), where all the radii are calculated in the  $N_\theta$  directions.

**Mean Solar Radius Evolution** A mean solar radius is obtained by averaging the calculated radii over all the azimuthal angles within one image. Thus, we can obtain the evolution of the mean measured solar radius over time (Figure 4). The bad radius measurements are due to solar images recorded when the spacecraft crosses the South Atlantic Anomaly (SAA). The SAA is the region where the Earth's inner Van Allen radiation belt makes its closest approach to the planet's surface. The result is that for a given altitude, the radiation intensity is higher over this region than elsewhere. The SODISM CCD camera is strongly affected by the particles when the spacecraft crosses the SAA. The bad images, acquired when the spacecraft crosses the SAA, are ignored.



**Figure 4** Evolution of the mean solar radius (green curve with stars for 535.7 nm and red curve with circles for 782.2 nm measurements) during a solar oblateness campaign and effect of the SAA on SODISM images. The images taken for each roll of the spacecraft are represented by the 12 black segments. These curves display a modulation in phase with the rotation during the roll, which depends on the wavelength. At 782.2 nm, the effect is weaker, which minimizes the correction associated to the factor  $k_{(j)}$  and focuses our interest on this wavelength.

**Image Distortion Definition** The inferred average solar radius as a function of offset angle with respect to the CCD indicates that the images of SODISM are significantly distorted (Figure 3, right panel). The residual pattern (after subtracting the largely dominant sphericity) reveals a triangular trefoil shape. The distortion curve is obtained from the mean calculated solar radius along the same angle. After completing this operation, we fit a sum of sines through the cloud of points. Finally, we verify the goodness of the fit ( $R^2$  correlation coefficient). Thereafter, we assume that the underlying solar profile is the same for all polar angles on the solar disk (in contrast to Kuhn *et al.* 1998). Indeed, we calculate semidiameters to better characterize the center of the solar image and to have more accurate results.

**Data Correction** After completing the first three steps, we correct our data using Equations (1) and (2) below optical distortion and thermal effects, which are reversible (*i.e.* cause no degradation of the telescope) over short periods.

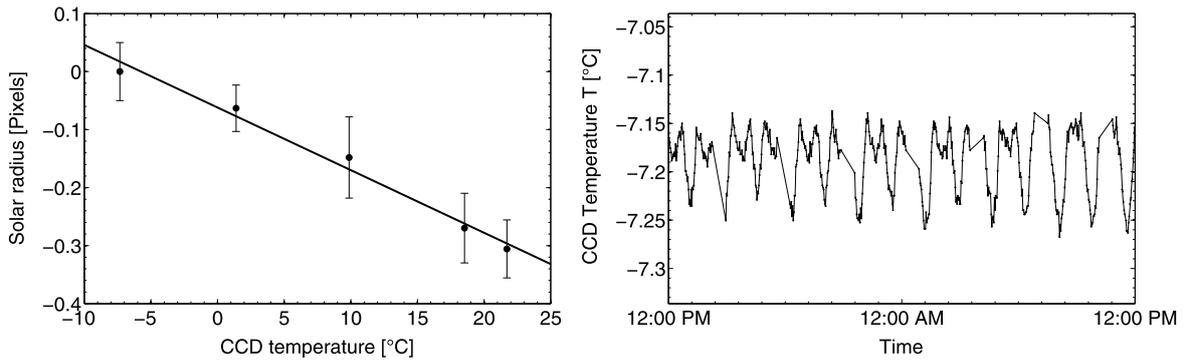
$$\langle R \rangle = \frac{1}{N \times N_\theta} \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^{N_\theta} R_{(m,n)} \quad (1)$$

and

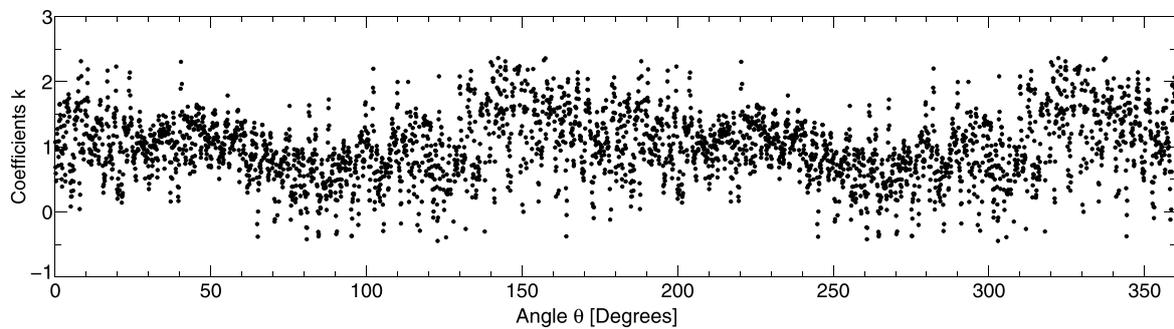
$$RC_{(i,j)} = R_{(i,j)} + \left( \langle R \rangle - \frac{1}{N_\theta} \sum_{n=1}^{N_\theta} R_{(i,n)} \right) + G \times \left( T_{(i)} - \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N T_{(m)} \right) + k_{(j)} \times \left( \langle R \rangle - \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N R_{(m,j)} \right), \quad (2)$$

where  $RC_{(i,j)}$  is the corrected solar radius at one astronomical unit (1 AU),  $R_{(i,j)}$  is the calculated solar radius corrected at 1 AU after IPP determination,  $N$  is the number of images, and  $N_\theta$  is the number of angles of the image.  $G$  is the temperature coefficient of the CCD, and  $T_{(i)}$  is the CCD temperature. The temperature of the front window ( $T_{f(i)}$ ) during the time where an image is obtained is linearly regressed to all the inferred radii in all directions with respect to the CCD orientation, and  $k_{(j)}$  is the slope of the linear regression.

The CCD temperature changes during the measurements. It is necessary to correct for this to take into account the evolution of the instrument plate scale (Meftah *et al.*, 2014c).



**Figure 5** (Left) Relation between the CCD temperature and the solar radius obtained during a specific calibration test. The temperature coefficient of the CCD ( $G$ ), determined from the slope, is equal to  $-0.01079$  pixel  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ . (Right) CCD temperature evolution during a set of measurements (nominal temperature regulation).



**Figure 6** Coefficients,  $k_{(j)}$ , of the linear regression as a function of the image angle.

We calibrated the instrument plate scale (through the correction parameter  $G$ , see Figure 5, left panel) as a function of the CCD temperature evolution (Figure 5, right panel). This correction allows taking into account the thermal expansion of the CCD pixel size. However, higher order terms can be neglected, such as cross terms depending on the factor  $G$  (the CCD temperature does not vary by much, as seen in the right panel of Figure 5).

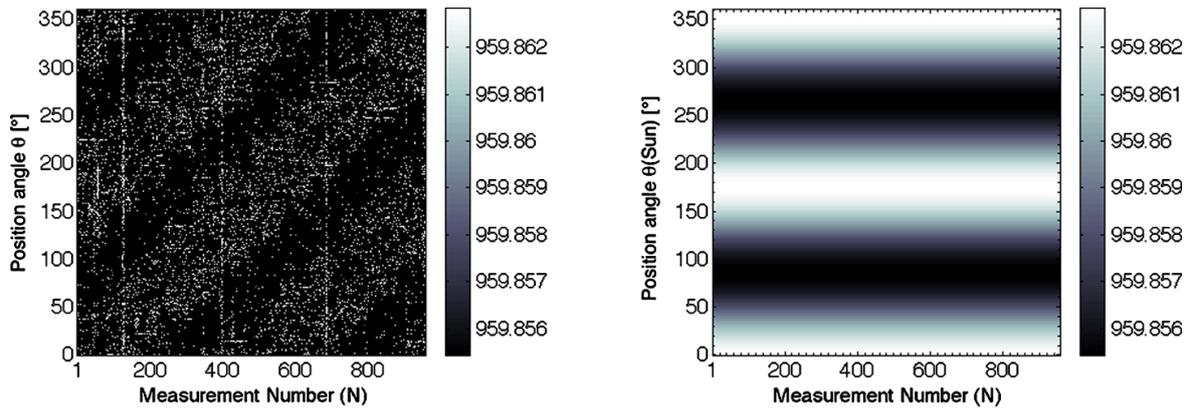
Another correction is associated with the relation between the SODISM front window temperature (or mean solar radius) and the solar radii associated with an image. Indeed, during the orbit, the SODISM mean solar radius measurement and the front window temperature show the same behavior (Meftah *et al.*, 2014a) as a result of the terrestrial atmospheric radiation, which affects the observations (Irbah *et al.*, 2012; Meftah *et al.*, 2013). For this reason, we determine the slope of the linear regression  $k_{(j)}$  between the front window temperature and the solar radii (Figure 6).

**Change of Reference from the CCD to the Solar Frame** The rotation of the spacecraft is from north to west (clockwise). Equation (3) below describes the transformation of the corrected solar radii from the CCD frame (Figure 7, left panel) to the solar fixed frame (right panel) during the 12 positions taken by the spacecraft (Equation (4))

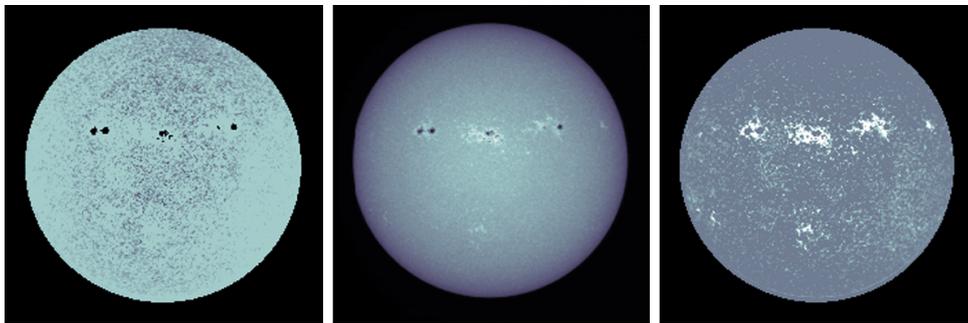
$$\theta(\text{Sun})_{(i,j)} = \theta_{(j)} + (\text{Roll}_{(i)} - 1) \times 30, \quad (3)$$

$$1 \leq \text{Roll}_{(i)} \leq 12. \quad (4)$$

**Apparent Solar Oblateness Determination** To determine the apparent solar oblateness, we fit the corrected solar radii (solar fixed frame) with a sum of sine and cosine functions



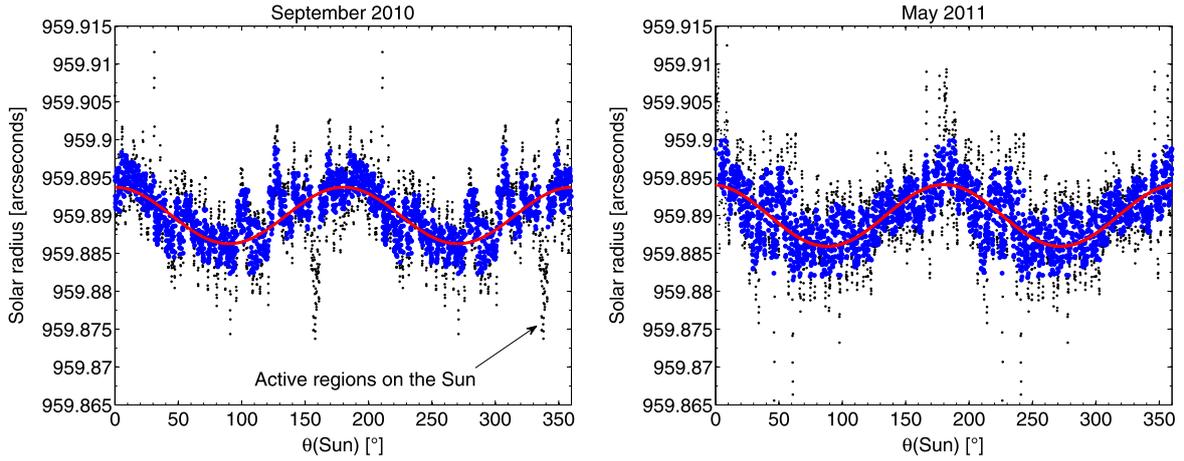
**Figure 7** (Left) Corrected solar radii  $R_{c(i,j)}$ . (Right) Apparent solar equator-to-pole radius difference ( $\Delta r_a$ ) obtained by fitting a sum of sine and cosine functions. The right panel highlights the change of reference from the CCD to the solar frame.



**Figure 8** (Central panel) SODISM images at 393.37 nm (Ca II K) showing the counteracting effects on solar irradiance of sunspots and pores and bright network and faculae. (Left panel) Result of applying the method for extracting sunspots and pores from SODISM images (black). (Right panel) Result of applying the method for extracting network and faculae (white).

(Figure 7, right panel). As a first step, we inspected images at 393.4 nm (Ca II K) provided by the *Precision Solar Photometric Telescope* (PSPT) ([http://lasp.colorado.edu/pspt\\_access/](http://lasp.colorado.edu/pspt_access/)), as SODISM images at 393.37 nm were analyzed before and after the solar oblateness measurement campaign (no SODISM Ca II K full-disk image was taken during the campaign). We have developed a method to isolate and extract all bright and dark active region features from each image, which provide positive and negative intensity contributions to the spectral solar irradiance, respectively. For every image, a model of the quiet Sun is built. A mean limb-darkening function of the Sun is computed using several cuts of the image. The quiet Sun is then built with this mean limb, and we subtract it from the original image. All positive and negative values correspond to the bright and dark features of active regions.

Figure 8 shows the result obtained when we apply our processing method to the recorded images. Thus, there is a method to deal with the cross-talk of intensity variations (*e.g.* active regions, faculae, *etc.*) with the inferred limb location (by masking the data using the Ca II K images). The final fit of the apparent solar oblateness does not take into account the affected solar limb portions. Then, we verify the goodness of fit ( $R^2$  correlation coefficient) and obtain the uncertainty of the measurements (95 % confidence bounds, or  $2\sigma$ ). The confidence bounds for fitted coefficients are given by  $C = b \pm t \times S^{0.5}$ , where  $b$  are the coefficients produced by the fit,  $t$  depends on the confidence level and is computed using the inverse of Student's  $t$  cumulative distribution function, and  $S$  is a vector formed with the diagonal elements from the estimated covariance matrix of the coefficient estimates. To



**Figure 9** At 782.2 nm, the mean solar radius at 1 AU is about 959.89 arcseconds ( $\langle r \rangle$ ). (Left) Active regions on the Sun are places where the solar magnetic field is especially strong. The IPP moves about 20 mas, which generates the smaller solar radius observed. The data obtained without correction are plotted with black dots. The filtered data are represented with blue circles. In September 2010, the shape of the Sun is given by the continuous red line (sinusoidal fit). (Right) Shape of the Sun in May 2011.  $0^\circ$  and  $180^\circ$  refer to the solar equatorial radius, whereas  $90^\circ$  and  $270^\circ$  refer to the solar polar radius.

complete this step, we calculate the root-mean-square-error (Rmse) of the solar oblateness fit (Equation (5)). The use of Rmse is an excellent general-purpose error metric for numerical predictions

$$\text{Rmse} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (Y_{data(k)} - Y_{fit(k)})^2}. \quad (5)$$

**Heliographic Latitude ( $B_0$ )** We correct for the tilt of the ecliptic with respect to the solar equatorial plane (Equation (6)). For an ellipsoid of revolution, the apparent oblateness will decrease when the line of sight is not perpendicular to the rotation axis. To first order, the apparent equator-to-pole radius difference ( $\Delta r_a$ ) seen from an heliographic latitude  $B_0$  is related to the true solar equator-to-pole radius difference ( $\Delta r$ ). During the year, the heliographic latitude of *Picard* stays within  $\pm 7.25^\circ$ , which leads to a maximum reduction for  $\Delta r_a$  of about 1.6 % around the two equinoxes. Thus, for a true  $\Delta r$  around 8 mas and  $B_0$  within  $\pm 7.25^\circ$ , this leads to a maximum reduction of about 0.13 mas for  $\Delta r_a$  around the two equinoxes

$$\Delta r = \frac{\Delta r_a}{\cos^2 B_0}. \quad (6)$$

## 4. Results and Discussion

After this processing (see Section 3), we determine the solar oblateness at 782.2 nm. After correcting the measurements for optical distortion and for instrument temperature trend, we find an apparent solar equator-to-pole radius difference ( $\Delta r_a$ ) of  $7.45 \pm 0.35$  mas ( $2\sigma$ ) for September 2010 (left panel in Figure 9), and of  $7.82 \pm 0.29$  mas ( $2\sigma$ ) for May 2011 (right panel in Figure 9) using a sinusoidal fit to the data. The apparent solar shape ( $r(\theta)$ ) can be also expressed using Legendre polynomials ( $P_l$ ), as shown in Equation (7) below. The

solar shape is often treated with this method. Thus, we can determine  $\Delta r_a$  from  $C_2$  and  $C_4$  coefficients (Equation (8)).

$$\begin{aligned} r(\theta) &= \langle r \rangle \times \left( 1 + \sum_{l=2,4} C_l \times \bar{P}_l(\cos(\Theta)) \right) \\ &= \langle r \rangle \times \left( 1 + C_2 \times \frac{1}{4} \times (3 \times \cos(2\Theta)) \right) \\ &\quad + \langle r \rangle \times \left( C_4 \times \frac{1}{64} \times (35 \times \cos(4\Theta) + 20 \times \cos(2\Theta)) \right) \end{aligned} \quad (7)$$

and

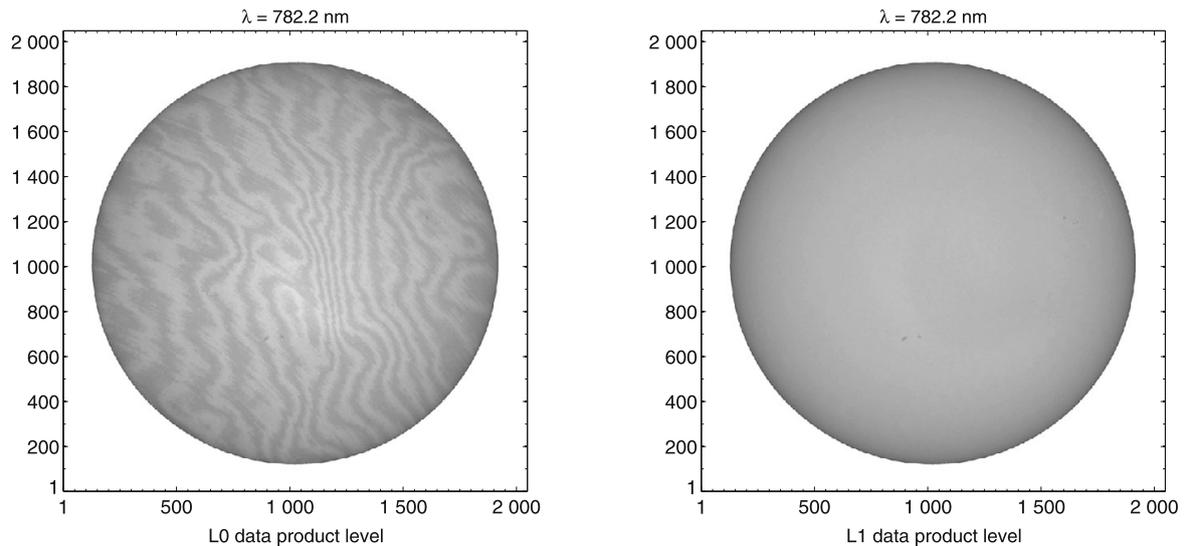
$$\Delta r_a = r\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right) - r(\varphi) = \langle r \rangle \times \left( -\frac{3}{2}C_2 - \frac{5}{8}C_4 \right), \quad (8)$$

where  $\Theta = \theta - \varphi$ ,  $\theta$  is the heliographic colatitude,  $\varphi$  is a phase allowing us to take into account a pointing uncertainty during the roll,  $\langle r \rangle$  is the mean solar radius at 1 AU,  $\bar{P}_l$  is the Legendre polynomial of degree  $l$  shifted to have zero mean ( $\bar{P}_l = P_l - \langle P_l \rangle$ ),  $C_2$  and  $C_4$  are the quadrupole and hexadecapole coefficients.

From this method associated with the polynomial expansion of the solar radius contour, we find from the sequence of measurements of September 2010 the quadrupole term as  $C_2 = (-5.24 \pm 0.23) \times 10^{-6}$  and the hexadecapole term as  $C_4 = (+0.26 \pm 0.25) \times 10^{-6}$  ( $2\sigma$ ), which yield  $\Delta r_a = 7.39$  mas. Similarly, we obtain  $C_2 = (-5.98 \pm 0.33) \times 10^{-6}$  and  $C_4 = (+1.38 \pm 0.40) \times 10^{-6}$  ( $2\sigma$ ) in May 2011, which yield  $\Delta r_a = 7.78$  mas. A more complete analysis in Legendre polynomials, with a better instrumental knowledge, is required to search for some manifestation of the internal magnetic field or the latitudinal rotation. We have preferred in this initial study to only concentrate on the solar equator-to-pole radius difference. We note that the results are not significantly affected by these different fits (sinusoidal or Legendre polynomial fits), as shown below.

To perform these analyses, we used Level 1 data products (corrected raw images for dark current and flatfield). Indeed, the image data of the telescope require corrections for their imperfections of instrumental origin (dark current, flatfield, *etc.*). The image data of SODISM require dark-signal correction and hot-pixel identification (Hochedez *et al.*, 2014). The images at 782.2 nm are also strongly dominated by an interference pattern in the surface layer of the CCD that disappears after flatfield correction (Figure 10). All raw images (Level 0 data products) have been corrected for dark current using the method proposed by Hochedez *et al.* (2014) and flatfield using the method proposed by Kuhn, Lin, and Lorz (1991). If we forego these corrections to our data (from Level 0 to Level 1), we introduce a systematic bias in our results ( $\sim -0.8$  mas). The uncertainty in the knowledge of the plate scale (Meftah *et al.*, 2014c) slightly affects our solar oblateness results (less than 0.01 mas). We also note that the precision of the telescope pointing is better than  $\pm 0.2$  arcsecond root-mean-square error during the whole solar oblateness measurement campaign. Thus, the effect on the solar oblateness measurement associated with the instrument pointing is negligible.

The two sets of measurements (September 2010 and May 2011) differ significantly in number of images ( $N$ ) and performance of the instrument for a given period (images are increasingly blurred, see Figure 1). Table 1 summarizes the main characteristics and results of these two sequences. The goodness of fit ( $R^2$  correlation coefficient) is better for the set of measurements made in May 2011, despite the degradation of the instrument (compensated for by the number of images taken). This is because the degradation does not affect the reproducibility. The May 2011 sequence takes better advantage of the latter.



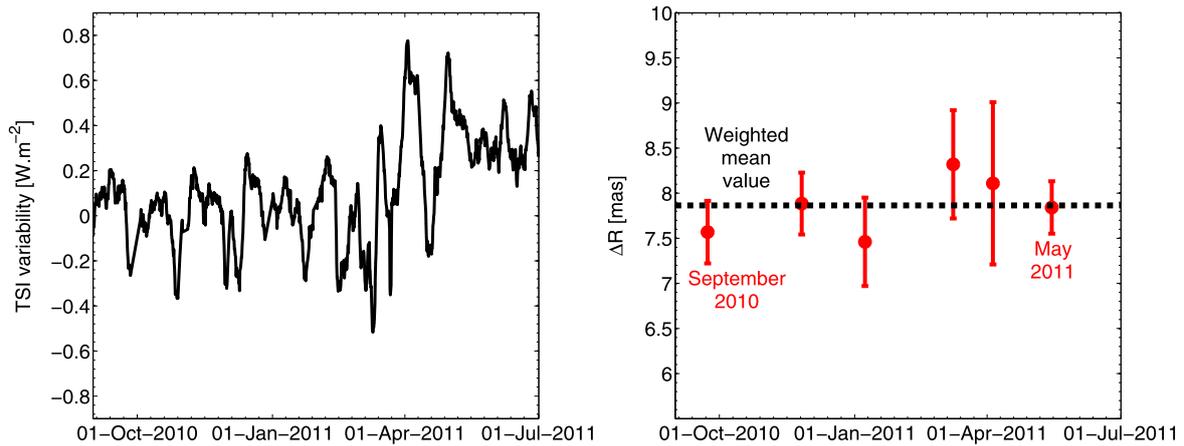
**Figure 10** (Left) Raw solar image at 782.2 nm (Level 0 data product). (Right) Corrected solar image at 782.2 nm (Level 1 data product).

**Table 1** Solar oblateness results ( $\Delta_{\odot}$ ) for two sets of measurements.  $N$  represents the number of images for a series.  $\Delta r_a$  represents the apparent equator-to-pole radius difference seen from an heliographic latitude  $B_0$ .  $\Delta r$  is the solar equator-to-pole radius difference.  $I$  represents the statistical/random uncertainty of the measurements with 95 % confidence bounds ( $2\sigma$ ).  $R^2$  represents the goodness of fit. Rmse is the root-mean-square error of the solar oblateness fit.

Date	$N$	$\Delta r_a$	$\Delta r$	$\Delta_{\odot}$	$I$	$R^2$	Rmse
Sept. 2010	120	7.45 mas	7.57 mas	$7.89 \times 10^{-6}$	$\pm 0.35$ mas	0.89	1.5 mas
May 2011	696	7.82 mas	7.84 mas	$8.17 \times 10^{-6}$	$\pm 0.29$ mas	0.92	1.4 mas

Until now, we have focused on two sets of measurements: the first obtained during the commissioning phase in September 2010, the last obtained after a modification in the solar oblateness procedure in May 2011, when we decided to concentrate on one wavelength and increased the number of images. Between these two dates, several other intermediate measurements were made, which consist of 120 images for each position of the spacecraft, similar to the series obtained in September 2010. The results of all the sequences are shown in Figure 11. They are consistent throughout, even though their error bars are slightly greater. A comparison between the total solar irradiance (TSI) variability obtained with *Picard* (Mef-tah *et al.*, 2014b) and the solar equator-to-pole radius difference (Figure 11) does not reveal any correlation, which is consistent with the results of Kuhn *et al.* (2012) and seems to respond to an issue raised in the past (Dicke, Kuhn, and Libbrecht, 1987), but when the total solar irradiance is very perturbed, the uncertainty of the measurement slightly increases. The measurement uncertainty of the solar equator-to-pole radius difference increases over time due to the aging of the instrument.

However, we consider that the best determinations of  $\Delta r$  are obtained at the beginning of the mission and in May 2011, mainly because of the increased number of images and because the instrument took images for any given spacecraft roll step within the same orbit. Moreover, the stability of the instrument is preserved because there is no mechanical change during the whole sequence. The reference value of  $\Delta r = 7.84 \pm 0.29$  mas of May 2011 (with  $2\sigma$  errors and after correcting the heliographic latitude  $B_0$ ) is compatible with the weighted mean value of the six analyzed sequences ( $\Delta r = 7.86 \pm 0.32$  mas at one  $\sigma$ ).



**Figure 11** (Left) Evolution of the TSI, with a significant change in March–April 2011. (Right)  $\Delta r$  time series at 782.2 nm ( $2\sigma$ ). The weighted mean value is represented by the dotted black line. The six results for solar equator-to-pole radius difference ( $\Delta r$ ) are represented by red circles.

**Table 2** Space-borne measurements of the solar equator-to-pole radius difference ( $\Delta r$ ) at one  $\sigma$ .

Instrument	Wavelength [nm]	Date	$\Delta r$ [mas]	Reference
SoHO/MDI	676.78	1997	$8.7 \pm 2.8$	Emilio <i>et al.</i> (2007)
RHESSI/SAS	670.0	2004	$8.01 \pm 0.14$	Fivian <i>et al.</i> (2008)
SDO/HMI	617.3	2011–2012	$7.2 \pm 0.49$	Kuhn <i>et al.</i> (2012)
Picard/SODISM	535.7	2011	$8.4 \pm 0.3$	Irbah <i>et al.</i> (2014)
Picard/SODISM	782.2	2010–2011	$7.86 \pm 0.32$	This study

The solar equator-to-pole radius difference we derive is too small to change the Mercury orbit outside the bounds of the general theory of relativity. Our results require a comparison with the solar equator-to-pole radius difference obtained by other space instruments. The first measurement of the solar oblateness was obtained in space with the *Michelson Doppler Imager* (MDI) onboard the *Solar and Heliospheric Observatory* (SoHO). For MDI, at a wavelength of 676.78 nm, the solar equator-to-pole radius difference (in 1997) was  $8.7 \pm 2.8$  mas (Emilio *et al.*, 2007). Kuhn *et al.* (1998) reported a lower value, but we prefer to stay with the result associated with the most recent reference for the same instrument measurement. Since then, other space instruments have made this measurement: the *Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager* (RHESSI) with its *Solar Aspect Sensor* (SAS), and the *Solar Dynamics Observatory – Helioseismic and Magnetic Imager* (SDO/HMI). As explained in the previous sections, the measurements of the solar oblateness are difficult to obtain and can reveal other phenomena, such as the additional impact of the magnetic field under the surface that affects the equatorial and polar diameters differently. Space-borne solar equator-to-pole radius difference measurements have different systematic uncertainties and have yielded different values (Table 2).

To compare the measurements, it is necessary to emphasize the wavelength of the instrument. There are probably other sources of uncertainty that are not taken into account in most of the analyses (knowledge of the systematic uncertainties, where flatfield is an example of a systematic bias). In fact, different articles obtain results that differ by more than the uncertainty error. Table 2 shows that the values obtained in space are becoming closer and are marginally consistent. The space-borne solar oblateness measurements ( $\Delta_{\odot}$ ) are consistent with the values proposed in theoretical models. The results obtained at 782.2 nm with

our measurements are close to those found by Fivian *et al.* (2008). At 782.2 nm, the more conservative  $\Delta r$  value is close to  $7.86 \pm 0.32$  mas at one  $\sigma$  (mean of the measurements obtained by the SODISM instrument from September 2010 to May 2011). Thus, the most realistic solar oblateness value is close to  $(8.19 \pm 0.33) \times 10^{-6}$ , for a given wavelength. The precise measurement of the solar oblateness is still a current issue and represents to this day a scientific and technological challenge!

## 5. Conclusions

SODISM measurements of the solar shape during special roll maneuvers of the spacecraft have produced a precise determination of the solar oblateness. The raw images have revealed some optical aberrations that blur the images increasingly with time (Figure 1). In addition, the SODISM solar radius measurement evolves with time and displays a modulation in phase with the orbit, which indicates that the variations are not stochastic. Consequently, the solar oblateness procedure has been improved during the mission to achieve each roll step of the spacecraft within an orbit ( $\sim 58$  images at 782.2 nm *per* step) and to take into account the thermal effects of the instrument. Thus, this procedure has allowed us to obtain good-quality data (number of images, image quality, stability, *etc.*).

At 782.2 nm, the solar radius at 1 AU is about 959.89 arcseconds (696 178 km), which is consistent with previous results (Meftah *et al.*, 2014c; Hauchecorne *et al.*, 2014). This value results from the plate scale obtained during the transit of Venus (Meftah *et al.*, 2014c). After correcting the measurements for optical distortion and for instrument temperature trend, we found a solar radius difference ( $\Delta r$ ) of  $7.84 \pm 0.29$  mas ( $2\sigma$ ). This is our reference value obtained in May 2011, with a sufficient number of images and taking orbital effects into account. Our result is close to 8 mas and agrees well with the measurements made by the RHESSI/SAS instrument. Thus, the solar oblateness value ( $\Delta_{\odot}$ ) is close to  $(8.19 \pm 0.33) \times 10^{-6}$ . At 782.2 nm, the SODISM  $\Delta r$  value is close to  $7.86 \pm 0.32$  mas ( $5.70 \pm 0.23$  km) at one  $\sigma$  (mean of the measurements obtained from September 2010 to May 2011) to take into account the systematic errors with confidence. Indeed, the remaining systematic errors are a challenge for this type of measurements. Moreover, there does not appear to be any correlation with the total solar irradiance variations, considering that the solar oblateness variation, if it exists, is included within the limits of the uncertainty. This remains consistent with the results obtained by the SDO/HMI instrument. Indeed, the analysis of the HMI data indicates that the solar oblateness has remained roughly constant.

We have focused only on the solar oblateness measurements obtained in space. But a solar oblateness of  $(8.63 \pm 0.88) \times 10^{-6}$ , obtained from a balloon flight (Sofia, Heaps, and Twigg, 1994), is relevant and consistent with the values we have found. The measured oblateness gives an estimate of the solar gravitational moment,  $J_2$ . This result is slightly lower than theoretical predictions, like the most recent space-borne results, so its accuracy is particularly interesting and challenging.

The *Picard* mission has reached the end of its lifetime. We hope that the SDO mission continues its measuring campaign to obtain the evolution of the solar oblateness during a full solar cycle.

**Acknowledgements** *Picard* is a mission supported by the French national center for scientific research (CNRS/INSU), by the French space agency (CNES), by the French Atomic Energy and Alternative Energies Commission (CEA), by the Belgian Space Policy (BELSPO), by the Swiss Space Office (SSO), and by the European Space Agency (ESA). The authors thank the referees for the improvements, remarks, and suggestions.

## References

- Brans, C., Dicke, R.H.: 1961, Mach's principle and a relativistic theory of gravitation. *Phys. Rev.* **124**, 925. DOI.
- Damiani, C., Rozelot, J.P., Lefebvre, S., Kilcik, A., Kosovichev, A.G.: 2011, A brief history of the solar oblateness. A review. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **73**, 241. DOI.
- Dicke, R.H., Goldenberg, H.M.: 1967, Solar oblateness and general relativity. *Phys. Rev. Lett.* **18**, 313. DOI.
- Dicke, R.H., Kuhn, J.R., Libbrecht, K.G.: 1987, Is the solar oblateness variable? Measurements of 1985. *Astrophys. J.* **318**, 451. DOI.
- Duez, V., Mathis, S., Turck-Chièze, S.: 2010, Effect of a fossil magnetic field on the structure of a young Sun. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **402**, 271. DOI.
- Einstein, A.: 1916, Die grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Ann. Phys.* **354**, 769. DOI.
- Emilio, M., Bush, R.I., Kuhn, J., Scherrer, P.: 2007, A changing solar shape. *Astrophys. J. Lett.* **660**, L161. DOI.
- Fazel, Z., Rozelot, J.P., Lefebvre, S., Ajabshirizadeh, A., Pireaux, S.: 2008, Solar gravitational energy and luminosity variations. *New Astron.* **13**, 65. DOI.
- Fivian, M.D., Hudson, H.S., Lin, R.P., Zahid, H.J.: 2008, A large excess in apparent solar oblateness due to surface magnetism. *Science* **322**, 560. DOI.
- Gough, D.: 2012, How oblate is the Sun? *Science* **337**, 1611. DOI.
- Hauchecorne, A., Meftah, M., Irbah, A., Couvidat, S., Bush, R., Hochedez, J.-F.: 2014, Solar radius determination from SODISM/Picard and HMI/SDO observations of the decrease of the spectral solar radiance during the 2012 June venus transit. *Astrophys. J.* **783**(2), 127. DOI.
- Hochedez, J.-F., Timmermans, C., Hauchecorne, A., Meftah, M.: 2014, Dark signal correction for a lukecold frame-transfer CCD. *Astron. Astrophys.* **561**, A17. DOI.
- Irbah, A., Meftah, M., Hauchecorne, A., Cisse, E.h.M., Lin, M., Rouzé, M.: 2012, How earth atmospheric radiations may affect astronomical observations from low-orbit satellites. *Proc. SPIE* **8442**, 84425A. DOI.
- Irbah, A., Meftah, M., Hauchecorne, A., Djafer, D., Corbard, T., Bocquier, M., Momar Cisse, E.: 2014, New space value of the solar oblateness obtained with Picard. *Astrophys. J.* **785**, 89. DOI.
- Kuhn, J.R., Lin, H., Loranz, D.: 1991, Gain calibrating nonuniform image-array data using only the image data. *Publ. Astron. Soc. Pac.* **103**, 1097. DOI.
- Kuhn, J.R., Bush, R.I., Scherrer, P., Scheick, X.: 1998, The sun's shape and brightness. *Nature* **392**, 155. DOI.
- Kuhn, J.R., Bush, R., Emilio, M., Scholl, I.F.: 2012, The precise solar shape and its variability. *Science* **337**, 1638. DOI.
- Le Verrier, U.J.: 1859, Theorie DU mouvement de Mercure. In: *Annales de l'Observatoire de Paris* **5**, 1.
- Mecheri, R., Abdelatif, T., Irbah, A., Provost, J., Berthomieu, G.: 2004, New values of gravitational moments  $J_2$  and  $J_4$  deduced from helioseismology. *Solar Phys.* **222**, 191. DOI.
- Meftah, M., Irbah, A., Hauchecorne, A., Hochedez, J.-F.: 2013, Picard payload thermal control system and general impact of the space environment on astronomical observations. *Proc. SPIE* **8739**, 87390B. DOI.
- Meftah, M., Hochedez, J.-F., Irbah, A., Hauchecorne, A., Boumier, P., Corbard, T., Turck-Chièze, S., Abbaki, S., Assus, P., Bertran, E., Bourget, P., Buisson, F., Chaigneau, M., Damé, L., Djafer, D., Dufour, C., Etcheto, P., Ferrero, P., Hersé, M., Marcovici, J.-P., Meissonnier, M., Morand, F., Poiet, G., Prado, J.-Y., Renaud, C., Rouanet, N., Rouzé, M., Salabert, D., Vieau, A.-J.: 2014a, Picard SODISM, a space telescope to study the Sun from the middle ultraviolet to the near infrared. *Solar Phys.* **289**, 1043. DOI.
- Meftah, M., Dewitte, S., Irbah, A., Chevalier, A., Conscience, C., Crommelynck, D., Janssen, E., Mekaoui, S.: 2014b, SOVAP/Picard, a spaceborne radiometer to measure the total solar irradiance. *Solar Phys.* **289**, 1885. DOI.
- Meftah, M., Hauchecorne, A., Crepel, M., Irbah, A., Corbard, T., Djafer, D., Hochedez, J.-F.: 2014c, The plate scale of the SODISM instrument and the determination of the solar radius at 607.1 nm. *Solar Phys.* **289**, 1. DOI.
- Paterno, L., Sofia, S., di Mauro, M.P.: 1996, The rotation of the Sun's core. *Astron. Astrophys.* **314**, 940.
- Poor, C.L.: 1905, The figure of the Sun. *Astrophys. J.* **22**, 103. DOI.
- Roxburgh, I.W.: 2001, Gravitational multipole moments of the Sun determined from helioseismic estimates of the internal structure and rotation. *Astron. Astrophys.* **377**, 688. DOI.
- Rozelot, J.-P., Damiani, C.: 2011, History of solar oblateness measurements and interpretation. *Eur. Phys. J. H* **36**, 407. DOI.
- Rozelot, J.P., Fazel, Z.: 2013, Revisiting the solar oblateness: is relevant astrophysics possible? *Solar Phys.* **287**, 161. DOI.
- Rozelot, J.P., Godier, S., Lefebvre, S.: 2001, On the theory of the oblateness of the Sun. *Solar Phys.* **198**, 223. DOI.
- Sofia, S., Heaps, W., Twigg, L.W.: 1994, The solar diameter and oblateness measured by the solar disk sextant on the 1992 September 30 balloon flight. *Astrophys. J.* **427**, 1048. DOI.

# On HMI solar oblateness during solar cycle 24 and impact of the space environment on results

M. Meftah<sup>a,\*</sup>, A. Hauchecorne<sup>a</sup>, R.I. Bush<sup>b</sup>, A. Irbah<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Université Paris Saclay, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales (LATMOS), 11 Boulevard d'Alembert, 78280 Guyancourt, France

<sup>b</sup> Stanford University, W.W. Hansen Experimental Physics Laboratory, Stanford, CA 94305-4085, USA

Received 29 January 2016; received in revised form 31 May 2016; accepted 2 June 2016

---

## Abstract

Solar oblateness is a fundamental parameter of the Sun, which provides indirect information on the inner rotation profile and on the distribution of matter. It also puts constraints on General Relativity. But this quantity is difficult to measure due to its very small value where the solar equator-to-pole radius difference is less than 10 milli-arcsecond (mas). Indeed, the measurements can be affected by magnetic activity and by instrumental effects linked to the space environment. The *Helioseismic and Magnetic Imager* (HMI) instrument onboard the *Solar Dynamics Observatory* (SDO) has produced accurate determinations of the solar oblateness from 2010 to 2015. The HMI measurements of the solar shape are obtained during special roll maneuvers of the spacecraft by 11.25 degrees steps around the spacecraft to the Sun line. HMI roll maneuver has been repeated ten times after the commissioning phase from October 2010 to July 2015. From HMI data, we observed a slight anti-correlation between solar oblateness and solar activity. From a new correction method, we found a mean solar equator-to-pole radius difference of  $8.36 \pm 0.49$  mas (*i.e.*  $6.06 \pm 0.35$  km at one  $\sigma$ ) at 617.3 nm during the period 2010–2015.

*Keywords:* Sun; Solar oblateness; Solar activity; Telescopes

---

## 1. Introduction

The rotation of the Sun introduces a flattening of the polar regions. The solar oblateness ( $\Delta_{\odot} = (R_{eq} - R_{pol})/R_{pol}$ ) results from the rotation of the whole solar interior and the distribution of its mass as a function of depth. Possible diagnostic of the internal rotation is provided by the solar oblateness that also places constraints on General Relativity. Indeed, the modern era of the solar oblateness measurements began in the 1960s with Dicke's measurements, which were useful in understanding the perihelion precession of Mercury's orbit (Dicke and Goldenberg,

1967). As a reminder, the perihelion precession of Mercury is one of the classical tests of General Relativity. For various reasons, it is necessary to determine the absolute value of the solar oblateness and to study its dependence with the solar activity. Based on measurements collected from various instruments over the past 140 years, we see that the measured solar equator-to-pole radius difference ( $\Delta R = R_{eq} - R_{pol}$ ) has become more precise. With the advent of the space age, it is possible to obtain very accurate measurements of the solar equator-to-pole radius difference and its evolution over time.

In this article, we present current results of the solar equator-to-pole radius difference variations that are obtained with the *Helioseismic and Magnetic Imager* (HMI) onboard the *Solar Dynamics Observatory* (SDO)

---

\* Corresponding author.

E-mail address: [Mustapha.Meftah@lamos.ipsl.fr](mailto:Mustapha.Meftah@lamos.ipsl.fr) (M. Meftah).

spacecraft from 2010 to 2015. With previous methods to determine the solar equator-to-pole radius difference, we show that the space environment has an impact on HMI results. Thus, a new method was developed to estimate the solar equator-to-pole radius difference from HMI images. When analyzing solar radius versus angle data, we observed an anti-correlation between solar limb brightness and solar radius that is obtained from the inflection point position. The apparent solar radius was smaller if an active region was near the solar limb. The bright active regions are confined at low latitudes and never occur at the poles. The anti-correlation may cause an artifact in the determination of the solar oblateness leading to a negative bias, even if the most active regions were removed from the analysis. Thus, from this method, we provide our best estimate of the absolute value of the solar equator-to-pole radius difference as seen by HMI.

## 2. A brief history of solar oblateness measurements

Since the nineteenth century, the scientific community has contributed to the discussion of the solar shape (Von Lindenau (1809), Bianchi, 1831, Secchi (1871), Auwers, 1873, Harzer, 1891, Newcomb, 1895, Poor, 1905, Ambronn and Schur, 1905, etc.). From Auwers (1891) to Meyermann (1950), astronomers found negative values of the solar equator-to-pole radius difference, despite the demonstration by theorists that the solar equator-to-pole radius difference should be positive (Tisserand, 1891; Moulton, 1909). Since the 1960s, measurements resulted in positive values of the solar equator-to-pole radius difference in line with the theory. Since that time, several measurements were carried out. Here we briefly describe solar oblateness measurements over the last two decades (see Fig. 1), because there were important disparities in the data prior to that period.

Solar oblateness measurements have been made with ground-based instruments such as Pic du Midi heliometer (Damiani et al., 2011). The ground-based observations

show a  $\Delta R$  equal to  $8.2 \pm 1.0$  milli-arcsecond (mas) at zero sunspot activity (see Fig. 5 in Damiani et al. (2011)).

Similarly, solar oblateness measurements have been made with instruments on board balloon such as *Solar Disk Sextant* (SDS) (Egidi et al., 2006). SDS solar diameter measurements have been reanalyzed by Sofia et al. in 2013. So, it is unclear if the previous  $\Delta R$  observations ( $4.13 \pm 1.92$  mas in 1992,  $8.16 \pm 2.02$  mas in 1994,  $8.25 \pm 1.34$  mas in 1995, and  $9.88 \pm 1.82$  mas in 1996) are valid or not. Moreover, the SDS-1992 estimate is not in agreement with the rotation at the solar surface, and far below. If we note that the differential rotation at the surface increases the oblateness (Tassoul, 2000), we may have some doubts on the SDS-1992 value (due to a remaining instrumental effect). Thus, we consider a mean value of  $8.76 \pm 0.97$  mas excluding the 1992-measurement.

Finally, solar oblateness measurements have been made with space-based instruments. Based on measurements collected from various instruments (Rozelot and Damiani, 2011), the real value of the solar equator-to-pole radius difference ( $\Delta R$ ) has converged to approximately 8 mas (see Table 1). The refinement of the real value is mainly due to the improved instrument precision linked with recent advances in space-based observations and to new methods of data processing to take into account the space environment. Indeed, the observations made outside the atmosphere are, in principle, more favorable. The first measurement of the solar oblateness obtained in space (1997) was conducted with the *Michelson Doppler Imager* (MDI) onboard the *Solar and Heliospheric Observatory* (SoHO), where the solar equator-to-pole radius difference was equal to  $8.7 \pm 2.8$  mas (Emilio et al., 2007).

Since then, other space-based instruments have made this measurement. The *Solar Aspect Sensor* on the *Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager* (RHESSI) spacecraft has measured a solar equator-to-pole radius difference of  $8.01 \pm 0.14$  mas (Fivian et al., 2008). Fivian et al. (2008) did not measure directly 8.01 mas. The RHESSI observations are differential

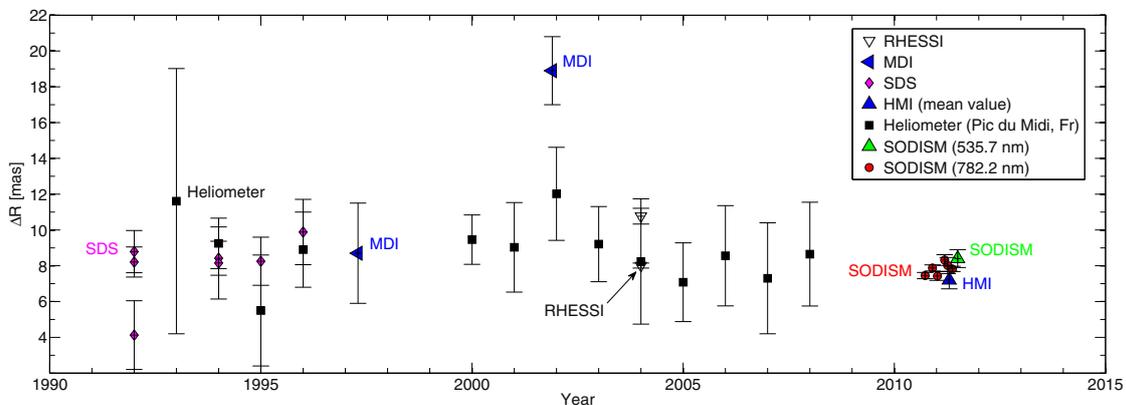


Fig. 1. Solar equator-to-pole radius difference ( $\Delta R$ ) measured since 1992 from ground-based instruments (Pic du Midi heliometer), instruments on board balloon (SDS), and space-based instruments (RHESSI, MDI, HMI, and SODISM).

Table 1  
Solar equator-to-pole radius difference ( $\Delta R$ ) published since 2003.

Date	Authors	$\Delta R$ [mas]	Instrument (remark)
1961–2003	Pitjeva (2005)	$8.05 \pm 0.04$	Radar observations
1992–1996	Egidi et al. (2006)	$8.76 \pm 0.97$	SDS (mean value)
1993–2008	Damiani et al. (2011)	$8.8 \pm 1.7$	Pic du Midi heliometer
1997–2001	Emilio et al. (2007)	$13.8 \pm 7.2$	SoHO/MDI (mean value)
1998–2000	Reis Neto et al. (2003)	$13 \pm 4$	Rio de Janeiro solar astrolabe
2002–2008	Fivian et al. (2008)	$8.01 \pm 0.14$	RHESSI/SAS
2010–2011	Meftah et al. (2015)	$7.9 \pm 0.3$	PICARD/SODISM ( $\lambda = 782.2$ nm)
2010–2012	Kuhn et al. (2012)	$7.2 \pm 0.49$	SDO/HMI
2011	Irbah et al. (2014)	$8.4 \pm 0.3$	PICARD/SODISM ( $\lambda = 535.7$ nm)

measurements of the solar radius based on a simple fixed-brightness threshold. Fivian et al. (2008) said that this necessarily results in crosstalk between limb position and brightness. As a comment, the  $\Delta r$  determination with M2 method used in this paper (see Section 4.2) puts in evidence the necessity to do a correction based on the brightness of the solar limb. Recent accurate observations of the solar shape with HMI observations provided a  $\Delta R$  of  $7.2 \pm 0.49$  mas (Kuhn et al., 2012). Similarly, *Solar Diameter Imager and Surface Mapper* (SODISM) onboard PICARD has produced a precise determination of the solar oblateness at different wavelengths that represents the first attempt in space. Indeed, PICARD-SODISM measurements of the solar shape during special roll maneuvers of the spacecraft by  $30^\circ$  steps within a full orbit have produced a precise determination of the solar oblateness. At 782.2 nm, the PICARD-SODISM  $\Delta r$  value is equal to  $7.9 \pm 0.3$  mas at one  $\sigma$  (mean of the measurements obtained from September 2010 to May 2011). Moreover, there does not appear to be any significant correlation with the solar activity, considering that the solar oblateness variation, if it exists, is included in the margins of uncertainty (Meftah et al., 2015). Another important measurement was made by the SODISM instrument in July 2011. At 535.7 nm, the PICARD-SODISM apparent equator-to-pole radius difference ( $\Delta r_a$ ) value is equal to  $8.4 \pm 0.3$  mas at one  $\sigma$  (Irbah et al., 2014). PICARD  $\Delta r$  results were obtained with a telescope that has suffered of the space environment effects. Indeed, the raw images have revealed some optical aberrations that blur the images in an evolving way (Meftah et al., 2014).

We see that all observations made outside the atmosphere range from 7 to 9 mas, except one measurement obtained with the MDI instrument in 2001 ( $18.9 \pm 1.9$  mas). Corrections have been made by Emilio et al. (2007) to take into account MDI temperature changes, focus changes, tilt, distortions, and other effects (Kuhn et al., 2004) leading to a corrected mean solar radius. One can reasonably think that corrections have been made for the results shown in Emilio et al. (2007) paper. Indeed, MDI  $\Delta r$  is analyzed along the solar cycle, in 1997 and in 2001. The mean MDI  $\Delta r$  is  $13.8 \pm 7.2$  mas. We again emphasize that MDI measurements were obtained from defocused data and where the

instrument has suffered from blurring caused by instrumental distortion. The study and analysis of the degradation of space-based instruments dedicated to solar metrology are crucial parts to achieve the scientific goals of all such instruments. Indication of instrument point spread function (psf) changes over time are very important (irreversible case). Furthermore, psf short-term changes with small variations during an orbit may alter the solar oblateness determination (reversible case). In fact, during a solar oblateness campaign, it is assumed that the instrument remains stable and the Sun does not vary during the measurement period. Otherwise, there may be a bias or a systematic effect with regard to the solar oblateness determination, which may lead to a greater or smaller value. Despite many studies, we are still unaware of a more accurate observed solar shape, which indeed reflects what is going on inside the star. One of the main reason is the difficulty in obtaining a clean solar limb profile, free of contamination from sunspots and faculae. Moreover, we wonder about the potential variation of the solar oblateness during a solar cycle.

### 3. Theoretical approach

One of the first attempts to calculate oblateness of stars was made by Chandrasekhar (1933) who computed stars oblateness under the assumption of a non-differential rotation and a power density law with the radius of the star. Sweet and Roy (1953) also discussed the structure of rotating stars. As shown by Dicke (1970), the solar oblateness is linked to the gravitational quadrupole moment ( $J_2$ ) and the angular rotation velocity of the Sun ( $\Omega$ ) as shown in Eq. 1, which represents an ill-posed problem (Hansen, 1992).

$$\Delta_{\odot} = \varepsilon_q + \varepsilon_s \simeq \frac{3}{2} J_2 + \frac{1}{2} \frac{\Omega^2 R_{\odot}^3}{GM_{\odot}}, \quad (1)$$

where  $\varepsilon_q$  is a measure of the distortion of the gravitational potential produced by internal rotation, and  $\varepsilon_s$  is linked to the oblateness produced by the surface rotation. Using the Carrington's rotation period, this leads to  $\Omega = 2.87 \times 10^{-6}$  rad s $^{-1}$ .  $R_{\odot}$  represents the solar radius at one astronomical unit, which is equal to  $696,156 \pm 145$  km (Meftah et al., 2014; Hauchecorne et al., 2014).  $G$  is the gravitational constant

( $6.67384 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ ) and  $M_\odot$  is the mass of the Sun ( $1.98855 \times 10^{30} \text{ kg}$ ). With these assumptions, the contribution of the solar surface rotation ( $\varepsilon_s$ ) to the oblateness is close to  $1.05 \times 10^{-5}$ , which leads to a surface solar equator-to-pole radius difference close to 7.3 km ( $\sim 10 \text{ mas}$ ). However, the Sun does not rotate in a uniform manner. Using the solar differential rotation law developed by Dicke (1970) and Rozelot and Damiani, 2011 have developed a simple model to estimate  $\varepsilon_s$  as:

$$\varepsilon_s \simeq \frac{1}{2} \frac{\Omega_s^2 R_\odot^3}{GM_\odot}, \quad (2)$$

and

$$\Omega_s = 2.68 \times 10^{-3} \left( \frac{GM_\odot}{R_\odot^3} \right)^{0.5} + 1.94 \times 10^{-3} \left( \frac{GM_\odot}{R_\odot^3} \right)^{0.5} \times \sin(\Theta), \quad (3)$$

where  $\Omega_s$  is the solar surface rotation and  $\Theta$  is the solar heliographic colatitude. Thus,  $\varepsilon_s$  is close to  $8.1 \times 10^{-6}$ , which gives a surface solar equator-to-pole radius difference close to  $\sim 7.8 \text{ mas}$ . With another differential rotation profile developed by Wöhl et al. (2010), we find results in the same range ( $\varepsilon_s$  is close to  $8.5 \times 10^{-6}$ ). As reported by Maeder (1999), the oblateness of a differentially rotating star is larger than that of a uniformly rotating star. Consequently,  $\varepsilon_s$  seems to be greater than  $8.1 \times 10^{-6}$ . Moreover,  $\varepsilon_q$  that is linked with  $J_2$  is also providing a contribution to the solar oblateness. A review of  $J_2$  values have been made in Rozelot et al. (2009). Estimates of the gravitational quadrupole moment  $J_2$  were found by Pijpers (1998) and Antia et al., 2008. Indeed, helioseismic data from the Global Oscillation Network Group (GONG) and the MDI instrument have been used to infer the rotation rate in the solar interior. Pijpers (1998) and Antia et al. (2008)  $J_2$  determinations (respectively  $2.18 \times 10^{-7}$  and  $2.22 \times 10^{-7}$ ) are consistent with that of Paterno et al. (1996) such as Armstrong and Kuhn (1999) and Roxburgh (2001). Thus,  $\varepsilon_q$  is close to  $3.3 \times 10^{-7}$ . Under this scenario, it is difficult to think that the solar equator-to-pole radius difference is less than 8 mas, without contradicting the helioseismic models.

#### 4. Methods to determine the solar oblateness

The HMI instrument onboard SDO acquired measurements of the solar shape during the Solar Cycle 24. HMI started the science phase in May 1, 2010 after a two month on-orbit commissioning phase, where two sequences (April 9 and 16, 2010) to measure the shape of the Sun led to improvements in the observing scheme (from 16 uniformly spaced roll positions to 32, type and number of images, etc.). Every 6 months (typically in April and October), SDO is rolled in order to calibrate all instruments of the space-based mission. Since 2010, these measurements are performed during a calibration maneuver where the SDO spacecraft is rotated 360 degrees in 32 steps around the spacecraft to Sun line. The SDO roll maneuver is essential to determine the solar shape in order to remove the distortion of the telescope. HMI is designed to give an overall cadence of 45 sec for the Doppler, the intensity, and the component of the field projected on the line-of-sight (Schou et al., 2012). The HMI observation sequence takes continuum tuned and line core images with one camera in two circular (sequence filtergrams 10008, and 10009) and four linear polarizations (sequence filtergrams 10004, 10005, 10006, and 10007) for the solar shape determination. The second camera takes a sequence of circularly polarized filtergrams at six wavelengths positions across the nominal 617.3 nm spectral Fe I line. Within the scope of our analyses, we use the Level-1.0 HMI data that are images converted from on-board form to regular array formats with bad pixels removed and gains calibrated (*i.e.* flat-field). We chose to analyze the results during the routine operations phase. Table 2 summarizes the general characteristics of the 10 sequences that have been analyzed (roll maneuver ranging from 1 to 10) in order to determine  $\Delta R$  from October 2010 to July 2015.

##### 4.1. Method 1: Correction method based on instrument distortion

We describe in this section the method used to estimate the solar equator-to-pole radius difference in the solar con-

Table 2

Roll maneuvers of the spacecraft.  $\Omega_{SDO}$  provides the direction of the spacecraft rotation ( $\odot$  and  $\ominus$ ) during the roll.  $N_i$  is the number of images taken during a roll for a sequence filtergram ( $S_f = 10,005$ ).  $\Phi_S$  represents the mean solar flux during the roll.  $B_0$  is the heliographic latitude of the central point of the solar disk.

Roll	Start time (UTC)	End time (UTC)	$\Omega_{SDO}$	$N_i$	$\Phi_S [W m^{-2}]$	$B_0 [^\circ]$
1	2010/10/12 17:57	2010/10/13 00:46	$\odot$	343	1368.17	6.05
2	2011/04/06 05:46	2011/04/06 12:35	$\ominus$	340	1359.79	-6.25
3	2011/10/12 17:52	2011/10/13 00:41	$\odot$	340	1368.10	6.07
4	2012/04/04 05:43	2012/04/04 12:31	$\ominus$	332	1360.85	-6.32
5	2012/10/03 18:22	2012/10/04 01:11	$\odot$	334	1361.63	6.57
6	2013/04/03 05:37	2013/04/03 12:24	$\ominus$	341	1361.67	-6.40
7	2013/10/02 17:52	2013/10/03 00:41	$\odot$	342	1360.53	6.64
8	2014/04/09 05:12	2014/04/09 12:00	$\ominus$	333	1357.34	-6.03
9	2014/10/08 17:52	2014/10/09 00:41	$\odot$	338	1365.12	6.31
10	2015/07/22 16:22	2015/07/22 23:11	$\ominus$	332	1319.99	5.00

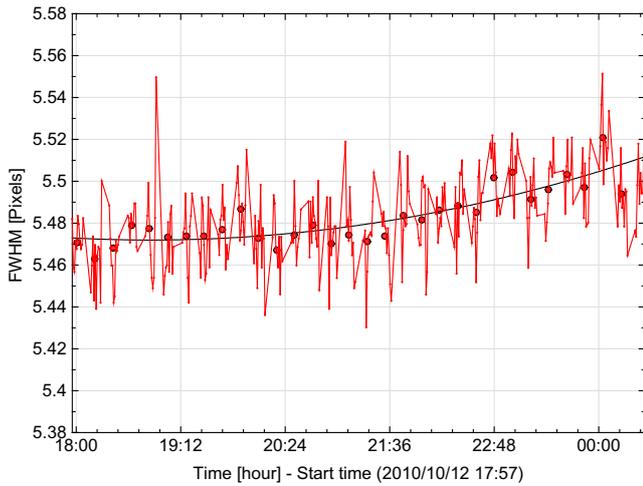


Fig. 2. Time evolution of the solar limb's first derivative FWHM measured by HMI during the solar oblateness roll maneuver 1 of the spacecraft. Each point determination is the average of all solar limb at different angular positions. This highlights that the instrument changes during a roll maneuver.

tinuum. The solar oblateness measurement campaign allows determining and removing the effect of the image distortion from the HMI images. In this mode, the spacecraft rotates around its axis directed to the Sun taking 32 positions separated by  $11.25^\circ$ . The polar and equatorial axis of the Sun take alternatively the 32 possible orientations on the charge-coupled device (CCD) image. The CCD detector array has  $4096 \times 4096$  pixels with a pixel pitch of  $12 \mu\text{m}$ . On the resulting images, the plate scale is about  $0.504$  arcsec per pixel. A solar oblateness measurement campaign is made in less than seven hours ( $\sim 10$  min without acquisition followed by  $\sim 7.5$  min of observing time for each position during the roll). As a first step, the drift of the instrument parameters may be neglected. An indicator of HMI stability is obtained through the evolution of the full width at half maximum (FWHM) of the solar limb's first derivative as shown in Fig. 2 (first roll analyzed in October 2010).

The method used to tackle this problem makes the basic assumption that the HMI instrument is stable over the duration of the roll maneuver. This assumption, however, may not be completely valid as indicated by the weak variation of the solar limb's first derivative FWHM as seen on Fig. 2. Thus, this section describes the method used to obtain the necessary parameters (solar radius and optical distortion) to determine the solar equator-to-pole radius difference where seven steps are required.

#### 4.1.1. Solar radius determination

We developed two methods to determine the solar radius (M1.1 and M1.2 methods). The first method (M1.1) defines the solar radius by the inflection point position (IPP) of the solar-limb profiles taken at different angular positions of the image ( $N_\theta$ ). From this solar limb profile, we can determine the best 5th-order polynomial

fit and obtain its point of inflection. The best fit of the solar contour is determined using the least squares method on approximately 4000 IPP computed as a function of angular position along the solar limb. The contour of all the IPP is calculated for each of the  $N$  images independently. Then, we describe the series of solar radii measured ( $R_{(i,j)}$ ) by a  $N \times N_\theta$  matrix, where all the radii are calculated in the  $N_\theta$  directions. Regarding the second method (M1.2), a solar radius is computed for an angular sector (1728 angular sectors are used). In each angular sector, a center-to-limb flux curve is computed by averaging the flux curve along four radii. The first derivative of the flux curve is fitted by a 7th-order polynomial to determine the inflection point of the flux curve, which corresponds to the maximum of its first derivative. The fit is applied to the portion of the first derivative curve where its value is larger than 60% of its maximum value. From the different solar radii obtained for each angular sector, the solar contour is then obtained. The following steps are valid for both methods.

#### 4.1.2. Mean solar radius evolution

A mean solar radius is obtained by averaging the calculated radii overall the azimuthal angles within one image. Thus, we can obtain the evolution of the mean solar radius over time.

#### 4.1.3. Image distortion definition

The inferred average solar radius as function of offset angle with respect to the CCD indicates that the HMI images have a slight distortion as seen in Fig. 3. One must take into account that the real solar radius change from the equator to the pole does not evolve over a short period of few hours (roll maneuver). Thus, the distortion has only an instrument origin. Over time, the shape of the HMI solar figure evolves. The distortion curve is obtained from the mean calculated solar radius along the same angle. After completing this operation, we fit a sum of sine curves through the cloud of points. Thereafter, we assume that the underlying solar profile is the same for all polar angles on the solar disk. Indeed, we calculate semi-diameters to better characterize the center of the solar image and to have more accurate results. Thus, it is assumed that there is no difference between the northern and the southern hemispheres.

#### 4.1.4. Data correction

After completing the previous steps, there is a correction of the optical distortion (see Eqs. (4) and (5)).

$$\langle R \rangle = \frac{1}{N \times N_\theta} \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^{N_\theta} R_{(m,n)}, \quad (4)$$

and

$$R_{C(i,j)} = R_{(i,j)} + \langle R \rangle - \frac{1}{N_\theta} \sum_{n=1}^{N_\theta} R_{(i,n)}, \quad (5)$$

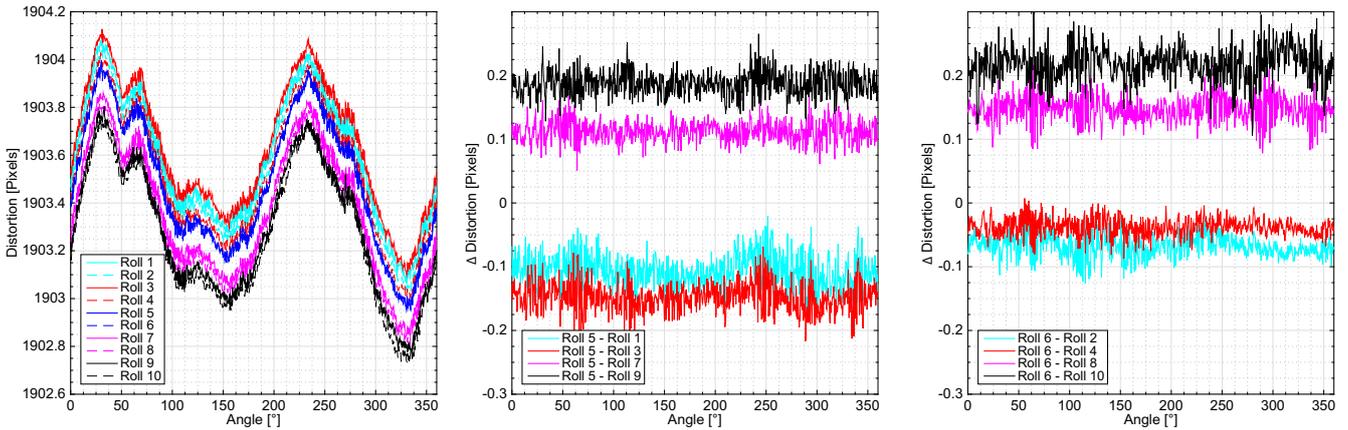


Fig. 3. The left panel shows the average solar limb position (radius) vs. angular position for each roll maneuver (distortion). The middle panel shows the distortion differences between Roll 5 and each October roll maneuver. The right panel shows the distortion differences between Roll 6 and each April and July roll maneuver.

where  $R_{c(i,j)}$  is the corrected solar radius at one astronomical unit (1 AU), which is connected with the HMI CCD frame (Fig. 4).  $R_{(i,j)}$  is the calculated solar radius corrected at 1 AU after IPP determination.  $N$  is the number of images, and  $N_\theta$  is the number of angles of the image.

#### 4.1.5. Change of reference from the CCD to the Sun frame

The rotation of the spacecraft is from North to West (clockwise) or from North to East (anti-clockwise) depending on the planned sequence (in April, in July, or in October). Eq. (6) describes the processing of the corrected solar radii from the CCD frame to the Sun fixed frame, during the 32 positions taken by the spacecraft (Eq. (7)).

$$\theta(\text{Sun})_{(i,j)} = \theta_{(j)} + (\text{Roll}_{(i)} - 1) \times 11.25, \quad (6)$$

$$1 \leq \text{Roll}_{(i)} \leq 32. \quad (7)$$

#### 4.1.6. Apparent solar oblateness determination

To determine the apparent solar oblateness, we fit the corrected solar radii (Sun fixed frame) with a sine function. The final fit of the apparent solar oblateness does not include the affected solar limbs (e.g. active regions, faculae, etc.). The effect of bright active regions near the limb has a significant impact as shown in Fig. 5 unlike dark regions (sunspots). Indeed, we inspected images at 393.4 nm (Ca II K) provided by the *Precision Solar Photometric Telescope* ([http://lasp.colorado.edu/pspt\\_access/](http://lasp.colorado.edu/pspt_access/)) to verify the location of the different solar regions and their effects. Thus, the most active regions of the solar limb are removed before doing the solar shape fit. Indeed, active regions are removed by suppression of data with deviation from the sine-fit greater than 2 standard deviations ( $2\sigma$ ). Then, we verify the goodness of the fit that indicates how well data fit the statistical model (a  $R^2$  of 1 indicates that the regression line perfectly fits the data) and we obtain the uncertainty of the measurements (95% confidence bounds or  $2\sigma$ ). The apparent solar shape ( $r(\Theta)$ ) can be also expressed using Legendre polynomials (see Appendix A).

#### 4.1.7. Heliographic latitude correction

We make a correction for the tilt of the ecliptic with respect to the solar equatorial plane (Eq. (8)). For an ellipsoid of revolution the apparent oblateness will decrease when the line of sight is not perpendicular to the rotation axis. To first order, the apparent equator-to-pole radius difference ( $\Delta r_a$ ) seen from an heliographic latitude  $B_0$  is related to the true solar equator-to-pole radius difference ( $\Delta r$ ). The range of  $B_0$  is  $\pm 7.23^\circ$ , correcting for the tilt of the ecliptic with respect to the solar equatorial plane. Thus, the maximum correction is equal to +0.14 mas (if  $\Delta r_a$  is close to 8 mas).

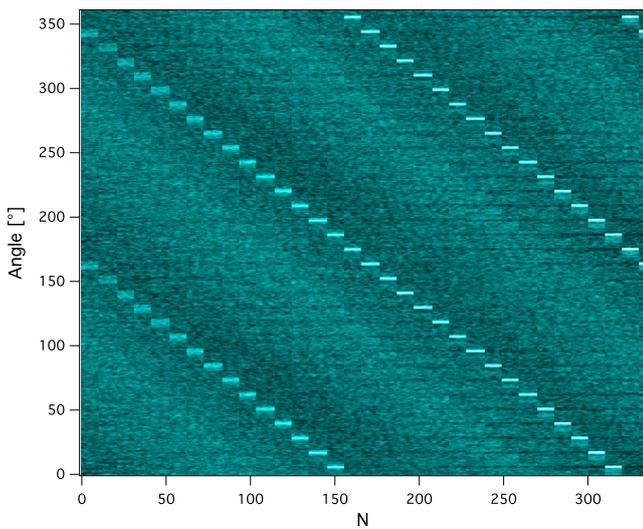


Fig. 4. Corrected solar radii ( $R_{c(i,j)}$ ) from the HMI CCD frame during roll maneuver 1 of the spacecraft. The figure highlights bright active region features from each image (luminous rectangular areas), which affect the solar radius determination (M1.1 and M1.2 methods) at several heliographic latitudes.  $N$  represents the number of images taken during the roll ( $\sim 10$  images per roll orientation).

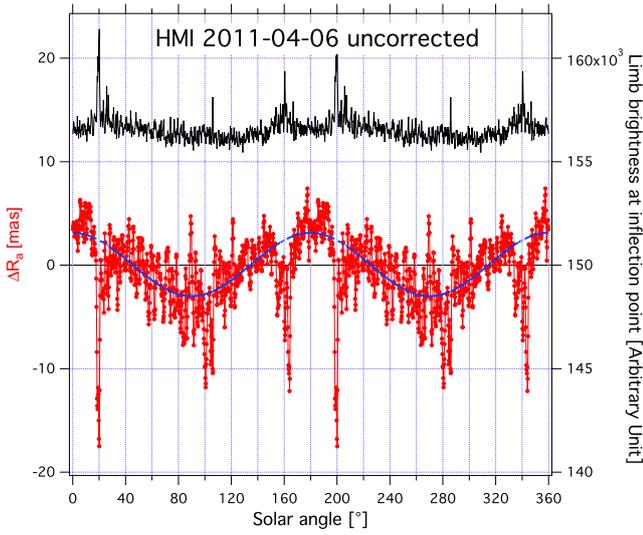


Fig. 5. Anti-correlation between the limb brightness and the solar radius determined from the inflection point position.

$$\Delta r = \frac{\Delta r_a}{\cos^2 B_0} \quad (8)$$

#### 4.2. Method 2: Correction method based on the brightness of the solar limb at the inflection point and its derivative with solar radius

When analyzing the solar radius versus angle data, we observe an anti-correlation between the limb brightness and the solar radius determined from the inflection point position (Fig. 5). The apparent solar radius is smaller if an active region is near the limb. Indeed, active regions near the solar limb affect the radius measurements as shown in Fig. 5 (up to 20 mas of reduction). The bright active regions are confined to low latitudes and never occur at the poles. Thus, we have developed a new method based on a correction of the solar radius for a given solar angle according to the brightness of the limb at the inflection point position and its derivative with solar radius:

$$\langle B \rangle = \frac{1}{N \times N_\theta} \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^{N_\theta} B_{(m,n)}, \quad (9)$$

and

$$Rb_{(i,j)} = Rc_{(i,j)} + \alpha \left( \frac{B_{(i,j)} - \langle B \rangle}{\frac{dB}{dR}(i,j)} \right), \quad (10)$$

where  $Rb_{(i,j)}$  is the corrected solar radius of limb brightness at 1 AU,  $B_{(i,j)}$  is the solar limb brightness at inflection point (Analog-to-Digital Unit or ADU), and  $\frac{dB}{dR}(i,j)$  is the solar limb brightness derivative at inflection point position. The coefficient  $\alpha$  is determined by the minimization of the mean squared difference between the corrected solar radius and the solar radius fitted by a sine function.

We want to emphasize that most active regions at the limb are removed from the solar shape before computing

the oblateness, as explained in Section 4.1.6. After performing this removal, the main cause of the anti-correlation between the solar radius and the limb brightness at the inflection point position is probably related to the instrument psf changes during the spacecraft roll. Thus, the brightness correction method aims to correct this effect. We assume that the optimal correction is obtained when the  $\chi^2$  of the fit is minimal. Indeed, we assume that the optimal correction is obtained when the sum of the square residuals (differences between observations and the data-fit) normalized by their uncertainties is minimal.

## 5. Results and discussions

### 5.1. Results based on instrument distortion methods

By using the method described in Section 4.1 (M1.1 and M1.2 methods for optical distortion correction), we compute the apparent solar equator-to-pole radius difference ( $\Delta r_a$ ) in the solar continuum at 617.3 nm for each roll maneuver. Table 3 summarizes the results of the 10 sequences that have been analyzed with the M1.1 and M1.2 methods (roll maneuver ranging from 1 to 10). The apparent solar shape is expressed using the Legendre polynomials, where the quadrupole ( $C_2$ ) and hexadecapole ( $C_4$ ) coefficients were calculated (Table 5). Fig. 6 shows the evolution of  $\Delta r_a$  from 2010 to mid-2015. As demonstrated in Fig. 6, aside from the seasonal variation of the  $\Delta r$ , it is clear that  $\Delta r$  gradually becomes smaller. This is mainly due to instrumental issues (or space environment impact) as shown below. However, we cannot exclude that the solar radius has weakly shrinking during Solar Cycle 24.

Using the M1.1 method (4000 IPP), the HMI apparent solar equator-to-pole radius difference is equal to  $6.68 \pm 1.39$  mas at one  $\sigma$  (mean of the 10 roll maneuvers). Using the M1.2 method (1728 angular sectors), the HMI apparent solar equator-to-pole radius difference is equal to  $6.57 \pm 1.45$  mas at one  $\sigma$ . By using two different methods for the determination of the solar radius, the results obtained are within the above error estimates ( $\sim 0.1$  mas of difference). Moreover, similar results were obtained from the sine fit and from the Legendre polynomials expression. On the other hand, the first four sets of roll analyses (from October 2010 to April 2012) correspond to the HMI data used previously in the publication by Kuhn et al. (2012). In this instance, we obtain a solar equator-to-pole of  $7.40 \pm 1.60$  mas at one  $\sigma$  (M1.1 method). With the M1.2 method, we obtain a solar equator-to-pole radius difference of  $7.02 \pm 1.89$  mas at one  $\sigma$ . This outcome is similar to Kuhn et al. (2012) results ( $7.2 \pm 0.49$  mas). However, we have to address the point on the consistency between visual observations and results derived from helioseismic data and theoretical models. Kuhn et al. (2012) found a value for the  $C_2$  coefficient, which is significantly lower in magnitude than the value implied by helioseismic rotation data (Armstrong and

Table 3

HMI apparent solar equator-to-pole radius difference (with 95% confidence bounds) for each roll maneuver (M1.1, M1.2, and M2 methods). HMI solar equator-to-pole radius difference (M2 method) linked to its  $\alpha$  coefficient for each roll maneuver. SSN represents the 27-days average sunspot number.

Roll	$\Delta r_a$ (M1.1)	$\Delta r_a$ (M1.2)	$\alpha$	$\Delta r_a$ (M2)	$\Delta r$ (M2)	SSN
1	$9.194 \pm 0.196$	$9.072 \pm 0.424$	0.673	$8.715 \pm 0.365$	$8.813 \pm 0.369$	33.5
2	$6.530 \pm 0.174$	$6.237 \pm 0.438$	0.540	$8.882 \pm 0.353$	$8.988 \pm 0.357$	84.3
3	$8.214 \pm 0.160$	$7.992 \pm 0.361$	0.392	$8.202 \pm 0.302$	$8.295 \pm 0.305$	131.4
4	$5.650 \pm 0.192$	$4.798 \pm 0.462$	0.582	$8.045 \pm 0.361$	$8.144 \pm 0.365$	89.4
5	$7.692 \pm 0.160$	$7.792 \pm 0.414$	0.525	$8.971 \pm 0.343$	$9.090 \pm 0.348$	82.2
6	$5.902 \pm 0.160$	$5.598 \pm 0.405$	0.443	$8.227 \pm 0.357$	$8.330 \pm 0.361$	87.7
7	$6.812 \pm 0.156$	$7.157 \pm 0.468$	0.610	$7.992 \pm 0.333$	$8.100 \pm 0.338$	80.1
8	$4.450 \pm 0.162$	$4.456 \pm 0.479$	0.563	$7.737 \pm 0.563$	$7.823 \pm 0.569$	124.9
9	$5.696 \pm 0.212$	$6.222 \pm 0.525$	0.485	$7.470 \pm 0.423$	$7.561 \pm 0.428$	99.5
10	$6.688 \pm 0.154$	$6.368 \pm 0.358$	0.551	$8.401 \pm 0.282$	$8.465 \pm 0.284$	58.3
Mean $\pm \sigma$	$6.683 \pm 1.388$	$6.569 \pm 1.451$	0.536	$8.264 \pm 0.488$	$8.361 \pm 0.493$	–

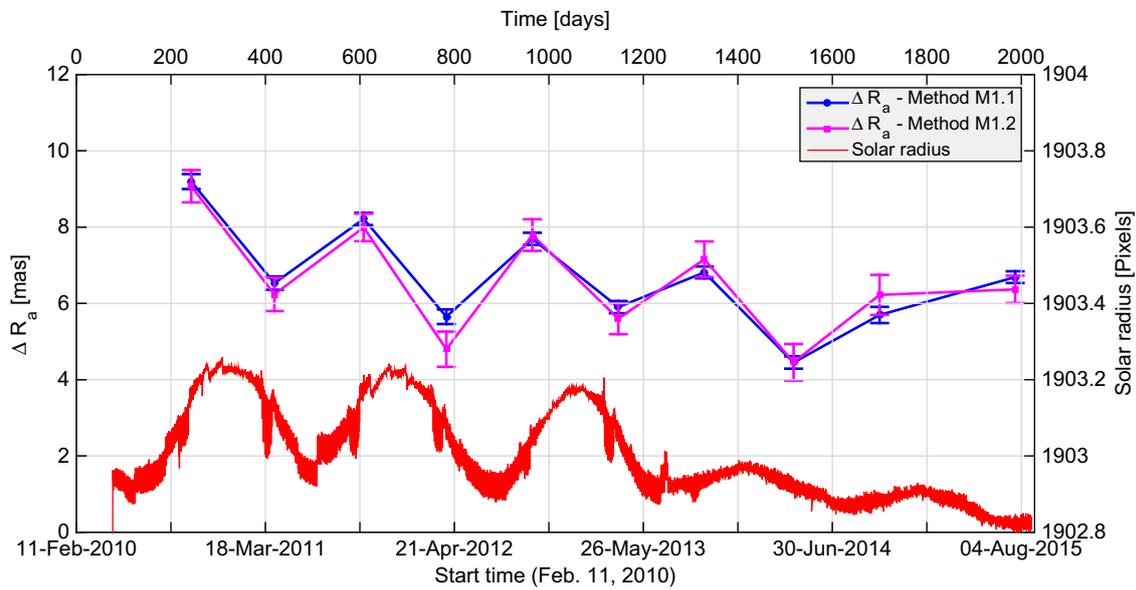


Fig. 6. Evolution of apparent solar equator-to-pole radius difference ( $\Delta R_a$ ). The red curve represents the evolution of the solar radius at one astronomical unit (pixels) over time, which is computed from HMI continuum images (without correction of HMI image scale).

Kuhn, 1999). They introduce a new hypothesis to explain the difference with the models with the difference in values possibly explained by a perturbation in the local rotation rate in the outer few percent of the Sun. Gough's (2012) discussion deduced from Kuhn et al.'s results (2012) that the Sun appears to be rounder than current understanding predicts. Gough (2012) highlights that something else other than rotation may be affecting the solar limb in HMI data, which may be of instrumental origin according to our interpretations. Indeed, the results of this study show that the solar radius measurements are sensitive to instrument effects and require specific methods such as the M2 method as described in this paper. The results show that physical mechanisms must act just below the surface (magnetic flows, see for instance the recent works of Zhao et al. (2013)). Matching the solar oblateness and the rotation profiles implies such a depth variation, moreover non homologous. Moreover, comparison of measurements

taken in April and in October indicates there is a likely seasonal instrumental effect that may impact the solar equator-to-pole radius differences obtained. Beginning in July 2013, the thermal control of the HMI optical bench was modified. Since that time, the behavior of the instrument has been modified as shown with the evolution of the solar radius observed by HMI instrument (Fig. 6). Starting in late February 2014, the HMI telescope tube heaters were also changed to constant temperature control. Finally in June 2014, the HMI front window heaters were set to constant temperature control. Nevertheless, we can observe that the seasonal effect remains by comparing the in April and October 2014 measurements. For the first time, a roll maneuver was performed during the month of July 2015, while, previous roll maneuvers were performed in April and October. The July roll maneuver is broadly similar to those obtained in October roll maneuvers. We therefore believe that the developed methods

(M1.1 and M1.2) do not provide an accurate determination of the solar equator-to-pole radius difference for each roll maneuver carried out. It would seem that systematic errors affect the determination of the solar equator-to-pole radius differences as Kuhn et al. (2012) analyses. Indeed, the instrument may vary during the roll maneuver (distortion, psf, and HMI image scale appear to be non-isotropic, non-axisymmetric, non shift-invariant, and changing). So, the solar equator-to-pole radius difference will be affected as well. This is the case during a roll maneuver, as we've noticed the evolution of the solar limb's first derivative FWHM (Fig. 2). In the case of the PICARD mission, we have overcome this problem by developing a specific roll maneuver. Indeed, we maintain each roll position of PICARD over an entire orbit (~99 min) with 58 images. In this mode, the spacecraft rotates around its axis directed to the Sun with twelve roll positions separated by 30°. Under this scenario, we have been able to reduce the transient effects on SODISM instrument by taking a number of images and by averaging the effects over an orbit. In the case of the SDO mission, the orbit location is different for each roll position. Thus, the thermal environment is never the same for the different positions of the roll. M1.1 and M1.2 methods were based on the assumption that the HMI instrument could be considered stable, which was not the case. That is why we have developed a new method (M2) based on an empirical model to take into account these instrumental effects. Indeed, with M1 methods, the mean solar equator-to-pole radius difference we found ( $\Delta R < 7$  mas) appears to be less than prediction ( $\Delta R > 8$  mas). We think that the mean solar equator-to-pole radius differences determined with M1 methods are

too small. Thus, the space environment affects the HMI solar oblateness results.

## 5.2. Impact of the space environment on HMI instrument

The HMI instrument is based on the design of the MDI instrument. The main characteristics are an effective focal length of 495 cm, a telescope clear aperture of 14 cm, an enclosure of  $0.84 \times 0.55 \times 0.16$  m, and a mass of 44 kg. The overall layout of the instrument is described by Schou et al. (2012).

In order, the light passes through a front window, the primary lens, the secondary lens, a focus block, three polarization-selector wave-plates, an image stabilization system fold mirror, another focus block, and a polarizing beamsplitter. Special attention has been paid to the front window thermal control design because thermal radial gradients in the window change the instrument focus and birefringence. The HMI temperatures (front window, front door motor housing, and optical bench) have been evaluated in order to characterize the optical performance of the telescope. HMI temperatures and image scale are shown in Fig. 7 highlighting their links.

Fig. 8 provides the change over time for a non-thermally-controlled temperature (housing of the motor of the front door) before, during, and after the roll maneuver. At the end of the roll maneuver, the HMI instrument needs more than five hours to regain its former state of equilibrium (transient steady state before the roll maneuver).

Before July 2013, the HMI optical package temperatures varied by a few °C with a yearly period. The HMI image scale shows a significant change, which is highly

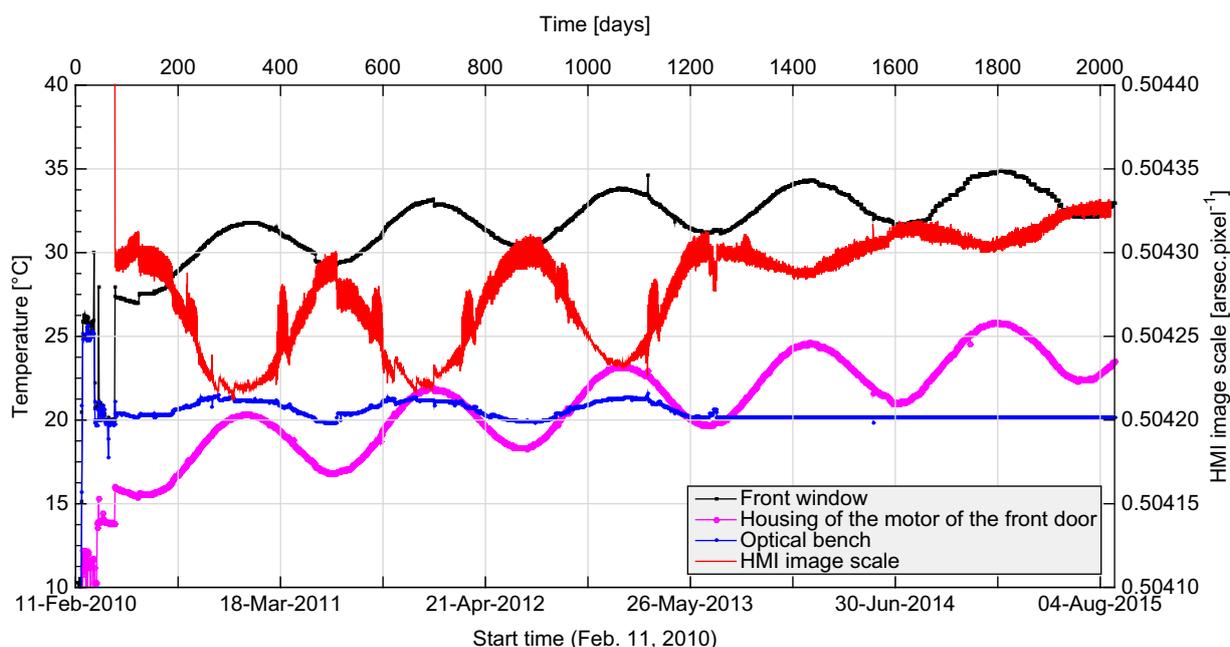


Fig. 7. HMI temperatures and image scale evolution from 2010 to 2015. The thermal control of the HMI optical bench was modified in July 2013. The Sun-facing surface has degraded on-orbit allowing the motor housing temperature to increase like the front window.

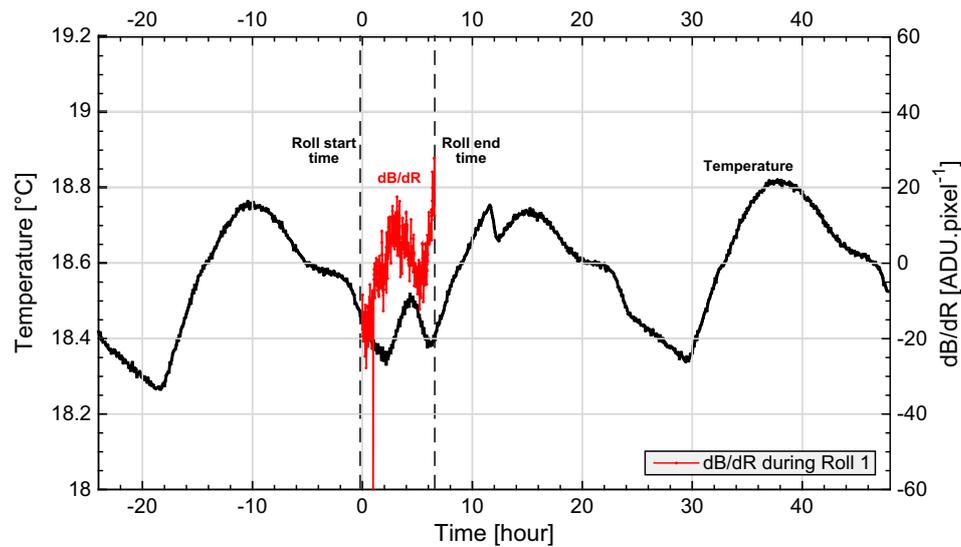


Fig. 8. Evolution of  $\langle \frac{dB}{dR} \rangle$  (red curve) during the solar oblateness roll maneuver 1 of the spacecraft. Similarly, evolution of the front door motor housing temperature during the same roll (black curve). The roll maneuver causes a temperature change. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

anti-correlated with the temperatures. In July 2013, the thermal control of the optical bench was modified. From this date, the optical bench temperature has remained stable ( $\sim 20$  °C). On the other hand, the front window temperatures continue to vary in the same way since 2010. Also, HMI image scale continues to grow and vary, but with smaller amplitudes. This highlights the fact that HMI image scale is linked with the front window temperature and the optical bench temperature. There is also an increasing slope for HMI Sun facing temperatures and for HMI image scale, which indicates aging of the HMI thermal coatings and Sun facing surfaces. It can be argued that for each roll maneuver, we have an instrument with different properties (psf). This is one of the consequences of space environment. It is important to note that if the instrument properties (image scale, psf, etc.) remains unchanged during a roll maneuver, this is not a problem. However, this is not the case mainly due to temperature change during a roll and the fact that the instrument is permanently in a transient state.

Similarly, the evolution of the mean solar limb brightness derivative at the inflection point position ( $\langle \frac{dB}{dR} \rangle$ ) during the roll maneuver is shown in Fig. 8. There is a phase shift between the temperature and  $\langle \frac{dB}{dR} \rangle$ , which is mainly due to the time response of the instrument (mass  $\sim 44$  kg). Moreover, there is a correlation between the temperature and  $\langle \frac{dB}{dR} \rangle$ , taking into account changes in the instrument. Thus, there is an interest to use this indicator ( $\langle \frac{dB}{dR} \rangle$ ) to correct the data (see M2 method). Seasonal effect exists based on measurements taken in April and in October. The July roll has similar characteristics as October measurements. Table 4 shows characteristic parameters based on HMI images analysis for each roll maneuver. In summary, the instrument presents slightly different characteristics for each roll position (distortion, FWHM,  $B$ ,  $\frac{dB}{dR}$ , image scale field, and therefore psf field). The methodology we have outlined here can be used to take into account such minor changes (see Section 4.2). Finally, results obtained from M1 methods indicates that there may be a contamination of

Table 4

Evolution of  $\langle FWHM \rangle$  (pixels),  $\langle B \rangle$  (ADU),  $\langle \frac{dB}{dR} \rangle$  (ADU pixel $^{-1}$ ), and HMI image scale (arcsec pixel $^{-1}$ ) for each roll maneuver of the spacecraft.

Roll	$\langle FWHM \rangle$	$\langle B \rangle$	$\langle \frac{dB}{dR} \rangle$	HMI image scale
1	5.48247	12372.61525	6175.98641	0.50423
2	5.48129	12322.87162	6167.23576	0.50424
3	5.51297	11890.85686	5928.11214	0.50422
4	5.51525	11379.65841	5687.48627	0.50425
5	5.50899	11304.39866	5640.14527	0.50426
6	5.52468	11207.30324	5590.37727	0.50426
7	5.55444	11236.79493	5603.09245	0.50429
8	5.57450	11055.54497	5489.75612	0.50430
9	5.54742	10976.13739	5467.04061	0.50431
10	5.51793	10568.11004	5294.04341	0.50432

the continuum tuned images due to adjacent absorption lines. This hypothesis calls for thorough debate and requires a more detailed analysis, which is not the subject of this study.

### 5.3. Results on the brightness of the solar limb at the inflection point and its derivative with solar radius

Using the method described in Section 4.2 (M2 method for optical distortion and brightness corrections), we compute the apparent solar equator-to-pole radius difference ( $\Delta r_a$ ) in the solar continuum at 617.3 nm for each roll maneuver. Table 3 summarizes the results of the 10 roll maneuver measurements that have been analyzed with the M2 method. The quadrupole ( $C_2$ ) and the hexadecapole ( $C_4$ ) coefficients are given in Tables 5 and 6. The determination of the  $C_4$  coefficient is not significant and is close to 0. And for this reason, we preserve the two approaches (the sine fit and the Legendre polynomial expression). As a reminder, after correcting the measurements for optical distortion, we found an apparent solar equator-to-pole radius difference ( $\Delta r_a$ ) of  $6.37 \pm 0.36$  mas ( $2\sigma$ ) in July 2015 (Fig. 9) using a sine fit in the data. This result is in line with M1.2 method.

Similarly, after correcting the measurements for optical distortion and for brightness (M2 method), we found an apparent solar equator-to-pole radius difference ( $\Delta r_a$ ) of  $8.40 \pm 0.28$  mas ( $2\sigma$ ) in July 2015 (Fig. 10). In July 2015, the two methods (M1 and M2) used lead to a different result with a gap of  $\sim 2$  mas. This analysis highlights the difficulty involved with the measurement of the solar oblateness. Indeed, our M1 method solar oblateness and most historical solar oblateness results likely contain probably systematics errors, which have not been taken into account. Instrumental changes (temperatures *vs.* psf) during a roll maneuver could impact solar oblateness measurement and introduce systematics errors. The precise measurement of the solar oblateness represents a scientific and technological challenge (very best solar telescope during excellent observing conditions such as one orbit per roll position). Measurements obtained by space instruments represent the best way to achieve this. The new method

Table 6

$C_2$  and  $C_4$  coefficients (with 95% confidence bounds) achieved for each roll maneuver with M2 method.

Roll	$C_2 \times 10^6$ (M2)	$C_4 \times 10^7$ (M2)
1	$-5.92 \pm 0.14$	$-2.22 \pm 1.70$
2	$-5.86 \pm 0.13$	$-2.69 \pm 1.58$
3	$-5.72 \pm 0.11$	$1.44 \pm 1.40$
4	$-5.69 \pm 0.14$	$3.29 \pm 1.61$
5	$-6.25 \pm 0.13$	$1.50 \pm 1.59$
6	$-5.69 \pm 0.14$	$2.08 \pm 1.68$
7	$-5.63 \pm 0.13$	$2.38 \pm 1.54$
8	$-5.17 \pm 0.13$	$-1.33 \pm 1.47$
9	$-5.41 \pm 0.17$	$2.52 \pm 1.90$
10	$-5.90 \pm 0.11$	$3.08 \pm 1.29$
Mean $\pm \sigma$	$-5.72 \pm 0.30$	$1.01 \pm 2.23$

that we have developed attempts to respond to this need, despite the fact that the instrument is permanently in a transient state.

More generally, the results of all the SDO roll maneuvers are shown in Fig. 11, which illustrates the evolution of  $\Delta r$  from 2010 to mid-2015. Results are corrected by the tilt of the ecliptic with respect to the solar equatorial plane. The  $\alpha$  coefficient (see Table 3) is determined by the minimization of the mean squared difference between the corrected radius and the solar radius fitted by a sine function. This method has been applied on several sequences of HMI observations. It is found that the optimal  $\alpha$  coefficient ranges between 0.4 and 0.7 and that the solar equator-to-pole radius difference is increased to values ranging between 7.5 and 9.0 mas, in better agreement with theoretical predictions as considered in Section 3 and by Godier and Rozelot (2000). The M2 method provides also a better stability of the solar equator-to-pole radius difference from one sequence to another. Our results indicate that the classical method of the inflection point position needs to be revisited to take into account the variability of the solar limb brightness for the determination of the solar oblateness.

With our new method (Section 4.2), we obtain a mean solar equator-to-pole radius difference of  $8.36 \pm 0.49$  mas at one  $\sigma$ , which is slightly different from those obtained with previous methods (M1.1 and M1.2). The result we

Table 5

$C_2$  and  $C_4$  coefficients (with 95% confidence bounds) achieved for each roll maneuver with M1 methods.

Roll	$C_2 \times 10^6$ (M1.1)	$C_4 \times 10^7$ (M1.1)	$C_2 \times 10^6$ (M1.2)	$C_4 \times 10^7$ (M1.2)
1	$-6.23 \pm 0.19$	$1.79 \pm 2.20$	$-6.37 \pm 0.16$	$-0.45 \pm 1.94$
2	$-4.63 \pm 0.13$	$1.14 \pm 1.51$	$-4.23 \pm 0.16$	$-2.30 \pm 1.92$
3	$-5.81 \pm 0.12$	$1.12 \pm 1.37$	$-5.59 \pm 0.14$	$1.26 \pm 1.64$
4	$-3.68 \pm 0.16$	$-0.69 \pm 1.81$	$-3.39 \pm 0.17$	$2.59 \pm 2.06$
5	$-5.69 \pm 0.12$	$7.76 \pm 1.43$	$-5.34 \pm 0.16$	$1.18 \pm 1.96$
6	$-4.18 \pm 0.12$	$3.62 \pm 1.42$	$-3.89 \pm 0.15$	$-0.64 \pm 1.84$
7	$-5.04 \pm 0.12$	$3.73 \pm 1.32$	$-4.82 \pm 0.19$	$-1.85 \pm 2.14$
8	$-3.06 \pm 0.13$	$-2.87 \pm 1.35$	$-2.68 \pm 0.18$	$-5.31 \pm 2.08$
9	$-3.96 \pm 0.18$	$-2.87 \pm 1.95$	$-4.34 \pm 0.21$	$0.29 \pm 2.33$
10	$-4.34 \pm 0.12$	$-6.17 \pm 1.38$	$-4.22 \pm 0.14$	$-3.30 \pm 1.64$
Mean $\pm \sigma$	$-4.66 \pm 1.02$	$0.65 \pm 4.00$	$-4.49 \pm 1.09$	$-0.85 \pm 2.38$

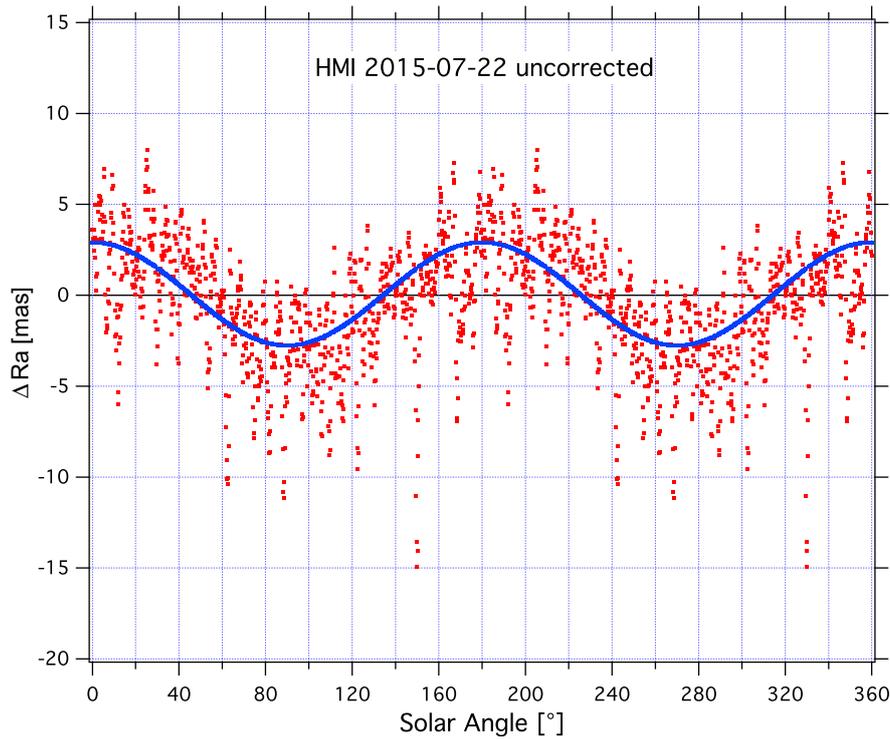


Fig. 9.  $\Delta R_a$  obtained from M1 method. Uncorrected solar radius of limb brightness.

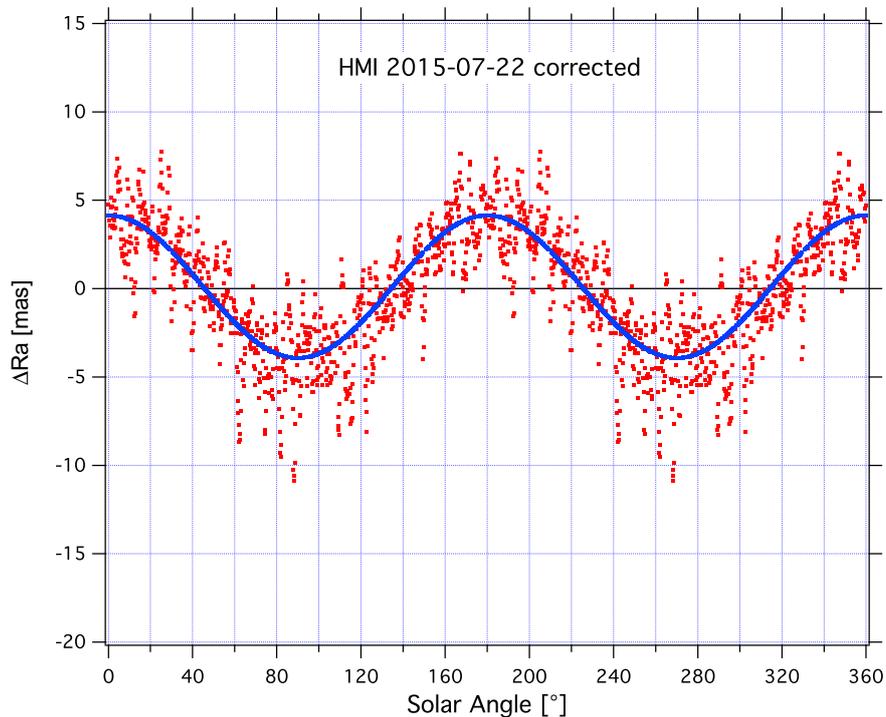


Fig. 10.  $\Delta R_a$  obtained from M2 method. Corrected solar radius of limb brightness.

found is then consistent with theoretical predictions and much less sensitive to the instrumental seasonal effect. The new oblateness value we obtain using the same HMI data set as Kuhn et al. (2012) agrees more closely with the helioseismic models.

Fig. 12 shows the evolution of  $C_2$  and  $C_4$  solar shape coefficients from 2010 to mid-2015. The mean quadrupole ( $C_2$ ) coefficient of the HMI time series is equal to  $(-5.72 \pm 0.30) \times 10^{-6}$  at one  $\sigma$ . The hexadecapole term is more difficult to determine and is probably not significant.

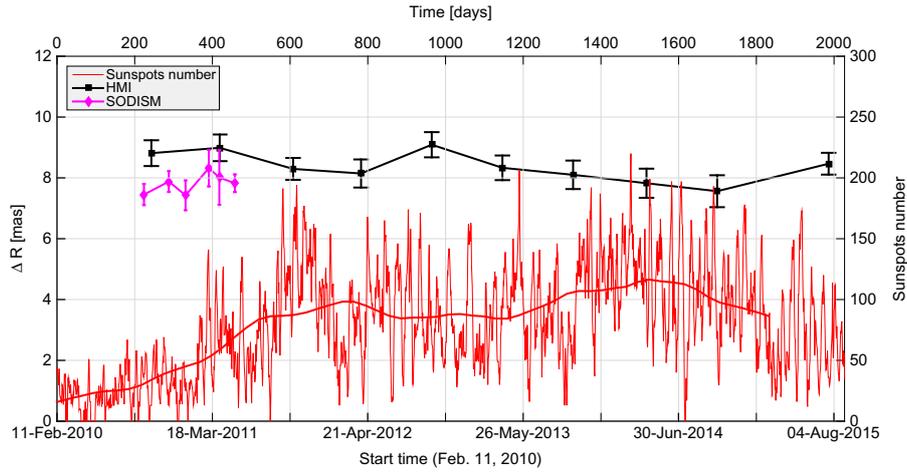


Fig. 11. Evolution of solar equator-to-pole radius ( $\Delta R$  for SODISM and for HMI) vs. sunspots number (daily sunspot number and 13-month smoothed monthly sunspot number).

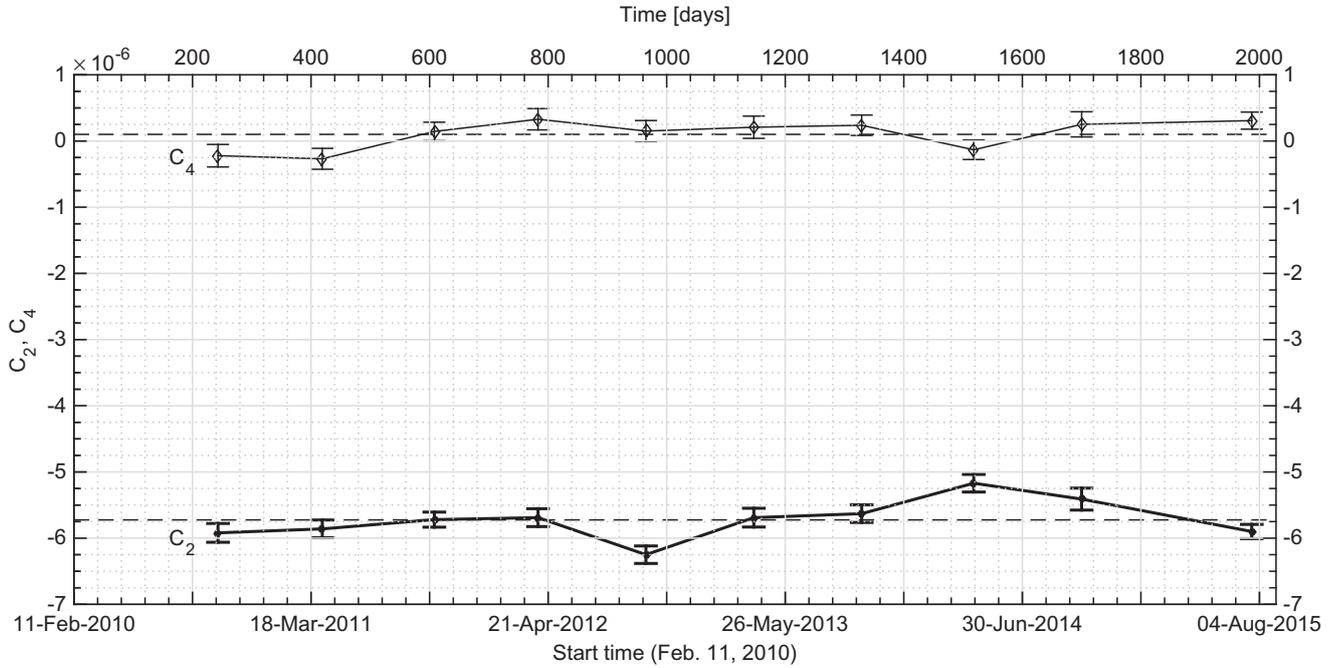


Fig. 12. Evolution of quadrupole ( $C_2$ ) and hexadecapole ( $C_4$ ) coefficients.

A value of  $C_4 = (1.01 \pm 2.23) \times 10^{-7}$  at one  $\sigma$  was obtained from the mean of all the roll maneuvers.

Thus, SDO/HMI (this study) and PICARD/SODISM (Meftah et al., 2015) represent two historical time series of solar oblateness measurement in space, which show that the variation of the solar equator-to-pole radius difference is very weak during the period 2010–2015 (if it exists).

Moreover, we have plotted the evolution of the solar activity during the period 2010–2015 (Fig. 11) to determine a correlation with the solar oblateness. Fig. 13 shows the solar equator-to-pole radius difference in relation to the 27-days average sunspot number. HMI measurements over the period 2010–2015 show a negative weak slope during

the rising phase of Solar Cycle 24. The weak variability of the solar shape during the solar cycle seems to exist, which was originally proposed by Dicke and Goldenberg (1967). However, the slope uncertainty requires a more detailed analysis during the descending phase of Solar Cycle 24. Indeed, the slope may be of solar origin, of instrumental origin, of data analysis, or a combination of these three effects. During a solar cycle, there are questions about the variation of the distortion of the gravitational potential produced by internal rotation and the variation of the surface rotation. Similarly, weak variation (few mas) of the solar radius ( $R_\odot$ ) can exist during the current solar cycle (Meftah et al., 2015) than can lead to a shrinking of the Sun with solar activity.

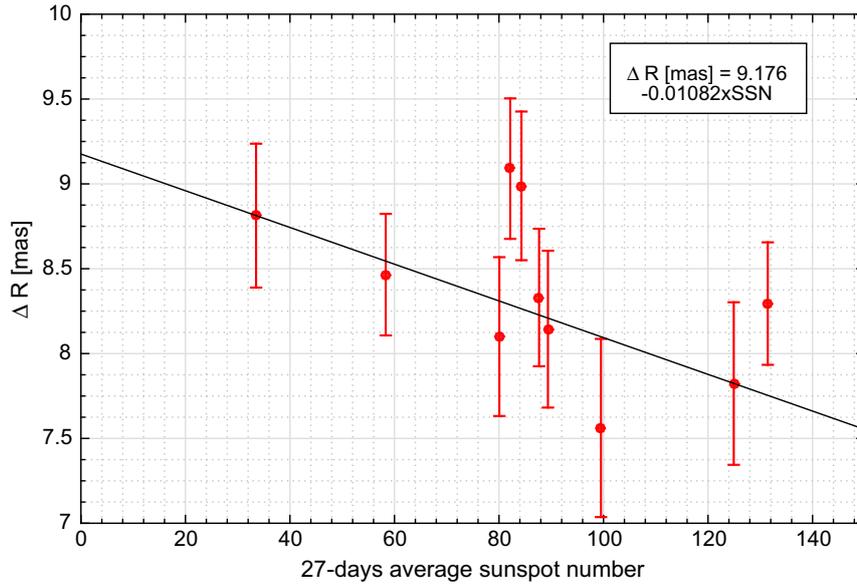


Fig. 13. Relation between  $\Delta R$  and 27-days average sunspot number. The slope of the line is  $-10.8 \pm 6.4$  micro-arcsecond ( $\mu\text{as}$ ) at  $1 \sigma$ .

## 6. Conclusions

New methods have been developed to estimate the solar oblateness during the Solar Cycle 24. Our results indicate that the classical method of the inflection point position needs to be revisited to take into account the variability of the limb brightness for the determination of the solar oblateness. A new space value of the solar oblateness is provided by the SDO mission. It has been calculated from the images recorded by the HMI instrument in the solar continuum at 617.3 nm. After correcting the measurements of the optical distortion and of the solar limb brightness at the inflection point position and its derivative with solar radius, we found a solar equator-to-pole radius difference of  $8.36 \pm 0.49$  mas at one  $\sigma$ . Our results with the brightness correction method is in agreement with helioseismic data. Moreover, it seems that the solar oblateness is slightly decreasing during solar cycle 24 rising. Our results shed new light on the determination of the solar oblateness and its variability during a solar cycle.

## Acknowledgements

This work has been supported by the CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) and by the French Space Agency (Centre National d'Etudes Spatiales). HMI is supported by NASA contract NAS5-02139 to Stanford University. Sunspot data are provided by the World Data Center SILSO (Royal Observatory of Belgium, Brussels). We acknowledge the HMI Team at Stanford University and University of Hawaii for fruitful discussions. Finally, the authors would like to thank the referees for their valuable comments which helped to improve the manuscript.

## Appendix A. Apparent solar shape expression using Legendre polynomials

The apparent solar shape ( $r(\Theta)$ ) can be expressed using Legendre polynomials ( $P_l$ ) as shown in Eq. A.1. The solar shape is often treated with this method. Thus, we can determine  $\Delta r_a$  from  $C_2$  and  $C_4$  coefficients (Eq. A.2).

$$\begin{aligned} r(\Theta) &= \langle r \rangle \times \left( 1 + \sum_{l=2,4} C_l \times \bar{P}_l(\cos(\Theta)) \right) \\ &= \langle r \rangle \times \left( 1 + C_2 \times \frac{1}{4} \times (3 \times \cos(2\Theta)) \right) \\ &\quad + \langle r \rangle \times \left( C_4 \times \frac{1}{64} \times (35 \times \cos(4\Theta) + 20 \times \cos(2\Theta)) \right) \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

and

$$\Delta r_a = r\left(\frac{\pi}{2}\right) - r(0) = \langle r \rangle \times \left( -\frac{3}{2}C_2 - \frac{5}{8}C_4 \right), \quad (\text{A.2})$$

where  $\Theta$  is the heliographic colatitude,  $\langle r \rangle$  is the mean solar radius at 1 AU,  $\bar{P}_l$  is the Legendre polynomial of degree  $l$  shifted to have zero mean ( $\bar{P}_l = P_l - \langle P_l \rangle$ ),  $C_2$  and  $C_4$  are the quadrupole and hexadecapole coefficients. The  $C_4$  term is sometimes called octopole.

## References

- Ambronn, L., & Schur, A.C.W. (1905). Die Messungen des Sonnendurchmessers an dem Repsold'schen 6-zoelligen Heliometer der Sternwarte zu Goettingen ausgefuhrt von W. Schur und L. Ambronn. *Astronomische Mitteilungen der Universitaets-Sternwarte zu Goettingen*, 7, 1.

- Antia, H.M., Chitre, S.M., Gough, D.O., 2008. Temporal variations in the Sun's rotational kinetic energy. *Astron. Astrophys.* 477, 657–663. <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20078209>, arXiv:0711.0799.
- Armstrong, J., Kuhn, J.R., 1999. Interpreting the Solar Limb Shape Distortions. *Astrophys. J.* 525, 533–538. <http://dx.doi.org/10.1086/307879>.
- Auwers, A., 1873. on an alleged variability of the Sun's diameter. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 34, 22.
- Auwers, A., 1891. Der Sonnendurchmesser und der Venusdurchmesser nach den Beobachtungen an den Heliometern der deutschen Venus-Expeditionen. *Astronomische Nachrichten* 128, 361. <http://dx.doi.org/10.1002/asna.18911282002>.
- Bianchi, E., 1831. Auszug aus einem Schreiben des Herrn Bianchi an den Herausgeber. *Astronomische Nachrichten* 9, 365. <http://dx.doi.org/10.1002/asna.18310092502>.
- Chandrasekhar, S., 1933. The equilibrium of distorted polytropes. I. The rotational problem. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 93, 390–406.
- Damiani, C., Rozelot, J.P., Lefebvre, S., Kilcik, A., Kosovichev, A.G., 2011. A brief history of the solar oblateness. A review. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 73, 241–250. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2010.02.021>.
- Dicke, R.H., 1970. Internal Rotation of the Sun. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 8, 297. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.aa.08.090170.001501>.
- Dicke, R.H., Goldenberg, H.M., 1967. Solar Oblateness and General Relativity. *Physical Review Letters* 18, 313–316. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.18.313>.
- Egidi, A., Caccin, B., Sofia, S., Heaps, W., Hoegy, W., Twigg, L., 2006. High-Precision Measurements of the Solar Diameter and Oblateness by the Solar Disk Sextant (SDS) Experiment. *Solar Phys.* 235, 407–418. <http://dx.doi.org/10.1007/s11207-006-0073-x>.
- Emilio, M., Bush, R.I., Kuhn, J., Scherrer, P., 2007. A Changing Solar Shape. *Astrophys. J. Lett.* 660, L161–L163. <http://dx.doi.org/10.1086/518212>.
- Fivian, M.D., Hudson, H.S., Lin, R.P., Zahid, H.J., 2008. A Large Excess in Apparent Solar Oblateness Due to Surface Magnetism. *Science* 322. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1160863>, 560–.
- Godier, S., Rozelot, J.-P., 2000. The solar oblateness and its relationship with the structure of the tachocline and of the Sun's subsurface. *Astron. Astrophys.* 355, 365–374.
- Gough, D., 2012. How Oblate Is the Sun? *Science* 337. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1226988>, 1611–.
- Hansen, P.C., 1992. Analysis of discrete ill-posed problems by means of the l-curve. *SIAM Review* 34, 561–580, URL: <https://www-jstor-org.etna.bib.uvsq.fr/stable/2132628>.
- Harzer, P., 1891. Über die Rotationsbewegung der Sonne. *Astronomische Nachrichten* 127, 17. <http://dx.doi.org/10.1002/asna.18911270202>.
- Hauchecorne, A., Meftah, M., Irbah, A., Couvidat, S., Bush, R., Hochedez, J.-F., 2014. Solar Radius Determination from SODISM/Picard and HMI/SDO Observations of the Decrease of the Spectral Solar Radiance during the 2012 June Venus Transit. *Astrophys. J.* 783, 127. <http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/783/2/127>.
- Irbah, A., Meftah, M., Hauchecorne, A., Djafer, D., Corbard, T., Bocquier, M., Momar Cisse, E., 2014. New Space Value of the Solar Oblateness Obtained with PICARD. *Astrophys. J.* 785, 89. <http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/785/2/89>.
- Kuhn, J.R., Bush, R.I., Emilio, M., Scherrer, P.H., 2004. On the Constancy of the Solar Diameter. II. *Astrophys. J.* 613, 1241–1252. <http://dx.doi.org/10.1086/423301>.
- Kuhn, J.R., Bush, R., Emilio, M., Scholl, I.F., 2012. The Precise Solar Shape and Its Variability. *Science* 337. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1223231>, 1638–.
- Maeder, A., 1999. Stellar evolution with rotation IV: von Zeipel's theorem and anisotropic losses of mass and angular momentum. *Astron. Astrophys.* 347, 185–193.
- Meftah, M., Hauchecorne, A., Crepel, M., Irbah, A., Corbard, T., Djafer, D., Hochedez, J.-F., 2014. The Plate Scale of the SODISM Instrument and the Determination of the Solar Radius at 607.1 nm. *Solar Phys.* 289, 1–10. <http://dx.doi.org/10.1007/s11207-013-0347-z>.
- Meftah, M., Hochedez, J.-F., Irbah, A., Hauchecorne, A., Boumier, P., Corbard, T., Turck-Chièze, S., Abbaki, S., Assus, P., Bertran, E., Bourget, P., Buisson, F., Chaigneau, M., Damé, L., Djafer, D., Dufour, C., Etcheto, P., Ferrero, P., Hersé, M., Marcovici, J.-P., Meissonnier, M., Morand, F., Poiet, G., Prado, J.-Y., Renaud, C., Rouanet, N., Rouzé, M., Salabert, D., Vieau, A.-J., 2014. Picard SODISM, a Space Telescope to Study the Sun from the Middle Ultraviolet to the Near Infrared. *Solar Phys.* 289, 1043–1076. <http://dx.doi.org/10.1007/s11207-013-0373-x>, arXiv:1303.0731.
- Meftah, M., Hauchecorne, A., Irbah, A., Corbard, T., Ikhlef, R., Morand, F., Renaud, C., Riguet, F., Pradal, F., 2015. On the Constancy of the Diameter of the Sun during the Rising Phase of Solar Cycle 24. *Astrophys. J.* 808, 4. <http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/808/1/4>.
- Meftah, M., Irbah, A., Hauchecorne, A., Corbard, T., Turck-Chièze, S., Hochedez, J.-F., Boumier, P., Chevalier, A., Dewitte, S., Mekaoui, S., Salabert, D., 2015. On the Determination and Constancy of the Solar Oblateness. *Solar Phys.* 290, 673–687. <http://dx.doi.org/10.1007/s11207-015-0655-6>.
- Meyermann, B., 1950. Zur Pulsation der Sonne. *Astronomische Nachrichten* 279, 45.
- Moulton, F.R., 1909. On Certain Implications of Possible Changes in the Form and Dimensions of the Sun, and Some Suggestions Toward Explaining Certain Phenomena of Variable Stars. *Astrophys. J.* 29, 257. <http://dx.doi.org/10.1086/141652>.
- Newcomb, S., 1895. On the principal fundamental constants of astronomy. *Astron. J.* 14, 185–189. <http://dx.doi.org/10.1086/102176>.
- Paterno, L., Sofia, S., di Mauro, M.P., 1996. The rotation of the Sun's core. *Astron. Astrophys.* 314, 940–946.
- Pijpers, F.P., 1998. Helioseismic determination of the solar gravitational quadrupole moment. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 297, L76–L80. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-8711.1998.01801.x>, arXiv:astro-ph/9804258.
- Pitjeva, E.V., 2005. Relativistic Effects and Solar Oblateness from Radar Observations of Planets and Spacecraft. *Astronomy Letters* 31, 340–349. <http://dx.doi.org/10.1134/1.1922533>.
- Poor, C.L., 1905. The Figure of the Sun. *Astrophys. J.* 22, 103. <http://dx.doi.org/10.1086/141245>.
- Reis Neto, E., Andrei, A.H., Penna, J.L., Jilinski, E.G., Puliaev, S.P., 2003. Observed Variations of the Solar Diameter in 1998/2000. *Solar Phys.* 212, 7–21. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1022943803849>.
- Roxburgh, I.W., 2001. Gravitational multipole moments of the Sun determined from helioseismic estimates of the internal structure and rotation. *Astron. Astrophys.* 377, 688–690. <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20011104>.
- Rozelot, J.-P., Damiani, C., 2011. History of solar oblateness measurements and interpretation. *European Physical Journal H* 36, 407–436. <http://dx.doi.org/10.1140/epjh/e2011-20017-4>.
- Rozelot, J.P., Damiani, C., Lefebvre, S., 2009. Variability of the solar shape (before space dedicated missions). *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 71, 1683–1694. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2009.09.003>.
- Schou, J., Scherrer, P.H., Bush, R.I., Wachter, R., Couvidat, S., Rabello-Soares, M.C., Bogart, R.S., Hoeksema, J.T., Liu, Y., Duvall, T.L., Akin, D.J., Allard, B.A., Miles, J.W., Rairden, R., Shine, R.A., Tarbell, T.D., Title, A.M., Wolfson, C.J., Elmore, D.F., Norton, A.A., Tomczyk, S., 2012. Design and Ground Calibration of the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Instrument on the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Phys.* 275, 229–259. <http://dx.doi.org/10.1007/s11207-011-9842-2>.
- Sofia, S., Girard, T.M., Sofia, U.J., Twigg, L., Heaps, W., Thuillier, G., 2013. Variation of the diameter of the Sun as measured by the Solar Disk Sextant (SDS). *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 436, 2151–2169. <http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stt1721>, arXiv:1303.3566.
- Sweet, I.P.A., Roy, A.E., 1953. The structure of rotating stars. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 113, 701.
- Tassoul, J.-L. (2000). *Stellar Rotation*.

- Tisserand, F., 1891. *Tisserand's Traité de Mécanique Céleste*. Gauthier-Villars, Paris, tome II 95 (2), 94.
- Wöhl, H., Brajša, R., Hanslmeier, A., Gissot, S.F., 2010. A precise measurement of the solar differential rotation by tracing small bright coronal structures in SOHO-EIT images. Results and comparisons for the period 1998–2006. *Astron. Astrophys.* 520, A29. <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/200913081>.
- Zhao, J., Bogart, R.S., Kosovichev, A.G., Duvall Jr., T.L., Hartlep, T., 2013. Detection of Equatorward Meridional Flow and Evidence of Double-cell Meridional Circulation inside the Sun. *Astrophys. J. Lett.* 774, L29. <http://dx.doi.org/10.1088/2041-8205/774/2/L29>, arXiv: 1307.8422.

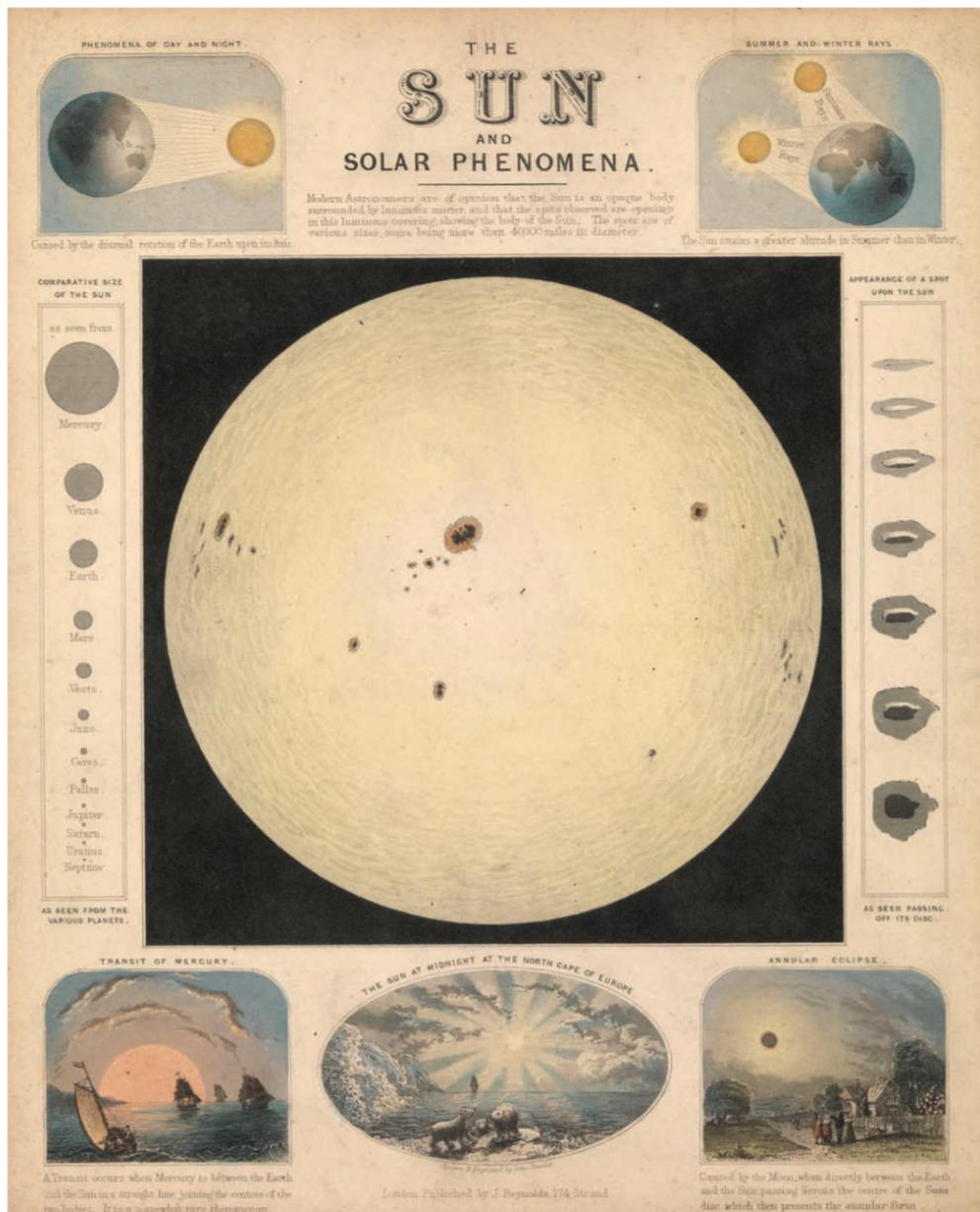
### 3.5 Conclusions

A partir des mesures réalisées par les instruments des missions spatiales PICARD (SODISM) et SDO (HMI), la valeur absolue de l’aplatissement solaire a été déterminée suivant plusieurs longueurs d’onde et pour deux régions de l’atmosphère solaire (photosphère et chromosphère).

Les différentes mesures de l’aplatissement solaire photosphérique (à 535.7, à 617.3 et à 782.2 nm) se situent quasiment à la même altitude au niveau de l’atmosphère solaire (différence d’altitude d’environ 22 km). A 535.7 nm (PICARD/SODISM), la différence entre le rayon équatorial et le rayon polaire ( $\Delta r_{\odot}$ ) est égal à  $8.40 \pm 0.30$  millièmes de seconde d’arc (mas), soit  $6.1 \pm 0.2$  km à  $1\sigma$ . A 617.3 nm (SDO/HMI),  $\Delta r_{\odot}$  est égal à  $8.36 \pm 0.49$  mas ( $6.1 \pm 0.4$  km à  $1\sigma$ ). A 782.2 nm (PICARD/SODISM),  $\Delta r_{\odot}$  est égal à  $7.90 \pm 0.30$  mas ( $5.7 \pm 0.2$  km à  $1\sigma$ ). **La valeur de l’aplatissement solaire photosphérique varie très faiblement entre 535.7 et 782.2 nm. La forme du Soleil est presque parfaitement sphérique, avec un aplatissement solaire aux pôles ( $\Delta_{\odot}$ ) estimé à environ 8.6 millièmes (moyenne des différents résultats obtenus). Le rayon polaire du Soleil (basse photosphère) est plus petit que son rayon équatorial de seulement six kilomètres.** Les mesures précises de l’aplatissement solaire photosphérique permettent de déterminer la valeur du moment quadrupolaire du Soleil ( $J_2$ ). Les résultats obtenus sont compatibles avec ceux issus de l’héliosismologie. Le coefficient du moment octopolaire du Soleil ( $C_4$  qui est associé à  $J_4$ ) a aussi été déterminé avec précision [Meftah *et al.*, 2016d]. Dès lors, les mesures précises de la forme du Soleil peuvent apporter une meilleure compréhension de ce qui se passe au niveau des couches proches de la surface solaire (structure interne).

La détermination absolue de l’aplatissement solaire obtenue à 393.37 nm avec l’instrument SODISM prend en considération deux régions de l’atmosphère solaire. Il s’agit de la chromosphère et de la photosphère (choix de la bande passante du filtre interférentiel de l’instrument, voir la Section 2.3.8). A 393.37 nm (PICARD/SODISM), la différence entre le rayon équatorial et le rayon polaire est égal à  $16.40 \pm 3.10$  mas ( $11.9 \pm 2.2$  km à  $1\sigma$ ). **Le rayon polaire du Soleil (chromosphère) semble être plus petit que son rayon équatorial de environ douze kilomètres. Ce résultat est extrêmement surprenant (différence de 8 mas entre la chromosphère et la photosphère) et difficile à interpréter.** Est-ce lié au fait que le champ magnétique est essentiellement ouvert aux pôles et fermé à l’équateur ? S’agit-il d’une valeur réelle ou d’un effet instrumental ? Une étude théorique doit être entreprise afin de mieux comprendre les mécanismes associés à ce résultat (influence de l’atmosphère solaire).

Enfin, **il semblerait que l’aplatissement solaire photosphérique diminue faiblement lorsque l’activité solaire augmente (entre 2010 et 2015)**. Ce résultat a été mis en évidence à partir de l’analyse des données de l’instrument HMI de la mission SDO [Meftah *et al.*, 2016d]. Fin 2016, une discussion a été initiée par Serge Koutchmy (IAP) afin d’interpréter ce résultat. Les valeurs de l’aplatissement solaire obtenues avec l’instrument HMI entre 2010 et 2015 semblent montrer une très petite modulation d’origine magnétique. Mais s’agit-il d’une modulation (directe ou indirecte) liée au magnétisme ou plutôt d’un effet instrumental (mesures, méthode de traitement, *etc.*)? En période de minimum d’activité solaire, le champ magnétique aux poles est plus « radial » qu’en période de maximum d’activité; d’où d’ailleurs les trous coronaux et un vent solaire rapide venant des poles. Ainsi, la « diminution » significative de l’aplatissement solaire en minimum d’activité, semble aller dans le sens d’une influence du champ magnétique en minimum d’activité. En conclusion, la rotation du Soleil génère un aplatissement des régions polaires et le champ magnétique peut introduire une faible modulation au cours d’un cycle solaire. Même si tous les processus physiques observés ne sont pas bien compris (possibilité d’une faible variation du rayon solaire, possibilité d’une variabilité de l’aplatissement solaire, *etc.*), il y a un consensus général pour admettre que le champ magnétique solaire joue un rôle fondamental. Il est donc fondamental de confirmer et de comprendre les phénomènes observés.



Affiche représentant le Soleil et les phénomènes solaires. Le Soleil et les taches solaires ont captivé l'imaginaire populaire pendant très longtemps. Crédits : James Reynolds John Emslie – Musée National Maritime, Greenwich, Londres.

# Chapitre 4

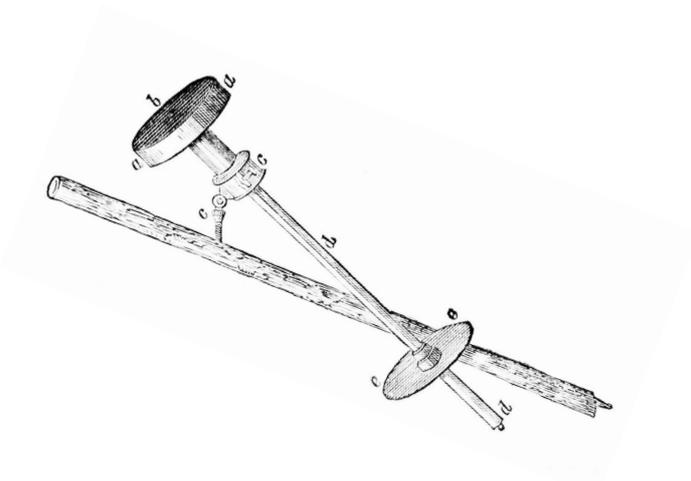
## La valeur absolue de la TSI et ses variations au cours du cycle 24

### Sommaire

---

4.1	Introduction	156
4.2	Détermination absolue de l'éclairement solaire total	157
4.3	Etude des variations de l'éclairement solaire total	158
4.4	Conclusions	182

---



**FIGURE 4.1** Illustration du pyrhéliomètre développé par Claude Pouillet (1790–1868). Un récipient cylindrique rempli d'eau (a) est orienté vers le Soleil afin de mesurer l'éclairement solaire total (« constante solaire »). La face exposée au Soleil (b) est peinte en noir. Le thermomètre (d) est protégé du Soleil par l'ombre du récipient. Cette ombre est projetée sur une plaque circulaire (e). L'alignement de l'instrument est effectué en s'assurant que l'ombre couvre entièrement et symétriquement la plaque (c).  
Crédits : A.C. Young's, *The Sun* (édition révisée de 1897).

## 4.1 Introduction

Le rayonnement solaire, première source d'énergie de la Terre, est constitué de l'ensemble du spectre électromagnétique. Il influe directement sur le climat de la Terre. L'éclairement solaire total correspond à la quantité d'énergie radiative provenant du Soleil. Il s'agit de l'énergie reçue par une surface de un mètre carré au sommet de l'atmosphère terrestre. L'éclairement solaire total représente une entrée essentielle pour tous les modèles climatiques. La détermination précise de la valeur absolue de l'éclairement solaire total est donc fondamentale. La première détermination sérieuse a été obtenue par Claude Pouillet à partir des mesures réalisées entre 1837 et 1838 avec son pyrhéliomètre (Figure 4.1). A cette époque, la valeur de l'éclairement solaire total était estimée à  $1228 \text{ W m}^{-2}$  [Pouillet, 1838].

Il a fallu attendre la fin des années 1970 avec l'avènement de l'ère spatiale pour que des observations précises et continues de l'éclairement solaire total commencent. A partir des mesures réalisées par différents radiomètres spatiaux au cours de ces 35 dernières années, la détermination précise de la valeur absolue de l'éclairement solaire total s'est peu à peu affinée. Les mesures radiométriques commencées en 1978, ont montré des désaccords qui peu à peu se sont réduits. Au début des années 2000, un certain consensus fut obtenu (valeur absolue de la TSI égale à environ  $1365.4 \pm 1.3 \text{ W m}^{-2}$ ). Mais en 2003, les mesures réalisées par l'instrument TIM (Total Irradiance Monitor) de la mission SORCE (Solar Radiation and Climate Experiment) ont apporté un nouveau regard vis à vis de la valeur précise de cette caractéristique physique du Soleil. Une valeur absolue de l'éclairement solaire total de  $\sim 1361 \text{ W m}^{-2}$  [Kopp *et al.*, 2004; Kopp et Lean, 2011] a été obtenue à partir des mesures de TIM. Cette valeur était inférieure de  $\sim 4.5 \text{ W m}^{-2}$  par rapport à la valeur consensuelle admise à cette époque. Ce résultat a fait l'objet d'un débat passionné. Récemment, ce résultat a été confirmé par les deux radiomètres de la mission spatiale PICARD [Schmutz *et al.*, 2013; Meftah *et al.*, 2014b] qui ont observé ensemble le Soleil de juillet 2010 à mars 2014.

La détermination de la valeur absolue de l'éclairement solaire total obtenue à partir de l'instrument SOVAP de la mission PICARD a exigé la mise en place d'une nouvelle équation instrumentale. A partir d'une analyse théorique, un nouveau paramètre a été intégré dans cette équation instrumentale [Meftah *et al.*, 2014b]. Il met en évidence la non-équivalence thermo-électrique de la cavité radiométrique qui avait été soupçonnée par André Chevalier (IRMB). A partir de cette approche, une nouvelle valeur absolue de l'éclairement solaire total a été obtenue. Elle est inférieure à celle obtenue précédemment avec des radiomètres de même type (la série DIARAD). A partir de l'analyse des données de l'instrument SOVAP, la valeur absolue de l'éclairement solaire total est es-

timée à  $\sim 1362 \text{ W m}^{-2}$ . Aujourd'hui, la valeur consensuelle de l'éclairement solaire total est considérée comme étant égale à  $\sim 1361 \text{ W m}^{-2}$  (recommandation de l'UAI de 2015).

Les observations hors atmosphère ont permis de mettre en évidence la variabilité de l'éclairement solaire total au cours d'un cycle de 11 ans ( $\sim 1.4 \text{ W m}^{-2}$ ). L'observation de ces variations depuis l'espace présente de multiples intérêts pour différentes disciplines scientifiques. L'amplitude des variations de l'éclairement solaire total est très faible à très court terme ( $\sim 0.1\%$  pendant un cycle de 11 ans) et à court terme ( $< 0.1\%$  depuis le minimum de Maunder) comparée à l'amplitude des variations à très long terme du Soleil (variation de  $\sim 6.6\%$  par milliard d'années liée à l'évolution des réactions nucléaires au niveau du Soleil vers des réactions plus énergétiques). Sur de courtes périodes de temps, l'éclairement solaire total peut être considéré comme constant. En effet, la valeur de l'éclairement solaire total a augmenté de environ 30% depuis la naissance du Soleil il y a plus de 5 milliards d'années (variations très long terme).

Les variations de l'éclairement solaire total au cours du temps peuvent être obtenues à l'aide des modèles de reconstruction. Certains modèles sont basés sur l'observation des taches solaires et des facules. Avant  $\sim 1978$ , on ne dispose que des observations de la couverture surfacique des taches solaires mais pas de celles des facules. En utilisant les observations visuelles et photographiques des taches solaires qui sont antérieures à 1978, on peut reconstituer les variations de l'éclairement solaire total aux périodes historiques et utiliser ses valeurs dans les modèles climatiques. Des critiques ont été formulées vis à vis du dénombrement des taches solaires, et si l'existence du minimum de Maunder ne peut être contestée, en revanche qu'en est-il précisément du dénombrement des taches solaires que l'on utilise pour développer les modèles de reconstruction de l'éclairement solaire total sur des périodes passées ? D'autres méthodes de reconstruction existent. Elles sont fondées sur la longueur du cycle solaire (où aucun lien avec la TSI n'est avéré) ou sur les variations de la concentration des isotopes cosmogéniques. Ces reconstructions sont toutes corrélées entre elles, mais comme elles s'appuient sur des hypothèses différentes, il est normal qu'elles diffèrent en tout temps. Les mesures des variations de l'éclairement solaire total sont donc nécessaires. Elles permettent de valider un modèle climatique sur la période observée afin de fournir des informations fiables sur des périodes passées.

## 4.2 Détermination absolue de l'éclairement solaire total

La méthode permettant de déterminer la valeur absolue de l'éclairement solaire total et les résultats obtenus à partir du radiomètre SOVAP ont été publiés dans une revue

scientifique à comité de lecture (Solar Physics). Cet article, intitulé « *SOVAP/Picard, a Spaceborne Radiometer to Measure the Total Solar Irradiance* », est présenté dans les pages qui suivent [Meftah *et al.*, 2014b].

### 4.3 Etude des variations de l'éclairement solaire total

Pour bien estimer la valeur absolue de l'éclairement solaire total et sa faible variation avec des instruments qui se dégradent dans l'espace, il est primordial d'avoir des mesures redondantes. Ceci a justifié la présence de SOVAP et de PREMOS (PRECision MONitor Sensor) sur le même satellite. Les variations de l'éclairement solaire total ont été mesurées entre 2010 et 2014 par les radiomètres SOVAP et PREMOS de la mission PICARD. Dans le cadre de cette thèse, je me suis particulièrement intéressé aux données acquises par l'instrument SOVAP et à la variabilité de la TSI au cours du temps. Aujourd'hui, les données acquises par SOVAP entre juillet 2010 et mars 2014 sont disponibles. Un article à comité de lecture (Journal of Space Weather and Space Climate), intitulé « *Total solar irradiance as measured by the SOVAP radiometer onboard PICARD* », montre les résultats obtenus [Meftah *et al.*, 2016b] avec le radiomètre SOVAP. Cet article est présenté dans les pages qui suivent.

# SOVAP/*Picard*, a Spaceborne Radiometer to Measure the Total Solar Irradiance

M. Meftah · S. Dewitte · A. Irbah · A. Chevalier ·  
C. Conscience · D. Crommelynck · E. Janssen ·  
S. Mekaoui

Received: 26 July 2013 / Accepted: 18 October 2013 / Published online: 12 November 2013

**Abstract** The *Picard* spacecraft was successfully launched on 15 June 2010, into a Sun-synchronous orbit. The mission represents one of the European contributions to solar observations and Essential Climate Variables (ECVs) measurements. The payload is composed of a *Solar Diameter Imager and Surface Mapper* (SODISM) and two radiometers: *Solar VARIability Picard* (SOVAP) and *PREcision MONitor Sensor* (PREMOS). SOVAP, a dual side-by-side cavity radiometer, measures the total solar irradiance (TSI). It is the sixth of a series of differential absolute-radiometer-type instruments developed and operated in space by the Royal Meteorological Institute of Belgium. The measurements of SOVAP in the summer of 2010 yielded a TSI value of  $1362.1 \text{ W m}^{-2}$  with an uncertainty of  $\pm 2.4 \text{ W m}^{-2}$  ( $k = 1$ ). During the periods of November 2010 and January 2013, the amplitude of the changes in TSI has been on the order of 0.18 %, corresponding to a range of about  $2.4 \text{ W m}^{-2}$ .

**Keywords** Instrumentation and data management · Instrumental effects · Solar cycle observations · Solar irradiance

## 1. Introduction

The solar irradiance (SI) is the primary source of energy reaching the Earth-atmosphere system. Nevertheless, neither its direct or indirect influence is able to explain the global warming over the past century (Foukal *et al.*, 2006; Foukal, 2012), and certainly not over the past 35 years (changes in solar activity and climate have been going in opposite directions), which limits the role of solar irradiance variation in twentieth-century

---

M. Meftah (✉) · A. Irbah  
LATMOS – Laboratoire Atmosphères, Milieux et Observations Spatiales, CNRS – Université Paris VI  
& Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines – IPSL, 78280 Guyancourt, France  
e-mail: [Mustapha.Meftah@latmos.ipsl.fr](mailto:Mustapha.Meftah@latmos.ipsl.fr)

S. Dewitte · A. Chevalier · C. Conscience · D. Crommelynck · E. Janssen · S. Mekaoui  
RMIB, Avenue Circulaire, 3, 1180 Uccle, Belgium

S. Dewitte  
e-mail: [steven.dewitte@meteo.be](mailto:steven.dewitte@meteo.be)

global warming. On longer time scales, records of the solar radiative output become essential when addressing the question of solar variability and its link with past climate changes, particularly during the Holocene period. However, solar irradiance measurements are only available for the last three decades, which calls for the use of models over longer time scales. These total solar irradiance (TSI) reconstructions (Vieira *et al.*, 2011) rely, among others, on solar-activity indices such as the sunspot number (Lean, 2000; Foster, 2004), geomagnetic indices such as the *aa* index (Lockwood and Stamper, 1999; Wenzler *et al.*, 2006), cosmogenic isotopes such as the  $^{14}\text{C}$  or  $^{10}\text{Be}$  (Solanki *et al.*, 2004; Steinhilber, Beer, and Fröhlich, 2009; Roth and Joos, 2013), or solar models such as the flux-transport models (Wang, Lean, and Sheeley, 2005). The TSI is a crucial input for all climate models. The actual absolute value of TSI is still a matter of debate. Claude Pouillet (1790–1868), a French physicist conducted the first measurements of this fundamental astrophysical quantity between 1837 and 1838. “Solar constant” was in fact the name he gave to the amount of incoming solar electromagnetic radiation per unit area, at a Sun–Earth distance of one astronomical unit (AU). The first estimate of the solar constant was  $1228 \text{ W m}^{-2}$  (Pouillet, 1838), very close to the current estimate. The solar constant is in fact not constant. Charles Greeley Abbot (1872–1973) claimed that his data showed variations in the solar constant and therefore the TSI, but he was not able to demonstrate this (Abbot, Fowle, and Aldrich, 1923; Abbot, Aldrich, and Hoover, 1942). Indeed, the Earth’s atmosphere affects ground-based measurements, which makes the determination of the TSI difficult. In particular, the solar spectral flux distribution (when transiting the Earth’s atmosphere) is modified by absorption and scattering processes. Therefore, TSI measurements from space are required. Indeed, TSI variations were undetectable until spacecraft observations began in 1978. These observations showed that the TSI variations are within Abbot’s data accuracy. The first long-term TSI measurements outside the Earth’s atmosphere were conducted with the sensors of the *Earth radiation budget* (ERB) experiment on the *Nimbus 7* spacecraft (from Latin for “dark cloud”). Results provided a mean TSI value of  $1370.56 \text{ W m}^{-2}$  from 1978 to 1987, and a range of  $5.95 \text{ W m}^{-2}$  (Hickey *et al.*, 1980, 1988). The *Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor* (ACRIM) on the *Solar Maximum Mission* (SMM) gave a TSI variability of  $\pm 0.05 \%$  for a mean value of  $1368.31 \text{ W m}^{-2}$  throughout the first 153 days of observations (Willson *et al.*, 1981).

During a solar cycle, TSI variations are relatively small. Nevertheless, these changes have been proposed as a possible driver of climate change (Willson and Hudson, 1991; Fröhlich and Lean, 1998). Based on measurements collected from various spaceborne instruments over the last 35 years, the measured TSI absolute value (for the mean annual TSI representative at solar minimum) has incrementally declined from  $1371 \text{ W m}^{-2}$  in 1978 to about  $1361 \text{ W m}^{-2}$  in 2013. The *Total Irradiance Monitor* (TIM) instrument onboard the *Solar Radiation and Climate Experiment* (SORCE) measured a TSI of about  $1361 \text{ W m}^{-2}$  (Kopp, Lawrence, and Rottman, 2004; Kopp and Lean, 2011). Results were further confirmed by the *PREcision MONitor Sensor* (PREMOS) instrument (Schmutz *et al.*, 2009, 2013). This measurement is lower than the mean TSI value of  $1366.6 \pm 1.3 \text{ W m}^{-2}$ , computed from the TSI composite of the Royal Meteorological Institute of Belgium (RMIB) from 17 December 1984 to 24 December 2008. The RMIB model gives an 11-year TSI modulation.

Initially, TSI measurements were performed from the ground and from sounding rockets. The quality of these data may not be sufficient to converge to the TSI absolute value (effects of the atmosphere). Space-borne observations highlight other difficulties (behavior in space and on-orbit degradation). Space is a harsh environment for radiometers, with many physical interactions leading to potentially severe degradation of the performance (optical,

thermal, and electrical). Investigation and analysis of the degradation of space radiometers are crucial parts of achieving the scientific goals of all such instruments. The TSI absolute value depends on each radiometer (ground calibration, behavior in space, space calibration, mastery of degradation, uncertainties budget). The TSI absolute value remains difficult to obtain.

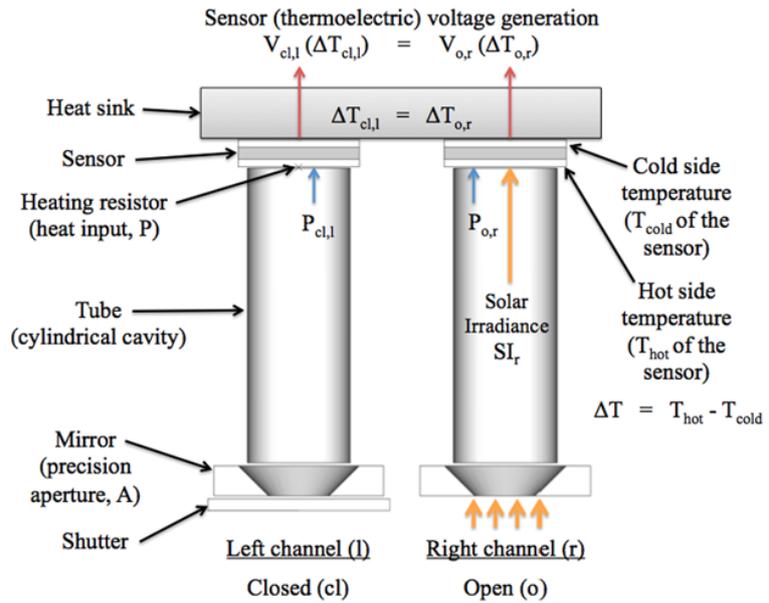
The problem is different for the TSI variations. TSI variations were too small to be detected with the technology available before the spacecraft era. The instruments currently in space yield a TSI variation that is substantially identical. The total solar output is now measured to vary (over the last three 11-year sunspot cycles) by approximately  $\pm 0.05\%$ . The TSI is in phase with solar activity because the Sun is faculae-dominated, which is not the case for every Sun-like star. The variations in TSI represent the integrated change across ultraviolet (UV), visible, and near-infrared regions. In the UV, the amplitude of the variations is much higher, with relative changes of 1 to 20% observed in the UV band (Cebula and Deland, 1998; Deland and Cebula, 2012). In the visible and near-infrared bands, the amplitude of the variations rarely exceeds 0.5% during a solar cycle. Spectral solar irradiance (SSI) variability influences the Earth's atmosphere (Ermolli *et al.*, 2012). SSI changes are more difficult to observe during the 11-year cycle. Indeed, the degradation of the instruments limits this observation, particularly in the UV (BenMoussa *et al.*, 2013). The *Solar Diameter Imager and Surface Mapper* (SODISM) onboard the *Picard* space mission provides wide-field images of the chromosphere and photosphere of the Sun in five narrow-bandpasses centered at 215.0, 393.37, 535.7, 607.1, and 782.2 nm. TSI variations have been successfully modeled by using solar surface magnetic features (Domingo *et al.*, 2009). A comparison between the normalized TSI and the SSI time series can be made over the whole time span of the *Picard* mission.

The *Solar Variability Picard* (SOVAP) radiometer measures one of the essential climate variable (TSI) onboard *Picard*. In this paper, we report on the TSI measurements of SOVAP (absolute value and variations) during the years 2011 and 2012.

## 2. SOVAP Flight Operations

SOVAP (Conscience *et al.*, 2011) is a *Differential Absolute RADiometer* (DIARAD) developed at RMIB (Crommelynck and Domingo, 1984). DIARAD-type radiometers are the first side-by-side absolute cavity radiometers operating in space. SOVAP radiometric core is formed by two blackened cavities constructed side by side on a common heat sink. A heat-flux transducer (thermo-electric sensor) is mounted between each cavity and the heat sink (Figure 1). The difference between the two balanced sensor outputs (open-circuit voltage  $V$ ) gives an instantaneous differential temperature measurement ( $\Delta T$ ) in which the common part of the thermal surrounding radiation seen by the two cavities is eliminated. By symmetrical construction, good insulation, and proper selection of thermo-optical materials, thermal asymmetry is minimized. Both channels are equipped with a shutter in front of them by which sunlight can be occulted (closed shutter) or allowed into the cavity (open shutter). In the open-shutter phase, the solar flux ( $SI$ ) flows into the cavity through a precision aperture (mirror) and is absorbed. The cavity is cylindrical (tube) and is covered with diffuse black paint. In addition to solar radiative power, electrical power ( $P$ ) can be dissipated by a resistor mounted in the cavity (heating resistor). During the design of the cavities, special attention has been paid to obtain corresponding spatial locations and distributions for the solar and the electrical heating power flowing directly into the heat-flux sensor. SOVAP-DIARAD has a double-differential design, allowing differential left-right and differential open-closed

**Figure 1** Schematic representation of the radiometer.



measurements. We describe the operation modes we used and analyze here in the sections below. They differed depending on the left- and right-channel shutter operations.

### 2.1. Nominal Right-Channel Measurements – Auto 3

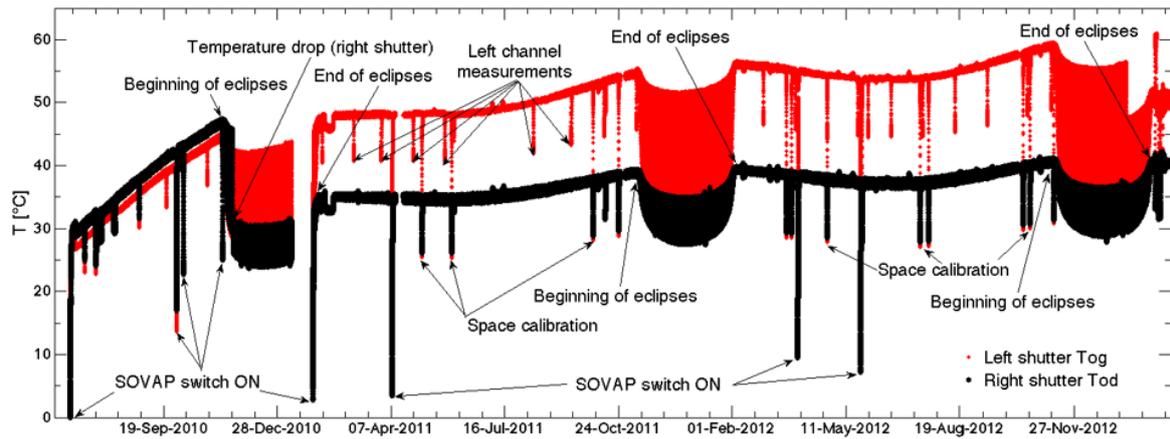
Nominal right-channel measurements were made in the instrument's Auto 3 mode. During this mode, the left shutter is closed, while the right shutter sequentially opens and closes. This mode corresponds to a double-differential operation. It has a sampling period of three minutes and an instrument noise level of  $0.1 \text{ W m}^{-2}$ . This mode was used to measure the absolute level of the TSI and to verify the short-term stability of the right channel. This mode was used intermittently from 22 July 2010 until 28 August 2010. It was abandoned due to a failure of the right shutter mechanism, which left it permanently open.

### 2.2. Nominal Left-Channel Measurements – Auto 2

The Auto 2 mode corresponds to open and closed states of the left shutter while the right shutter is closed (similarly to the Auto 3 mode). This mode was used to measure the TSI absolute level as well as the TSI variability from 28 August 2010 to 27 October 2010. This mode was used during about half an hour every month (at the beginning of the mission). Therefore, the left cavity was deliberately kept less exposed to solar radiation to minimize the degradation due to solar UV radiation. In early 2013, this mode was used again because we were near the end of the lifetime of the spacecraft. This channel (with low aging) provides the TSI measurement with the lowest uncertainty (Table 4).

### 2.3. Continuously Open Right-Channel Measurements – Rad 10

During the so-called Rad 10 mode, the right shutter is permanently open and the left shutter is kept closed. This new mode was used since the first occultation period on 18 November 2010 (after an update of the flight software). Indeed, an abnormal increase of the temperature of the shutters was observed from the beginning of the mission (Figure 2). This rise of temperature caused a failure of the right-shutter mechanism, leading to the adoption of this new mode of operation. The Rad 10 mode has the advantage of increasing the time



**Figure 2** The temperature of the shutters (red circles: left; black circles: right) has significantly varied since the beginning of the mission. We can observe the temperature drop of the right shutter at its permanent opening. SOVAP is particularly vulnerable because its shutters and radiators are exposed to unshielded solar radiation. SOVAP has suffered substantial degradation due to a combination of solar irradiation and contamination.

resolution at the cost of a decrease in the accuracy and stability of the measurements. SOVAP measurements are organized in packets of 90 seconds (90 s), containing nine frames of 10-second measurements each. TSI acquisitions are made at seconds 20, 40, 70, 80, and 90. During nominal modes (Auto 2 and Auto 3), only the acquisition at second 90 is used. Indeed, all other acquisitions correspond to a transient state during which thermal equilibrium between the two cavities is not reached. In the Rad 10 measurements mode, this equilibrium is observed. Therefore, all TSI measurements at seconds 20, 40, 70, 80, and 90 can be used. Since early 2013, we have stopped using this mode to focus on nominal measurements with the left channel.

### 3. SOVAP TSI Equation and Measurement Uncertainty

To extract the maximum amount of information about the TSI variation it is necessary to minimize the instrumental errors of the available radiometers as much and as objectively as possible. Minimization of the instrumental errors requires a careful instrument design, pre-flight calibration, flight data processing, and detailed data analysis including aging corrections. To derive the most accurate TSI measurements, it is important to understand the error sources of the measuring instrument to apply appropriate corrections and to quantify the remaining uncertainties for the temperature and the electrical power measurements. These corrections are used to deliver the final scientific TSI value. To determine the TSI from SOVAP we established the instrumental equation we present below.

#### 3.1. SOVAP TSI Equation – Auto 2 and Auto 3 Modes

The TSI (Auto 3 mode, for example) is defined as the solar irradiance at the mean Earth–Sun distance according to

$$TSI_r = SI_r \frac{z^2}{(1 \text{ AU})^2} \frac{1}{\left(1 - \frac{\partial z}{\partial t} \frac{1}{c}\right)^2}, \quad (1)$$

where  $TSI_r$  is the total solar irradiance for the right cavity at 1 AU ( $\text{W m}^{-2}$ ),  $SI_r$  is the solar irradiance obtained using the right cavity ( $\text{W m}^{-2}$ ),  $z$  is the distance between the

**Table 1** Definition of the radiometer parameters.

Parameter	Definition
$C_1$	Correction to take into account the heating effects by the wires
$C_2$	Correction for the accuracy of the servo-system (almost negligible)
$C_3$	Correction of the thermal radiative effects of the active shutter
$C_4$	Correction of the thermal radiative effects of the mirror above the cavity
$C_5$	Total correction factor for the optical effects (diffraction and scattering)
$C_6$ (at 90-s)	Dynamic non-equivalence of the sensors (radiometric modes)
$\alpha_{\text{eff},r}$	Efficiency of the right cavity
$A_r$ at 20 °C	Measured accurate aperture area at + 20 °C
$\Delta_r$	Correction factor of the aperture area (expansion of the mirror)
$\Delta'_r$	Correction factor of the aperture area (expansion of the radiometer)
$\Delta''_r$	Correction factor of the aperture area (constraints during the integration)
$\cos \theta$	Solar pointing angle of the radiometer
$\Delta P_{o,r}$	Thermo-electrical non-equivalence of the cavity (open and closed)

spacecraft and the Sun (km), 1 AU is one astronomical unit (km),  $c$  is the speed of light (299 792.458 km per second), and  $t$  is the time (second). A small uncertainty on the TSI measurement associated with the Doppler effect (Fröhlich *et al.*, 1997) is about  $\pm 50$  ppm (according to the spacecraft velocity of about  $\pm 7.5 \text{ km s}^{-1}$ , in the worst case).

$SI_r$  is derived from the measurement of the electrical power supplied to the active cavity (right) of the radiometer to maintain the active cavity with the same heat sink flux in the open and closed states (Equation (3)) according to

$$SI_r = C_5 \frac{(\overline{P_{cl,r}} - P_{o,r}) - \Delta P_{o,r} + C_1 + C_6)(1 - C_2)}{\alpha_{\text{eff},r} A_r (1 + \Delta_r + \Delta'_r + \Delta''_r) \cos \theta} + C_3 + C_4, \quad (2)$$

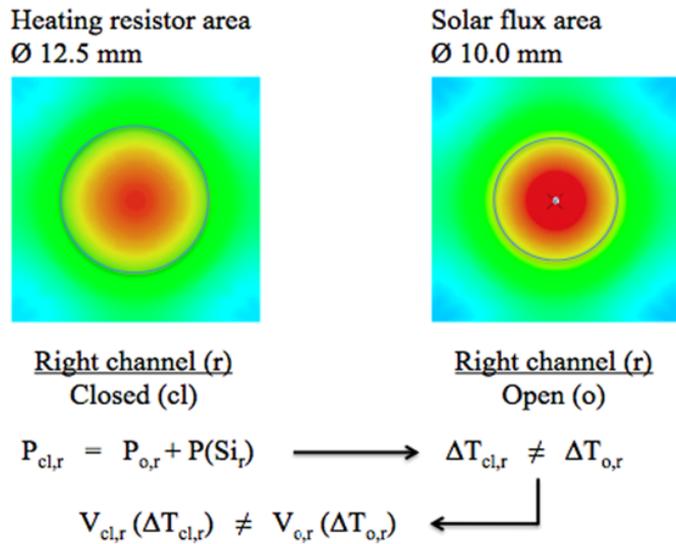
$$\overline{P_{cl,r}} = \frac{P_{cl,r,t1} + P_{cl,r,t3}}{2}, \quad (3)$$

where  $P_{cl,r,t1}$  is the electrical power (W) fed to the right cavity in closed state of the shutter at the time  $t1$ ,  $P_{cl,r,t3}$  is the electrical power (W) fed to the right cavity in closed state of the shutter at the time  $t3$ ,  $P_{o,r}$  is the electrical power (W) fed to the right cavity in open state of the shutter at the time  $t2$ . The definition of the parameters of Equation (2) is provided in Table 1. Each parameter is described in more detail in the instrumental paper (Conscience *et al.*, 2011).

The thermo-electrical non-equivalence between the effects of the electrical (heating resistor) or solar flux heating of the bottom of the cavity defines  $\Delta P_{o,r}$ . It is characterized by a different topological distribution of the energy in the radiometer cavity (Figure 3).

Each cavity is constituted from a thermoelectric sensor, a tube, and the rear side of the precision aperture. Between each cavity and the heat sink, a sensor and a heating resistor are mounted. The equilibrium between the output voltage of the two sensors is maintained by controlling the electrical power in one of the two cavities (right channel) using an analog-proportional integral servo system. The sensor voltage  $V(\Delta T)$  (in Volt) for each cavity may be written as

$$V(\Delta T) = N\alpha_s \Delta T, \quad (4)$$



**Figure 3** Demonstration of the thermo-electrical non-equivalence. For the same voltage at the output of the sensors, we do not obtain the same temperature distribution at the surface of the sensors. In the closed phase, the mean temperature of the sensor ( $\overline{T}_{cl,r}$ ) is 21.0789 °C (left). In the open phase, the mean temperature of the sensor ( $\overline{T}_{o,r}$ ) is 21.0808 °C (right). The temperature of the heat sink ( $T_{cold}$ ) is 20 °C. The temperature difference is small, but has a significant impact on the determination of the TSI. The temperature gradient between the faces of the sensor (thermo-electric generator) is near 1 °C.

where  $N$  is the number of series-connected elements of the sensor (70),  $\alpha_s$  is the Seebeck coefficient ( $2.07 \times 10^{-4} \text{ V K}^{-1}$ ) of the sensor, and  $\Delta T$  is the temperature gradient (between hot and cold sides) of the sensor ( $\sim 1$  Kelvin).

Auto 3 mode (nominal right channel) corresponds to a double-differential operation (this is similar to the Auto 2 mode). One differential operation is effective (between the two cavities). Another differential operation represents a non-equivalence (the same cavity in open and closed phase) according to

$$V_{cl,r}(\Delta T_{cl,r}) \neq V_{o,r}(\Delta T_{o,r}), \quad (5)$$

where  $V_{cl,r}(\Delta T_{cl,r})$  is the sensor voltage in the closed state of the shutter (V) and  $V_{o,r}(\Delta T_{o,r})$  is the sensor voltage in the open-shutter phase (V).  $\Delta T_{cl,r}$  is the mean temperature of the sensor in the closed state of the shutter (in Kelvin), and  $\Delta T_{o,r}$  is the mean temperature of the sensor in the open-shutter phase (K). In the closed state of the shutter, the electrical power is dissipated on a disk of 12.5 mm diameter (left side). In the open-shutter state, the solar flux ( $SI$ ) is absorbed on a circular spot of 10 mm diameter (right side) and an additional electrical power dissipated on a disk of 12.5 mm diameter (right resistor). The thermo-electrical configuration is given in Figure 3.

### 3.2. Typical Parameter Values

Typical values are provided in Table 2. The method for determining the parameter  $\Delta P_o$  is given below.

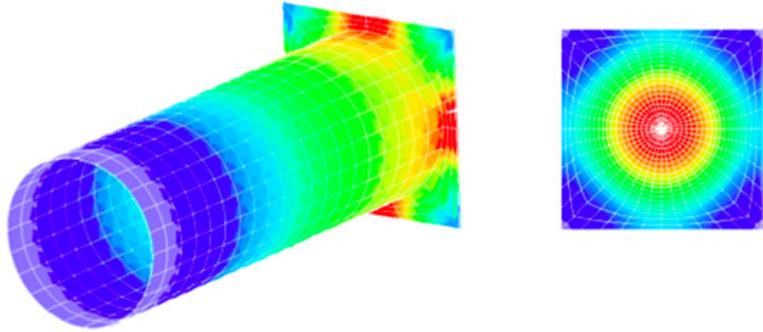
The parameter  $\Delta P_{o,r}$  was determined from a theoretical analysis (by symmetrical construction we tend to have  $\Delta P_{o,r} = \Delta P_{o,l}$ ). The thermal analysis includes effects of passive heat losses from radiation and conduction (Figure 4) on the mechanical part (ceramic sensor, silver tube, contacts).

We established the differential equations relating temperature in the sensor as a function of the radial coordinate  $x$  (in meters). The equations come from an energy balance on a differential ring element of the sensor. This can be expressed mathematically by

**Table 2** Typical values of the SOVAP radiometer.

Parameter	Right channel – Auto 3	Parameter	Left channel – Auto 2
$\overline{P_{cl,r}} - P_{o,r}$	$\sim 0.1045$ W	$\overline{P_{cl,l}} - P_{o,l}$	$\sim 0.1052$ W
$C_1$	$5.9 \times 10^{-6}$ W	$C_1$	$5.9 \times 10^{-6}$ W
$C_2$	$1.2 \times 10^{-6}$	$C_2$	$1.2 \times 10^{-6}$
$C_3$	$\sim 0.350$ W m <sup>-2</sup>	$C_3$	$\sim 0.360$ W m <sup>-2</sup>
$C_4$	$\sim -0.057$ W m <sup>-2</sup>	$C_4$	$\sim -0.064$ W m <sup>-2</sup>
$C_5$	0.999447805	$C_5$	0.999447805
$C_6$ (at 90-s)	$16.8 \times 10^{-6}$ W	$C_6$ (at 90-s)	$16.8 \times 10^{-6}$ W
$\alpha_{eff,r}$	0.9987	$\alpha_{eff,l}$	0.9987
$A_r$ at 20 °C	$7.875925 \times 10^{-5}$ m <sup>2</sup>	$A_l$ at 20 °C	$7.874565 \times 10^{-5}$ m <sup>2</sup>
$\Delta_r$	$\sim 7.6 \times 10^{-5}$	$\Delta_l$	$\sim 1.1 \times 10^{-4}$
$\Delta'_r$	$\sim 2.3 \times 10^{-4}$	$\Delta'_l$	$\sim 3.2 \times 10^{-4}$
$\Delta''_r$	$\sim 0$	$\Delta''_l$	$\sim 0$
$\cos \theta$	$\sim 1$	$\cos \theta$	$\sim 1$
$\Delta P_{o,r}$	$\sim 0.3 \times 10^{-3}$ W	$\Delta P_{o,l}$	$\sim 0.3 \times 10^{-3}$ W

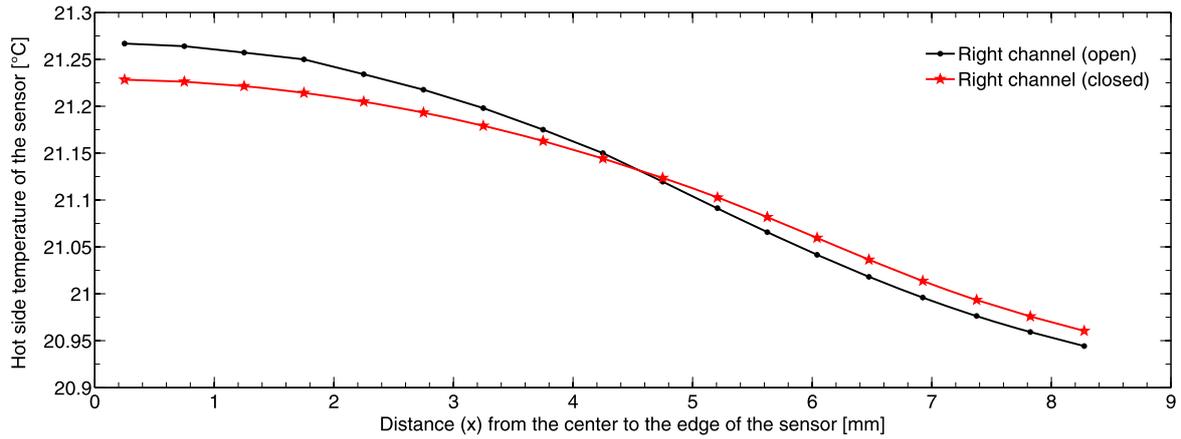
**Figure 4** (Left) Shape of the temperature gradient in the cylindrical cavity (tube). The electrical power is dissipated on a diameter of 12.5 mm of the sensor (closed phase). (Right) Shape of the temperature gradient in the sensor (closed phase).



$$x^2 \frac{\partial^2 T_{o,r}}{\partial x^2} + x \frac{\partial T_{o,r}}{\partial x} + \frac{x^2}{\lambda t} \left( \varepsilon \sigma (T_t^4 - T_{o,r}^4) + \frac{P(SI_r)}{A_r} + \frac{P_{o,r}}{A_{heater}} \right) + \frac{x^2}{\lambda t} (R_p(T_{cold} - T_{o,r}) + R_c(T_t - T_{o,r})) = 0, \quad (6)$$

$$x^2 \frac{\partial^2 T_{cl,r}}{\partial x^2} + x \frac{\partial T_{cl,r}}{\partial x} + \frac{x^2}{\lambda t} \left( \varepsilon \sigma (T_t^4 - T_{cl,r}^4) + \frac{\Delta P_{o,r}}{A_{heater}} + \frac{P_{cl,r}}{A_{heater}} \right) + \frac{x^2}{\lambda t} (R_p(T_{cold} - T_{cl,r}) + R_c(T_t - T_{cl,r})) = 0, \quad (7)$$

where  $T_{o,r}$  is the temperature of the sensor hot plate (SHP) in the open phase (in Kelvin),  $T_{cl,r}$  is the temperature of the SHP in the closed phase,  $T_t$  is the temperature of the tube,  $T_{cold}$  is the temperature of the heat sink (or sensor cold plate),  $\overline{T_{o,r}}$  is the mean temperature of the SHP in the open phase with  $T_{hot,o,r} = \overline{T_{o,r}}$ ,  $\overline{T_{cl,r}}$  is the mean temperature of the SHP in the closed phase with  $T_{hot,cl,r} = \overline{T_{cl,r}}$ ,  $\varepsilon$  is the equivalent emissivity between the SHP and the tube ( $\sim 0.8$ ),  $\sigma$  is the Stefan–Boltzmann constant ( $5.6704 \times 10^{-8}$  W m<sup>-2</sup> K<sup>-4</sup>),  $\lambda$  is the thermal conductivity of the SHP ( $\sim 40$  W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>),  $t$  is the thickness of the SHP (m),  $P(SI_r)$  represents the power consumption that has a solar origin,  $A_r$  is the SHP area illuminated by the Sun,  $A_{heater}$  is the heater area ( $\sim 1.227 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>),  $R_p$  is the thermal coupling between



**Figure 5** Hot-side temperature of the sensor (open and closed phases). These two curves show the non-equivalence of the radiometer in the open and closed phases.

**Table 3** Thermo-electrical analysis:  $V_{cl,r} = V_{o,r}$ .

State	Parameter	Right channel – closed	Right channel – open
Non-equilibrium	$P(SI_r)$	–	0.10681 W
	$P_r$	$P_{cl,r} = 0.10681 \text{ W} + 0.06 \text{ W}$	$P_{o,r} = 0.06 \text{ W}$
	$T_{cold}$	20 °C	20 °C
	$T_{hot}$	21.0789 °C	21.0808 °C
	$V_{cl,r}/V_{o,r}$	$15.631 \times 10^{-3} \text{ V}$	$15.661 \times 10^{-3} \text{ V}$
Equilibrium	$\Delta P_{o,r}$	$0.3 \times 10^{-3} \text{ W}$	–
	$T_{cold}$	20 °C	20 °C
	$T_{hot}$	21.0808 °C	21.0808 °C
	$V_{cl,r}/V_{o,r}$	$15.661 \times 10^{-3} \text{ V}$	$15.661 \times 10^{-3} \text{ V}$

the SHP and the heat sink ( $\sim 200 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ), and  $R_c$  is the thermal coupling between the SHP and the tube ( $\sim 1000 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ).

From the model (when  $\Delta P_{o,r} = 0$ ), we obtained the temperature variations within the sensors (Figure 5). We can see the slight differences related to the state of the radiometer ( $\Delta T_{cl,r} \neq \Delta T_{o,r}$ ). With an equivalent energy balance, the voltage control system must compensate the slight temperature difference between the two cavities (or two states) according to the following equation:

$$V_{cl,r}(\Delta T_{cl,r} = \overline{T_{cl,r}} - T_{cold}) = V_{o,r}(\Delta T_{o,r} = \overline{T_{o,r}} - T_{cold}), \quad (8)$$

where  $\overline{V_{o,r}}$  is the mean voltage of the SHP in the open phase (in V),  $\overline{V_{cl,r}}$  is the mean voltage of the SHP in the closed phase (in V).

If we add a small amount of power ( $\Delta P_{o,r}$ ), we can balance the voltage of both sensors (Table 3). The thermo-electric non-equivalence  $\Delta P_{o,r}$  is about 0.3 mW. This result is achieved with an uncertainty of about 30 % (thickness, thermal conductivity, emissivity, contacts, thermoelectric parameters, and modeling).

**Table 4** Uncertainties of the TSI measurements.

Parameter	Channel			
	Right		Left	
	[ppm]	[W m <sup>-2</sup> ]	[ppm]	[W m <sup>-2</sup> ]
Wire heating effect $C_1$	1.5	0.002	0.8	0.001
Accuracy of the servo-system $C_2$	1.2	0.002	1.2	0.002
Infrared emission of the shutter $C_3$	39	0.053	39	0.053
Infrared emission of the mirror $C_4$	19	0.026	19	0.026
Optical effects $C_5$	110	0.150	110	0.150
Sensor thermal equilibrium error $C_6$ (at 90-s)	162	0.221	214	0.293
Absorption factor $\alpha_{\text{eff,r}}$	190	0.259	190	0.259
Precision aperture $A_r$ at 20 °C	117	0.160	107	0.146
Thermal effects $\Delta_r$	30	0.041	30	0.041
Thermo-mechanical effect $\Delta'_r$	250	0.341	250	0.341
Fixation of the aperture $\Delta''_r$	250	0.341	250	0.341
Thermo-mechanical sliding $\cos \theta$	6	0.008	6	0.008
Thermo-electrical non-equivalence $\Delta P_0$	837	1.143	837	1.143
Thermal radiative effects of the baffle	13	0.018	13	0.018
Electrical chains (general effects)	518	0.707	294	0.401
Electrical chains (transfer of calibration)	124	0.169	121	0.165
Electrical chains (ground parasitic resistance)	201	0.270	20	0.027
Doppler effect	50	0.068	50	0.068
Mean quadratic uncertainty ( $k = 1$ )	1114	1.52	1018	1.39

### 3.3. Absolute-Accuracy Synthesis

The uncertainty for the absolute accuracy is given in Table 4. The TSI uncertainty from SOVAP is smaller than  $\pm 1.52 \text{ W m}^{-2}$  ( $k = 1$ , or one sigma) for the right channel (Auto 3), and  $\pm 1.39 \text{ W m}^{-2}$  ( $k = 1$ ) for the left channel (Auto 2).

### 3.4. Resolution

The resolution is better than  $0.01 \text{ W m}^{-2}$  (for Auto 2 and Auto 3 modes). The *Differential Absolute Radiometer* has been making measurements of the total solar irradiance as part of the *Variability of Irradiance and Gravity Oscillations* (VIRGO) experiment on the *Solar and Heliospheric Observatory* (SOHO). SOVAP-DIARAD has the same heritage as VIRGO-DIARAD (Dewitte, Crommelynck, and Joukoff, 2004). VIRGO-DIARAD has a repeatability of  $0.1 \text{ W m}^{-2}$ , the same as SOVAP-DIARAD (for Auto 2 and Auto 3 modes).

## 4. TSI Absolute Value from SOVAP Nominal Modes

First light for the SOVAP radiometer (Auto 3) was on 22 July 2010. Applying the TSI equation (see Section 3.1) to the SOVAP measurements (Auto 3) provides a TSI value of  $1363.0 \pm 0.08 \text{ W m}^{-2}$  ( $1\sigma$  on the set of measurements), with an uncertainty of  $\pm 1.52 \text{ W m}^{-2}$  ( $k = 1$ ). Applying the TSI equation to the SOVAP measurements (Auto 2), provides a TSI

value of  $1361.2 \pm 0.12 \text{ W m}^{-2}$  ( $1\sigma$  on the set of measurements), with an uncertainty of  $\pm 1.39 \text{ W m}^{-2}$  ( $k = 1$ ). The measurements of SOVAP in summer 2010 yielded a mean TSI value of  $1362.1 \text{ W m}^{-2}$  with an uncertainty of  $\pm 2.4 \text{ W m}^{-2}$  ( $k = 1$ ) for both cavities. From this new approach, we obtained values that are lower than those previously provided with instruments of the same type (Crommelynck, Domingo, and Fröhlich, 1991; Crommelynck *et al.*, 1996; Dewitte, Helizon, and Wilson, 2001; Dewitte, Crommelynck, and Joukoff, 2004; Mekaoui *et al.*, 2010). The SOVAP mean TSI is therefore approximately  $1 \text{ W m}^{-2}$  higher than that of the simultaneously flying radiometers (TIM, PREMOS, and ACRIM 3). The SOVAP TSI (Auto 2 measurements, or left channel) is consistent with the PREMOS result (Schmutz *et al.*, 2013) when using the Total solar irradiance Radiometer Facility (TRF) calibration. Recent characterizations have revealed that the World Radiometric Reference (WRR) (Fröhlich *et al.*, 1995) is  $0.34 \%$  ( $\sim 4.6 \text{ W m}^{-2}$ ) higher than the SI scale (Fehlmann *et al.*, 2012). Before its flight, PREMOS was also compared with the TRF at the Laboratory for Atmospheric and Space Physics (LASP). Using the TRF calibration, PREMOS gives a TSI absolute value of about  $1360.9 \text{ W m}^{-2}$  (Schmutz *et al.*, 2013). ACRIM 3 data (<http://acrim.com/>) were further reevaluated after TRF comparisons. The new TSI value from ACRIM 3 is now within the uncertainties of TIM measurements. This made it interesting to perform a new SOVAP calibration. In particular, a better quantification of the inherent uncertainties associated with thermo-electrical non-equivalence of the cavities was investigated. The stray-light contribution is only a minor parameter for the SOVAP TSI determination. Indeed, multiple contributions such as the bias due to launch, vacuum, outgassing, contamination, radiations, as well as thermo-mechanical and thermo-electrical behavior can be better estimated.

## 5. SOVAP TSI Time Series

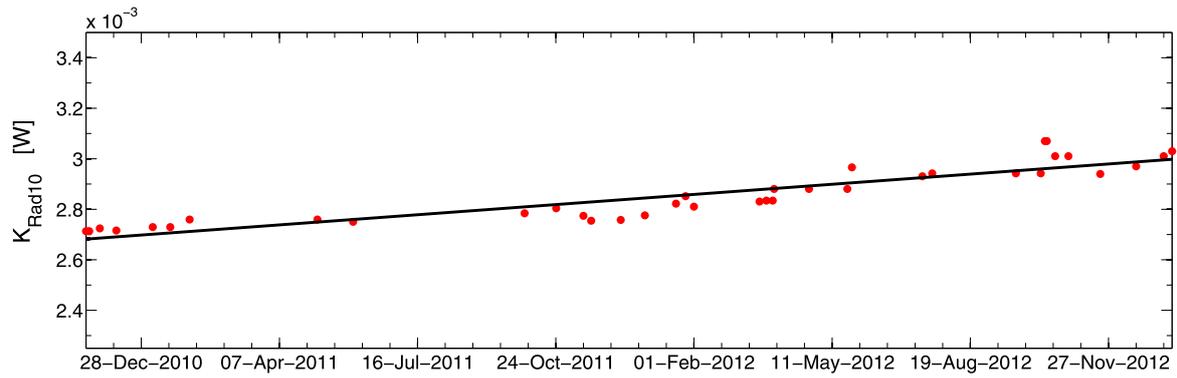
Owing to a failure of its mechanism, the right shutter of SOVAP has remained permanently open since November 2010. The instrument was therefore set to a new mode of functioning and a new instrument equation was required to accommodate this situation. In this new mode (Rad 10), the radiometer is no longer differential (see Equations (2) and (3)) and both channels have been used to determine the TSI. During the Rad 10 mode, the right shutter is open and the left shutter is closed.  $SI$  is derived from measuring the difference between the electrical power supplied to the closed cavity and the electrical power supplied to the open cavity according to

$$SI_r = C_5 \frac{((P_{cl,l} - P_{o,r}) - \Delta P_{o,r} - K_{\text{Rad}10} + C_1)(1 - C_2)}{\alpha_{\text{eff},r} A_r (1 + \Delta_r + \Delta'_r + \Delta''_r) \cos \theta} + C_3 + C_4, \quad (9)$$

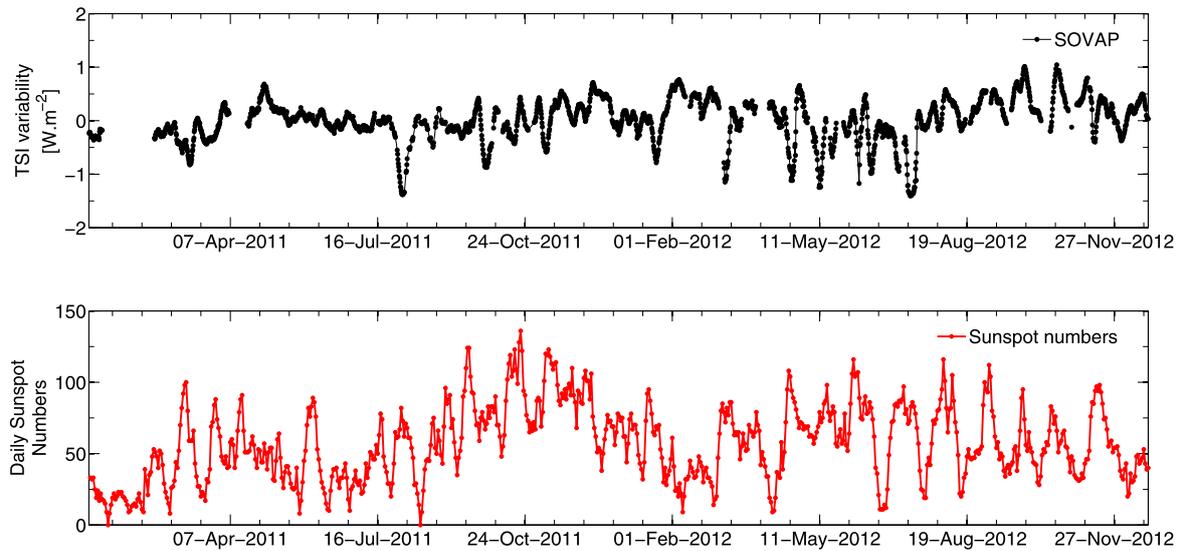
where  $SI_r$  is the solar irradiance for the right cavity of the radiometer, and  $K_{\text{Rad}10}$  is the thermo-electrical non-equivalence between the right and the left cavities of the radiometer (obtained during space calibration).

$K_{\text{Rad}10}$  parameter changes over time (Figure 6). It highlights the difference between the two calibration channels (ground calibration).

Applying the TSI equation (9) to SOVAP measurements provides a TSI value of  $1362.9 \pm 0.39 \text{ W m}^{-2}$  ( $1\sigma$  on the set of Rad 10 measurements during two years) and a range of  $2.4 \text{ W m}^{-2}$ . The uncertainty of these measurements depends on several parameters (see Table 4). The uncertainty in the determination of the parameter  $K_{\text{Rad}10}$  is estimated at  $\pm 0.6 \text{ W m}^{-2}$  (Figure 6). For the Rad 10 mode, the mean quadratic uncertainty ( $k = 1$ ) is equal to  $\pm 1.63 \text{ W m}^{-2}$ . The SOVAP TSI variability time-series starting in December 2010



**Figure 6** Evolution of the parameter  $K_{\text{Rad}10}$  over time.



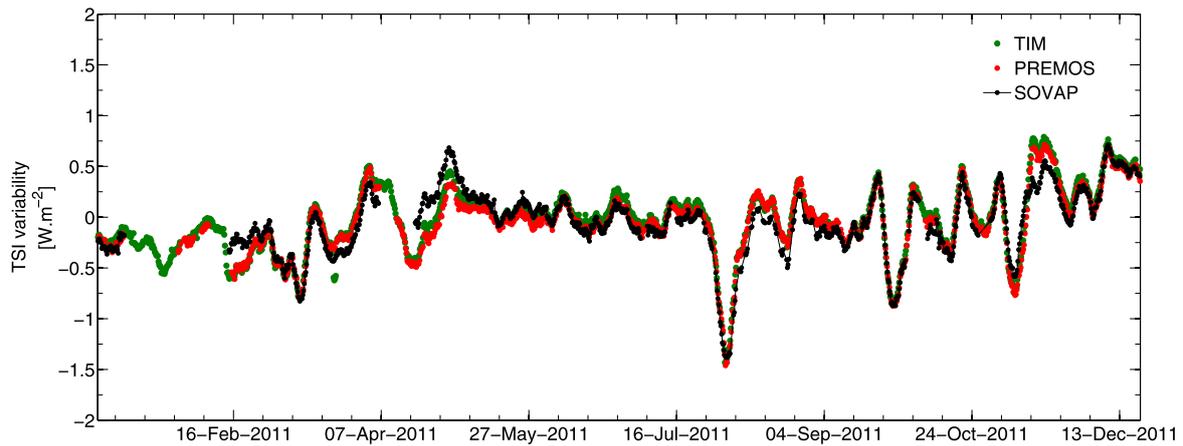
**Figure 7** (Top) SOVAP TSI (Rad 10 mode) from December 2010. (Bottom) Daily mean sunspot number (<http://sidc.oma.be/sunspot-data/>) for the same period. Data provided by the Solar Influences Data analysis Center.

is shown in Figure 7. The holes in the data correspond to periods during which SOVAP was switched off. The first switch-off was due to a spacecraft anomaly (in January 2011). This series of measurements stopped at the beginning of 2013.

The instruments currently in space yield a TSI variation that is substantially identical (Figure 8). The SOVAP radiometer operating in a degraded mode also provides the TSI variation; it shows the robustness of the RMIB design.

## 6. Conclusion

To determine the TSI from SOVAP we established a new instrumental equation. A new parameter was integrated from a theoretical analysis that highlighted the thermo-electrical non-equivalence of the radiometric cavity. From this new approach, we obtained values that are lower than those previously provided with the same type of instruments. The SOVAP right channel yields a TSI value of  $1363.0 \text{ W m}^{-2}$  (summer 2010) with an uncertainty of  $\pm 1.52 \text{ W m}^{-2}$  ( $k = 1$ ). The SOVAP left channel measured a TSI value of  $1361.2 \text{ W m}^{-2}$  (summer 2010) with an uncertainty of  $\pm 1.39 \text{ W m}^{-2}$  ( $k = 1$ ). This latter measurement is



**Figure 8** Total solar irradiance variability time-series (average over six hours) for three space radiometers: TIM (<http://lasp.colorado.edu/home/sorce/data/tsi-data/>), PREMOS (Schmutz *et al.*, 2013), and SOVAP.

consistent with the PREMOS result (using the total solar irradiance radiometer facility calibration). Based on SOVAP data, we obtained that the TSI input at the top of the Earth's atmosphere at a distance of 1 AU from the Sun is  $1362.1 \text{ W m}^{-2}$  (from the mean value of the left and right channels) with an uncertainty of  $\pm 2.4 \text{ W m}^{-2}$  ( $k = 1$ ). We based the thermo-electrical non-equivalence  $\Delta P_o$  of the radiometer on a theoretical model. Accurate estimates of the non-equivalence of the effects of the radiative and electrical heating can be obtained using the pre-flight characterizations. Owing to a failure of its mechanism, the right shutter of SOVAP has remained permanently open since November 2010 up to the beginning of 2013. The instrument was therefore set to a new mode of functioning. From this non-differential mode operation, we were able to give the TSI variations. The SOVAP right channel (in non-differential mode) yields a mean TSI value of  $1362.9 \text{ W m}^{-2}$  with an uncertainty of  $\pm 1.63 \text{ W m}^{-2}$ , and continuing the solar data record (from the end of 2010 to the beginning of 2013). During this period, the instruments in space (TIM, PREMOS, and ACRIM 3) yielded a TSI variation that is substantially identical.

**Acknowledgements** *Picard* is a mission supported by the Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), the CNRS/INSU, the Belgian Space Policy (BELSPO), the Swiss Space Office (SSO), and the European Space Agency (ESA). The following institutes are acknowledged for providing the data: Solar Influences Data Center (Belgium), the Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos (Switzerland), and the Laboratory for Atmospheric and Space Physics (United States). We thank RMIB, and CNRS for their support, as well as all participants providing their expertise to this study (Sami Bali, Pierre Malcorps, and Joël Pierard). We wish to express our gratitude to Dominique Crommelynck (RMIB), who designed and developed the DIARAD-type radiometers. The authors thank the referee for the constructive remarks and suggestions.

## References

- Abbot, C.G., Aldrich, L.B., Hoover, W.H.: 1942, Discussion of solar-constant values accuracy. *Ann. Astrophys. Obs. Smithson. Inst.* **6**, 163–197.
- Abbot, C.G., Fowle, F.E., Aldrich, L.B.: 1923, *Ann. Astrophys. Obs. Smithson. Inst.* **4**, 217–257.
- BenMoussa, A., Gissot, S., Schühle, U., Del Zanna, G., Auchère, F., Mekaoui, S., Jones, A.R., Walton, D., Eyles, C.J., Thuillier, G., Seaton, D., Dammasch, I.E., Cessateur, G., Meftah, M., Andretta, V., Berghmans, D., Bewsher, D., Bolsée, D., Bradley, L., Brown, D.S., Chamberlin, P.C., Dewitte, S., Didkovsky, L.V., Dominique, M., Eparvier, F.G., Foujols, T., Gillotay, D., Giordanengo, B., Halain, J.P., Hock, R.A., Irbah, A., Jeppesen, C., Judge, D.L., Kretschmar, M., McMullin, D.R., Nicula, B., Schmutz, W., Ucker, G., Wieman, S., Woodraska, D., Woods, T.N.: 2013, On-orbit degradation of solar instruments. *Solar Phys.* doi:[10.1007/s11207-013-0290-z](https://doi.org/10.1007/s11207-013-0290-z).

- Cebula, R.P., Deland, M.T.: 1998, Comparisons of the NOAA-11 SBUV/2, UARS SOLSTICE, and UARS SUSIM MG II solar activity proxy indexes. *Solar Phys.* **177**, 117–132.
- Conscience, C., Meftah, M., Chevalier, A., Dewitte, S., Crommelynck, D.: 2011, The space instrument SO-VAP of the PICARD mission. In: *Proc. SPIE* **8146**. doi:[10.1117/12.895447](https://doi.org/10.1117/12.895447).
- Crommelynck, D., Domingo, V.: 1984, Solar irradiance observations. *Science* **225**, 180–181. doi:[10.1126/science.225.4658.180](https://doi.org/10.1126/science.225.4658.180).
- Crommelynck, D., Domingo, V., Fröhlich, C.: 1991, The solar variations (SOVA) experiment in the EURECA space platform. *Adv. Space Res.* **11**, 83–87. doi:[10.1016/0273-1177\(91\)90442-M](https://doi.org/10.1016/0273-1177(91)90442-M).
- Crommelynck, D., Fichot, A., Domingo, V., Lee, R. III: 1996, SOLCON solar constant observations from the ATLAS missions. *Geophys. Res. Lett.* **23**, 2293–2295. doi:[10.1029/96GL01878](https://doi.org/10.1029/96GL01878).
- Deland, M.T., Cebula, R.P.: 2012, Solar UV variations during the decline of Cycle 23. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **77**, 225–234. doi:[10.1016/j.jastp.2012.01.007](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.01.007).
- Dewitte, S., Crommelynck, D., Joukoff, A.: 2004, Total solar irradiance observations from DIARAD/VIRGO. *J. Geophys. Res.* **109**, 2102. doi:[10.1029/2002JA009694](https://doi.org/10.1029/2002JA009694).
- Dewitte, S., Helizon, R., Wilson, R.S.: 2001, Contribution of the solar constant (SOLCON) program to the long-term total solar irradiance observations. *J. Geophys. Res.* **106**, 15759–15766. doi:[10.1029/2000JA900160](https://doi.org/10.1029/2000JA900160).
- Domingo, V., Ermolli, I., Fox, P., Fröhlich, C., Haberleiter, M., Krivova, N., Kopp, G., Schmutz, W., Solanki, S.K., Spruit, H.C., Unruh, Y., Vögler, A.: 2009, Solar surface magnetism and irradiance on time scales from days to the 11-year cycle. *Space Sci. Rev.* **145**, 337–380. doi:[10.1007/s11214-009-9562-1](https://doi.org/10.1007/s11214-009-9562-1).
- Ermolli, I., Matthes, K., Dudok de Wit, T., Krivova, N.A., Tourpali, K., Weber, M., Unruh, Y.C., Gray, L., Langematz, U., Pilewskie, P., Rozanov, E., Schmutz, W., Shapiro, A., Solanki, S.K., Thuillier, G., Woods, T.N.: 2012, Recent variability of the solar spectral irradiance and its impact on climate modelling. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* **12**, 24557–24642. doi:[10.5194/acpd-12-24557-2012](https://doi.org/10.5194/acpd-12-24557-2012).
- Fehlmann, A., Kopp, G., Schmutz, W., Winkler, R., Finsterle, W., Fox, N.: 2012, Fourth world radiometric reference to SI radiometric scale comparison and implications for on-orbit measurements of the total solar irradiance. *Metrologia* **49**, 34. doi:[10.1088/0026-1394/49/2/S34](https://doi.org/10.1088/0026-1394/49/2/S34).
- Foster, S.S.: 2004, Reconstruction of solar irradiance variations, for use in studies of global climate change: application of recent SoHO observations with historic data from the Greenwich observations. PhD thesis, England: University of Southampton (United Kingdom), Publication Number: AAT C820450. DAI-C 66/02.
- Foukal, P.: 2012, A new look at solar irradiance variation. *Solar Phys.* **279**, 365–381. doi:[10.1007/s11207-012-0017-6](https://doi.org/10.1007/s11207-012-0017-6).
- Foukal, P., Fröhlich, C., Spruit, H., Wigley, T.M.L.: 2006, Variations in solar luminosity and their effect on the Earth's climate. *Nature* **443**, 161–166. doi:[10.1038/nature05072](https://doi.org/10.1038/nature05072).
- Fröhlich, C., Lean, J.: 1998, The Sun's total irradiance: cycles, trends and related climate change uncertainties since 1976. *Geophys. Res. Lett.* **25**, 4377–4380. doi:[10.1029/1998GL900157](https://doi.org/10.1029/1998GL900157).
- Fröhlich, C., Philipona, R., Romero, J., Wehrli, C.: 1995, Radiometry at the Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos and World Radiation Centre. *Opt. Eng.* **34**, 2757–2766. doi:[10.1117/12.205682](https://doi.org/10.1117/12.205682).
- Fröhlich, C., Crommelynck, D.A., Wehrli, C., Anklin, M., Dewitte, S., Fichot, A., Finsterle, W., Jiménez, A., Chevalier, A., Roth, H.: 1997, In-flight performance of the Virgo solar irradiance instruments on SOHO. *Solar Phys.* **175**, 267–286. doi:[10.1023/A:1004929108864](https://doi.org/10.1023/A:1004929108864).
- Hickey, J.R., Stowe, L.L., Jacobowitz, H., Pellegrino, P., Maschhoff, R.H., House, F., Vonder Haar, T.H.: 1980, Initial solar irradiance determinations from Nimbus 7 cavity radiometer measurements. *Science* **208**, 281–283. doi:[10.1126/science.208.4441.281](https://doi.org/10.1126/science.208.4441.281).
- Hickey, J.R., Alton, B.M., Kyle, H.L., Hoyt, D.: 1988, Total solar irradiance measurements by ERB/Nimbus-7 – a review of nine years. *Space Sci. Rev.* **48**, 321–342. doi:[10.1007/BF00226011](https://doi.org/10.1007/BF00226011).
- Kopp, G., Lawrence, G., Rottman, G.: 2004, Total irradiance monitor design and on-orbit functionality. In: Fineschi, S., Gummin, M.A. (eds.) *Proc. SPIE* **5171**, 14–25. doi:[10.1117/12.505235](https://doi.org/10.1117/12.505235).
- Kopp, G., Lean, J.L.: 2011, A new, lower value of total solar irradiance: evidence and climate significance. *Geophys. Res. Lett.* **38**, 1706. doi:[10.1029/2010GL045777](https://doi.org/10.1029/2010GL045777).
- Lean, J.: 2000, Evolution of the Sun's spectral irradiance since the Maunder minimum. *Geophys. Res. Lett.* **27**, 2425–2428. doi:[10.1029/2000GL000043](https://doi.org/10.1029/2000GL000043).
- Lockwood, M., Stamper, R.: 1999, Long-term drift of the coronal source magnetic flux and the total solar irradiance. *Geophys. Res. Lett.* **26**, 2461–2464. doi:[10.1029/1999GL900485](https://doi.org/10.1029/1999GL900485).
- Mekaoui, S., Dewitte, S., Conscience, C., Chevalier, A.: 2010, Total solar irradiance absolute level from DIARAD/SOVIM on the international space station. *Adv. Space Res.* **45**, 1393–1406. doi:[10.1016/j.asr.2010.02.014](https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.02.014).
- Pouillet, C.S.M.: 1838, *Mémoire sur la chaleur solaire*, Bachelier, Paris.

- Roth, R., Joos, F.: 2013, A reconstruction of radiocarbon production and total solar irradiance from the Holocene  $^{14}\text{C}$  and  $\text{CO}_2$  records: implications of data and model uncertainties. *Clim. Past* **9**, 1879–1909. doi:[10.5194/cp-9-1879-2013](https://doi.org/10.5194/cp-9-1879-2013).
- Schmutz, W., Fehlmann, A., Hülsen, G., Meindl, P., Winkler, R., Thuillier, G., Blattner, P., Buisson, F., Egorova, T., Finsterle, W., Fox, N., Gröbner, J., Hochedez, J.-F., Koller, S., Meftah, M., Meissonnier, M., Nyeki, S., Pfiffner, D., Roth, H., Rozanov, E., Spescha, M., Wehrli, C., Werner, L., Wyss, J.U.: 2009, The PREMOS/PICARD instrument calibration. *Metrologia* **46**, 202. doi:[10.1088/0026-1394/46/4/S13](https://doi.org/10.1088/0026-1394/46/4/S13).
- Schmutz, W., Fehlmann, A., Finsterle, W., Kopp, G., Thuillier, G.: 2013, Total solar irradiance measurements with PREMOS/PICARD. *AIP Conf. Proc.* **1531**(1), 624–627. doi:[10.1063/1.4804847](https://doi.org/10.1063/1.4804847). <http://link.aip.org/link/?APC/1531/624/1>.
- Solanki, S.K., Usoskin, I.G., Kromer, B., Schüssler, M., Beer, J.: 2004, Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years. *Nature* **431**, 1084–1087. doi:[10.1038/nature02995](https://doi.org/10.1038/nature02995).
- Steinhilber, F., Beer, J., Fröhlich, C.: 2009, Total solar irradiance during the Holocene. *Geophys. Res. Lett.* **36**, 19704. doi:[10.1029/2009GL040142](https://doi.org/10.1029/2009GL040142).
- Vieira, L.E.A., Solanki, S.K., Krivova, N.A., Usoskin, I.: 2011, Evolution of the solar irradiance during the Holocene. *Astron. Astrophys.* **531**, A6. doi:[10.1051/0004-6361/201015843](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201015843).
- Wang, Y.-M., Lean, J.L., Sheeley, N.R. Jr.: 2005, Modeling the Sun's magnetic field and irradiance since 1713. *Astrophys. J.* **625**, 522–538. doi:[10.1086/429689](https://doi.org/10.1086/429689).
- Wenzler, T., Solanki, S.K., Krivova, N.A., Fröhlich, C.: 2006, Reconstruction of solar irradiance variations in cycles 21–23 based on surface magnetic fields. *Astron. Astrophys.* **460**, 583–595. doi:[10.1051/0004-6361:20065752](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20065752).
- Willson, R.C., Hudson, H.S.: 1991, The Sun's luminosity over a complete solar cycle. *Nature* **351**, 42–44. doi:[10.1038/351042a0](https://doi.org/10.1038/351042a0).
- Willson, R.C., Gulkis, S., Janssen, M., Hudson, H.S., Chapman, G.A.: 1981, Observations of solar irradiance variability. *Science* **211**, 700–702. doi:[10.1126/science.211.4483.700](https://doi.org/10.1126/science.211.4483.700).

# Total solar irradiance as measured by the SOVAP radiometer onboard PICARD

Mustapha Meftah<sup>1,\*</sup>, André Chevalier<sup>2</sup>, Christian Conscience<sup>2</sup>, and Stijn Nevens<sup>2</sup>

<sup>1</sup> University of Paris-Saclay, University of Paris VI, CNRS, LATMOS, 11 Boulevard d'Alembert, 78280 Guyancourt, France

\*Corresponding author: Mustapha.Meftah@latmos.ipsl.fr

<sup>2</sup> Royal Meteorological Institute of Belgium, 3 Avenue Circulaire, 1180 Uccle, Belgique

Received 27 January 2016 / Accepted 15 August 2016

## ABSTRACT

From the SOLAR VARIability PICARD (SOVAP) space-based radiometer, we obtained a new time series of the total solar irradiance (TSI) during Solar Cycle 24. Based on SOVAP data, we obtained that the TSI input at the top of the Earth's atmosphere at a distance of one astronomical unit from the Sun is  $1361.8 \pm 2.4 \text{ W m}^{-2}$  ( $1\sigma$ ) representative of the 2008 solar minimum period. From 2010 to 2014, the amplitude of the changes has been of the order of  $\pm 0.1\%$ , corresponding to a range of about  $2.7 \text{ W m}^{-2}$ . To determine the TSI from SOVAP, we present here an improved instrument equation. A parameter was integrated from a theoretical analysis that highlighted the thermo-electrical non-equivalence of the radiometric cavity. From this approach, we obtained values that are lower than those previously provided with the same type of instrument. The results in this paper supersede the previous SOVAP analysis and provide the best SOVAP-based TSI-value estimate and its temporal variation.

**Key words.** Sun – Total Irradiance – Solar activity – Solar Cycle – Spacecraft

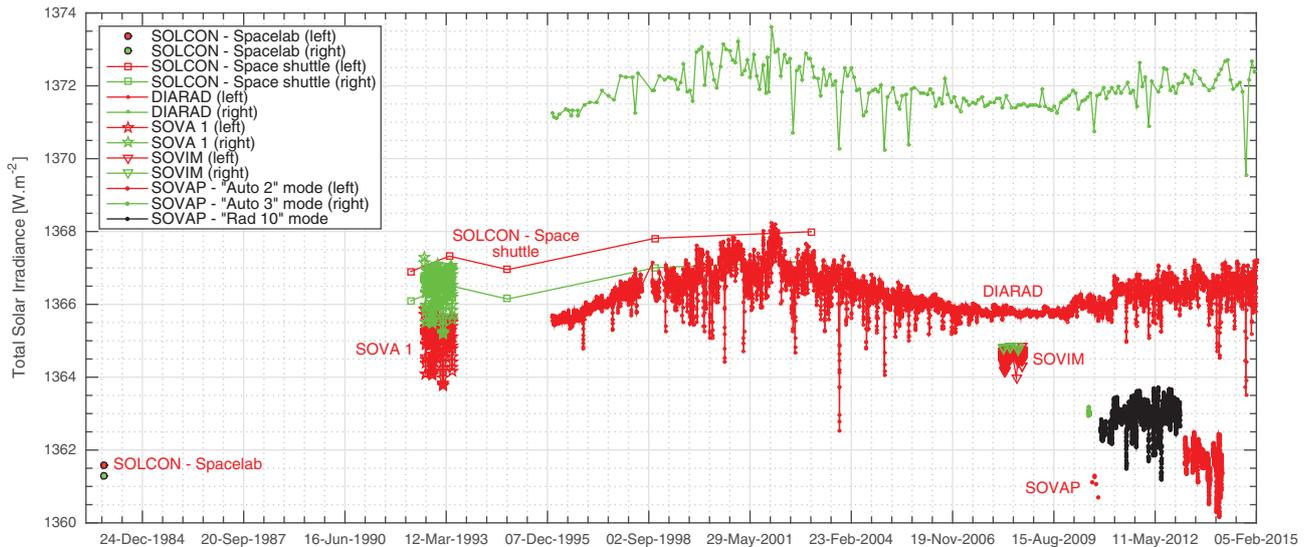
## 1. Introduction

Solar activity (i.e. total solar irradiance (TSI), solar magnetic field, ultraviolet radiation, etc.) is an important contributor to natural climate variability. Thus, the long-term monitoring of the Essential Climate Variable (ECV) TSI is important in order to understand the change of climate with time. Since 1978, the absolute value of the TSI and its temporal variation have been measured from space. Prior to the launch of the SOLAR Radiation and Climate Experiment (SORCE) spacecraft in January 2003, the consensus absolute value of the TSI was close to  $1365.4 \text{ W m}^{-2}$ . The Total Irradiance Monitor (TIM) instrument onboard SORCE measured deviating values around  $1361 \text{ W m}^{-2}$  (Kopp & Lean 2011). This result was independently obtained by the PREcision MONitor Sensor (PREMOS) instrument onboard PICARD (Schmutz et al. 2013). Before its launch, PREMOS had been calibrated relative to the cryogenic Total solar irradiance Radiometer Facility (TRF) of the Laboratory for Atmospheric and Space Physics (LASP). PREMOS was also calibrated against the World Radiometric Reference (WRR) to get a consistent picture. The measurements of the SOLAR VARIability PICARD (SOVAP) space-based radiometer yielded a TSI value quite close to TIM and PREMOS results (Meftah et al. 2014). To obtain this value, the instrument equation was updated accounting for the thermo-electrical non-equivalence of the SOVAP radiometric cavity. Moreover, the 35-year Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor (ACRIM) TSI satellite composite time series has been revised (Willson 2014) using algorithm updates and corrections to ACRIMSAT/ACRIM3 results for scattering and diffraction derived from testing with the TRF. Thus, ACRIM3 has lowered its space TSI value after the comparison of an ACRIM engineering model with the cryogenic TRF. Finally, the Variability of Irradiance and

Gravity Oscillations (VIRGO) experiment (Fröhlich et al. 1995) onboard the Solar and Heliospheric Observatory (SoHO) provided a new absolute value of the TSI (new scale) that is 0.42% lower than the original scale ( $\sim 1365.4 \text{ W m}^{-2}$ ). The VIRGO results (VIRGO new scale, VIRGO-PMO6 V and VIRGO-DIARAD) are available at <ftp://ftp.pmodwrc.ch/pub/data/irradiance/virgo/TSI/>.

Space observations with these experiments are consistent with a mean TSI value of  $1361 \pm 1 \text{ W m}^{-2}$  ( $2\sigma$ ), which is a representative absolute value of the 2008 solar minimum period. Despite the advent of the space era, the question addressing the absolute TSI determination remains open. Indeed, the debate about absolute TSI determination remains in a large way limited to the determination of realistic uncertainties. In 2005, it was suggested (Butler et al. 2008) that every TSI team should critically investigate its own instrument, and that on-ground comparisons between radiometers in power and in irradiance modes should be made. The latter recommendation has led different teams to take their radiometers to the LASP/TRF facility, in which a radiometer under test can be compared in vacuum for power and irradiance measurement with a reference cryogenic radiometer. We point out that the SOVAP instrument (Conscience et al. 2011) was not calibrated at the TRF facility.

In this paper, we report on the TSI measurements of SOVAP, which were carried out during the PICARD mission from July 2010 to March 2014. We provide our best estimate of the absolute value of the TSI as seen by SOVAP. We correct the determination of the SOVAP thermo-electrical non-equivalence between the right and the left cavity during deep space measurements. Finally, we provide a SOVAP TSI composite that includes all measurement modes normalised to the mean TSI of the nominal modes.



**Fig. 1.** TSI published time series for the left and right channels of the main space-based TSI radiometers developed by the RMIB: the SOLar CONstant instrument (SOLCON) on Spacelab and onboard the space shuttle, the Solar Variations (SOVA 1) experiment onboard European Retrievable Carrier (EURECA), VIRGO-DIARAD onboard SoHO, the Sun Monitoring on the External Payload Facility of Columbus-Solar Variable and Irradiance Monitor (Solar-SOVIM). New TSI time series of SOVAP onboard PICARD are displayed for the different modes with the correction for non-equivalence included.

## 2. TSI observations by RMIB since 1983

The Royal Meteorological Institute of Belgium (RMIB) has in its 33-year space history, since Spacelab in November 1983, launched six different TSI instruments of the Differential Absolute RADiometer (DIARAD) type on 11 space flights. Figure 1 displays the long-term TSI time series of the main space-based TSI radiometers developed by RMIB. Only the SOVAP TSI data were corrected for the thermo-electrical non-equivalence of the cavity (Meftah et al. 2014).

The DIARAD instrument consists of two electrical substitution radiometers driven by a servo-system. The radiometers are symmetrical cylindrical cavities, mounted side by side on a common heat sink. Both cavities see the same thermal environment through accurately known circular precision apertures (Conscience et al. 2011). Part of the light reflected from the precision aperture illuminates the baffle and, especially in vacuum, heats it. Both effects increase the measured signal as scattered light and infrared radiation from the baffle enter the cavities. For all of the classical radiometers, this effect has been extensively studied at the TRF facility, where corrections for PREMOS and ACRIM3 were determined. This effect is negligible in the DIARAD type radiometers due to the ingenious construction of the primary aperture as a spherical mirror which focuses this undesired incoming light into the centre of the front-most view-limiting aperture and out of the instrument. On the other hand, the DIARAD design has a fundamental limitation due to a distributed thermal impedance on the surface of the sensor and an electrical heater which covers a larger area than the solar beam. This effect is present in all RMIB radiometers, and a specific correction for each radiometer is needed to correct formerly obtained results.

In 1983, a cavity-type absolute radiometer was flown on Spacelab where a TSI value of  $1361.5 \pm 2.3 \text{ W m}^{-2}$  (at one standard deviation ( $1\sigma$ )) was obtained (Crommelynck et al. 1987), which is atypical compared to other RMIB results.

The Spacelab radiometer has a different thermo-electric sensor, which in hindsight may explain why it measured a much more accurate value of the TSI. The thermal conductivity of the faces of this instrument's sensors is different from most RMIB radiometers, while the size of the heater elements is the same. The thermo-mechanical properties of the Spacelab cavity cylinders and their interfaces to the sensor are also different. These results may explain the difference of this radiometer relative to the others mentioned in Crommelynck et al. (1987). This needs further investigation.

One of the RMIB radiometers, VIRGO-DIARAD (Dewitte et al. 2004), acquired TSI measurements as part of the VIRGO experiment (Fröhlich et al. 1995, 1997) onboard SoHO from 1996 until the present, which represents one of the longest TSI-measurement time series. As a reminder, the DIARAD radiometer is part of VIRGO together with two PMO6V-type radiometers as discussed in Section 1. Having two radiometers of different designs may help to understand the behaviour of the radiometers in space and hence provide a more reliable estimate of TSI from a combination of the results from both. This combination is called VIRGO TSI (new scale, version 6).

Our understanding of the long-term behaviour of space-based TSI radiometers has increased substantially. The RMIB uses the measurements of DIARAD as a stand-alone instrument, which could be problematic because this type of radiometer could show a non-exposure-dependent sensitivity change. This effect cannot be corrected internally by comparing with a less exposed radiometer. Indeed, it is important to characterise the long-term behaviour especially for the 20-year record of VIRGO. For long-term characterisations of SOVAP, in this paper we use the RMIB VIRGO-DIARAD TSI values to compare these two radiometers based on the same technology and methods. The new scale of VIRGO values, which are based on both instruments (VIRGO-PMO6V and VIRGO-DIARAD), are consistent within uncertainties with the SOVAP absolute value of the TSI.

**Table 1.** SOVAP radiometer parameters' definition and typical values for the “Rad 10” mode.

Parameters	Definition	Typical values
$P_{cl,l} - P_{o,r}$	Difference in electrical power applied to the cavities	$\sim 0.1056$ W
$C_1$	Correction to take into account the heating effects by the wires	$5.9 \times 10^{-6}$ W
$C_2$	Correction for the accuracy of the servo-system (almost negligible)	$1.2 \times 10^{-6}$
$C_3$	Correction of the thermal radiative effects of the left shutter	$\sim 0.405$ W m <sup>-2</sup>
$C_4$	Correction of the thermal radiative effects of the mirror above the cavity	$\sim -0.175$ W m <sup>-2</sup>
$C_5$	Total correction factor for the optical effects (diffraction and scattering)	0.999447805
$\alpha_{\text{eff},r}$	Efficiency of the right cavity	0.9987
$A_r$ at 20 °C	Measured accurate aperture area at 20 °C	$7.876 \times 10^{-5}$ m <sup>2</sup>
$\Delta_r$	Aperture area (AA) correction factor – expansion of the mirror	$\sim 1.9 \times 10^{-8}$
$\Delta'_r$	AA correction factor – expansion of the radiometer	$\sim 5.4 \times 10^{-8}$
$\Delta''_r$	AA correction factor – deformation during mechanical clamping	$\sim 0$
$\cos \theta$	Solar pointing angle of the radiometer	$\sim 1$
$\Delta P_{o,r}$	Thermo-electrical non-equivalence of the active cavity while open	$\sim 0.3 \times 10^{-3}$ W
$K_{\text{Rad10}}$	Thermo-electrical non-equivalence between the right and the left cavity	$\sim 2.83 \times 10^{-3}$ W

### 3. SOVAP operations summary

DIARAD is an electrically calibrated cavity radiometer, based on a differential heat-flux meter. The main advantage is that both cavities can be used for solar measurements and their arrangement views the same thermal environment. In the nominal operation modes, the radiometric equation for each cavity (left or right) is given in Eq. (2) with all the details described by Meftah et al. (2014). The modes are called “Auto 2” and “Auto 3” for left and right operations, respectively. For each mode, the sampling period is three minutes (a sequence of 90 s open and 90 s closed) and provides an instrument demonstrated repeatability around  $0.1$  W m<sup>-2</sup>. The “Auto 2” mode was intended to track on-orbit degradation of the primary right cavity (“Auto 3” mode) via infrequent exposure of the left cavity (roughly every month). The left channel provided a TSI measurement with the lowest absolute uncertainty ( $\pm 1.39$  W m<sup>-2</sup>) as shown by Meftah et al. (2014).

The “Auto 3” mode was used intermittently from July 22, 2010 until August 28, 2010. Few measurements were achieved with the SOVAP-DIARAD right channel (“Auto 3” mode). The “Auto 2” mode was used to measure the TSI absolute level as well as the TSI variability for half an hour every month from August 28, 2010 to October 27, 2010.

Early on in the mission, the “Auto 3” mode was abandoned due to a failure of the right shutter mechanism that left the cavity permanently open. A change in the operation was needed where an alternative mode was used. During this new “Rad 10” mode, the right shutter is permanently open and the left shutter is kept closed. This mode was used starting with the first occultation period on the 18th of November 2010 (after an update of the flight software). Thus, the SOVAP right shutter was permanently open and the left shutter was kept closed from November 2010 until January 2013. The main difference in the radiometric Eq. (3) of the “Rad 10” mode is that the power fed to the left cavity in closed state ( $P_{cl,l}$ ) is not representative for the right channel and a correction called  $K_{\text{Rad10}}$  has to be introduced. Moreover, the shutter correction has to be changed to only take into account the emission of the cavity to deep space instead of the difference of this to the shutter emission in the closed position. This shutter correction now is only dependent on the temperature of the cavity which is known. Furthermore, we need to calibrate  $K_{\text{Rad10}}$  and this is done by measuring deep space in “Rad 10” mode which is then the only unknown in the equation. The “Rad 10” mode had the advantage of increasing the measurement time resolution. In fact, SOVAP measurements

were organised in packets of 90 s, containing several frames of 10 s measurements each. TSI acquisition was made at seconds 20, 40, 70, 80 and 90. In the “Rad 10” mode measurements, the active cavity is always in thermo-electrical equilibrium. Therefore, all TSI measurements at seconds 20, 40, 70, 80 and 90 can be used and no  $C_6$  correction (dynamic non-equivalence between electrical and radiative response) is needed as shown in Eq. (3). In DIARAD design, the sensors are in the feed-back loop, but the cylindrical parts of the cavities aren't. We determine the  $C_6$  parameter in flight by comparison of the response of the normal sampling time of 3 min (90 s open and 90 s closed) with a doubled sampling time of 6 min (180 s open and 180 s closed) to ensure the system reaches thermal equilibrium.

In early 2013, it was decided that the PICARD space mission would end at the beginning of March 2014. Thus, it was no longer necessary to protect the integrity of the left cavity for ageing determination. Normally, the degradation is tracked with the cavity that is less exposed to solar radiation in order to minimise the degradation due to solar UV radiation. We tried and succeeded to close the right shutter and then turn on the “Auto 2” mode and it was then used from February 2013 until March 2014. This operating mode was intensively used after several months in space.

### 4. SOVAP TSI equation and measurement uncertainty

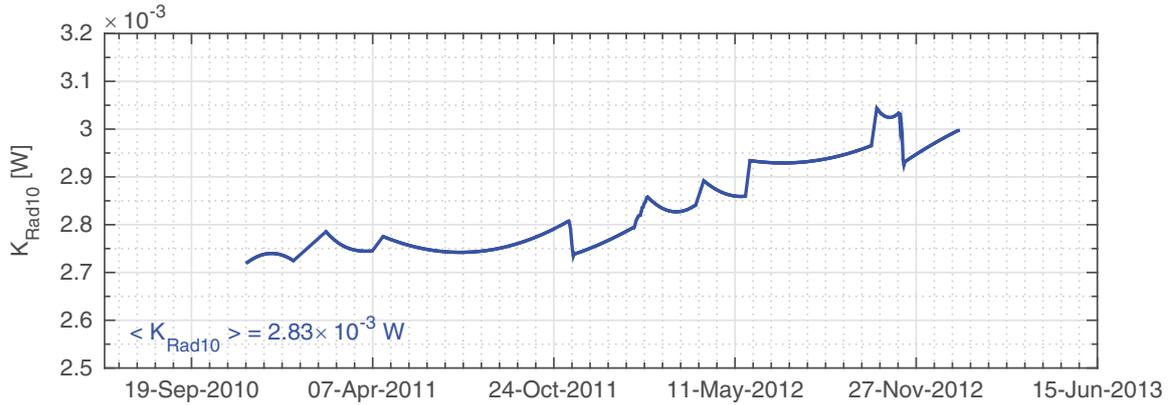
TSI is defined as the power of the incoming solar electromagnetic radiation per unit area at one astronomical unit (1 au). The SOVAP TSI Eq. (1) follows this convention

$$\text{TSI}_{(i=r,l)} = \text{SI}_{(i)} \times \frac{z^2}{(1 \text{ au})^2 \times \left(1 - \frac{\partial z}{\partial t} \times \frac{1}{c}\right)^2}, \quad (1)$$

where  $\text{TSI}_{(i=r,l)}$  is the total solar irradiance (W m<sup>-2</sup>) of the right cavity ( $r$ ) or the left cavity ( $l$ ) at 1 au.  $\text{SI}_{(i)}$  is the solar irradiance (W m<sup>-2</sup>) measured at the spacecraft's distance from the Sun,  $z$  is the distance between the PICARD spacecraft and the Sun (km), the astronomical unit is equal to 149,597,870.700 km,  $c$  is the speed of light (299,792.458 km per second) and  $t$  is the time (second).

#### 4.1. SOVAP TSI equation – “Auto 2” and “Auto 3” modes

$\text{SI}_{(i)}$  is derived from the measurement of the electrical power supplied to the active cavity of the radiometer to maintain this



**Fig. 2.** The blue curve corresponds to the “zero solar flux” on the open cavity ( $K_{\text{Rad}10}$ ). The PICARD spacecraft is in a sun-synchronous orbit and goes into Earth eclipse seasons from November to February. During these eclipses, the spacecraft passes into the penumbra (solar flux through the Earth atmosphere) and the umbra of the Earth that implies high variability of  $P_{cl,l} - P_{o,r}$ .

cavity with the same heat sink flux in the open and closed states as described in more detail by Meftah et al. (2014). The measured solar irradiance for the nominal modes is given by Eq. (2), where the constants are defined in Table 1 except for  $C_6$  that is not needed in the “Rad 10” mode and was explained earlier (end of Sect. 3).

$$SI_{(i=r,l)} = C_5 \times \frac{((\overline{P_{cl,i}} - P_{o,i}) - \Delta P_{o,i} + C_1 + C_6) \times (1 - C_2)}{\alpha_{\text{eff},i} \times A_i \times (1 + \Delta_i + \Delta'_i + \Delta''_i) \times \cos \theta} + C_3 + C_4. \quad (2)$$

The estimated uncertainty on the TSI absolute determination for the “Auto 2” mode is  $\pm 1.4 \text{ W m}^{-2}$  at  $1\sigma$  and for the “Auto 3” mode the estimated uncertainty is  $\pm 1.5 \text{ W m}^{-2}$  at  $1\sigma$  (Meftah et al. 2014).

#### 4.2. SOVAP TSI equation – “Rad 10” mode

To calculate the TSI in this case, a slightly changed instrument equation is required where both channels are used to determine the SOVAP TSI. Solar Irradiance ( $SI_{(R10)}$ ) for the SOVAP right cavity during the “Rad 10” mode is derived from the measurement of the difference between the electrical power supplied to the closed cavity (left) and the electrical power supplied to the open cavity (right).

$$SI_{(R10)} = C_5 \times \frac{((P_{cl,l} - P_{o,r}) - \Delta P_{o,r} - K_{\text{Rad}10} + C_1) \times (1 - C_2)}{\alpha_{\text{eff},r} \times A_r \times (1 + \Delta_r + \Delta'_r + \Delta''_r) \times \cos \theta} + C'_3 + C_4. \quad (3)$$

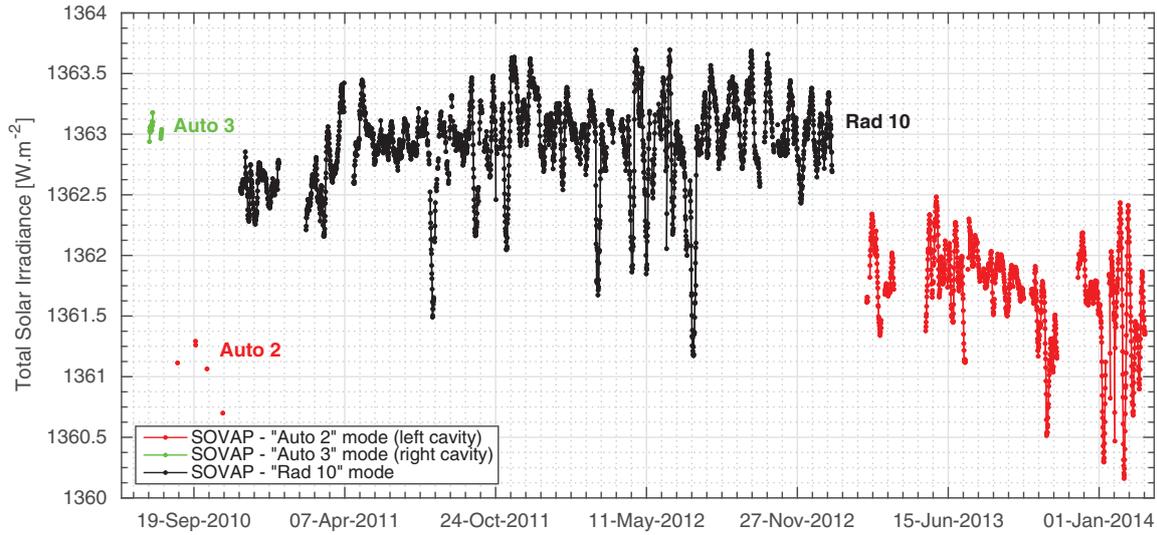
where  $P_{cl,l}$  is the electrical power (W) fed to the left cavity in closed state of the shutter,  $P_{o,r}$  is the electrical power (W) fed to the right cavity in open state of the shutter and  $K_{\text{Rad}10}$  is the thermo-electrical non-equivalence between the right and the left cavity of the SOVAP radiometer (obtained during space calibration). The definition of the parameters of Eq. (3) with

typical values is provided in Table 1. Each parameter is described in more detail in the SOVAP instrumental paper (Conscience et al. 2011), except  $C'_3$  that is temperature dependent and is given in Table 1 for the mean temperature of the closed shutter.

The  $K_{\text{Rad}10}$  parameter is obtained during space calibration (stellar calibration and Earth eclipse seasons) where the right cavity was not exposed to sunlight. The evolution of the  $K_{\text{Rad}10}$  parameter is displayed in Figure 2. The  $K_{\text{Rad}10}$  parameter changes over time and stems from a changing difference between the two channels. The physical explanations for the change in  $K_{\text{Rad}10}$  over time could be an overall warming up of the instrument/heat sink, a modification of the main characteristics of the thermo-electric sensor (heat-flux transducer), a creep of the thermo-electric sensor that is mounted between the cavity and the heat sink (indium thermal interface material), and probably an evolution of the specific torque of the attachment of the thermo-electric sensor.  $K_{\text{Rad}10}$  evolves between  $2.7 \times 10^{-3}$  and  $3.1 \times 10^{-3} \text{ W}$ . Thus, the SOVAP TSI variability time series (“Rad 10” mode) is shown in Figure 3 using Eq. (3) with the different parameters of the Table 1 such as  $K_{\text{Rad}10}$ . Uncertainties of the absolute determination of TSI for the “Rad 10” mode are given in Table 2 in parts per million (ppm) and in  $\text{W m}^{-2}$ . Electrical chain (general effects, transfer of calibration and ground parasitic resistance) uncertainties take into account the two cavities (left and right). Thus, the “Rad 10” mode uncertainty is of the order of  $\pm 1.7 \text{ W m}^{-2}$  ( $1\sigma$ ), which is higher than nominal modes due to the lack of shuttering.

#### 5. SOVAP TSI time series, results and discussion

The SOVAP radiometer made TSI measurements from July 2010 to March 2014. These measurements are compared to TSI time series of existing data and may help to resolve some of the differences in existing long-term time series of TSI. Thus, comparisons were carried out between the Level 2 SOVAP data, VIRGO-DIARAD measurements, TIM measurements and PREMOS measurements. Moreover, a comparison between SOVAP measurements and Spectral And Total Irradiance REconstruction for the Satellite era (SATIRE-S) semi-empirical model (Yeo et al. 2014) was performed. The TSI levels for main operation modes of



**Fig. 3.** The red curve corresponds to the “Auto 2” sequence of measurements (left channel). The green curve corresponds to the “Auto 3” sequence of measurements (right channel). The black curve corresponds to the “Rad 10” sequence of measurements (right channel with the left channel as reference).

**Table 2.** Uncertainties of the TSI measurements for the “Rad 10” mode.

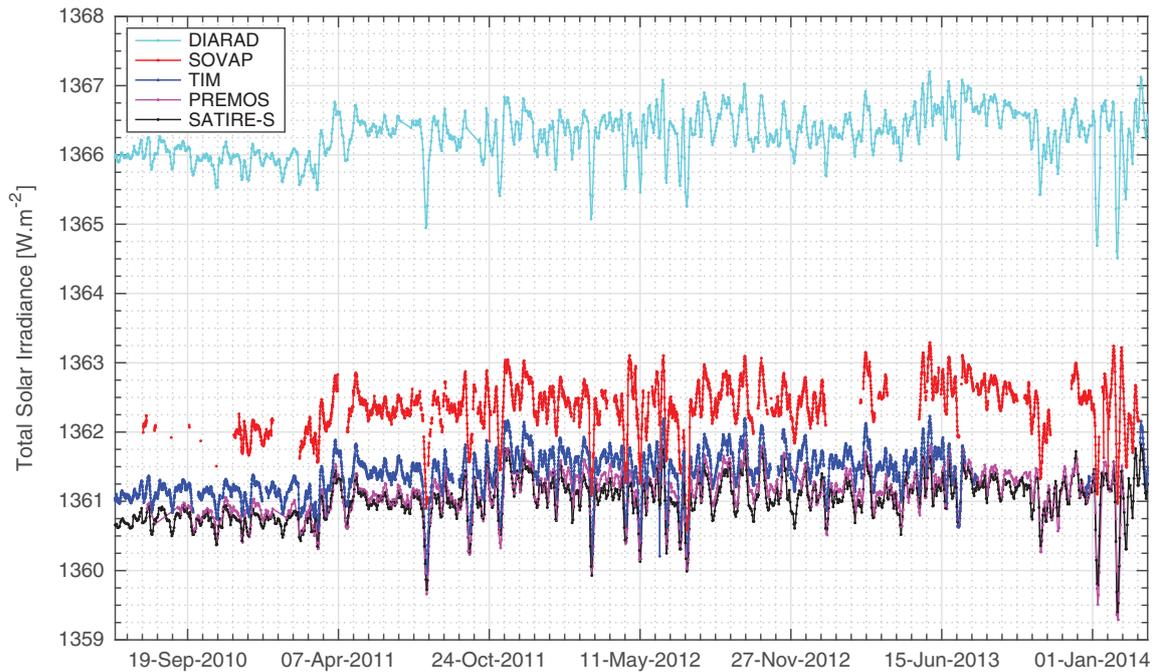
Parameters of the right channel	(ppm)	( $\text{Wm}^{-2}$ )
Wires heating effect $C_1$	1.5	0.002
Accuracy of the servo-system $C_2$	1.2	0.002
Infrared emission of the shutter $C_3'$	39.0	0.053
Infrared emission of the mirror $C_4$	19.0	0.026
Optical effects $C_5$	110.0	0.150
Absorption factor $\alpha_{\text{eff},r}$	190.0	0.259
Precision aperture $A_r$ at 20 °C	117.0	0.159
Thermal effects $\Delta_r$	30.0	0.041
Thermo-mechanical effect $\Delta_r'$	250.0	0.341
Fixation of the aperture $\Delta_r''$	250.0	0.341
Thermo-mechanical sliding $\cos \theta$	6.0	0.008
Thermo-electrical non-equivalence $\Delta P_o$	837.0	1.140
Thermo-electrical non-equivalence $K_{\text{Rad}10}$	280.0	0.381
Thermal radiative effects of the baffle	13.0	0.018
Electrical chains (general effects)	732.6	0.998
Electrical chains (transfer of calibration)	175.4	0.239
Electrical chains (ground parasitic resistance)	284.2	0.387
Doppler effect	50.0	0.068
Mean quadratic uncertainty ( $\sigma = 1$ )	1272.6	1.733

SOVAP-DIARAD are presented in Figure 3, which are the same data as in Figure 1. SOVAP instrument equations (see Sect. 4) were used to obtain these levels. From Eq. (3), we get the evolution over time of the SOVAP “Rad 10” TSI.

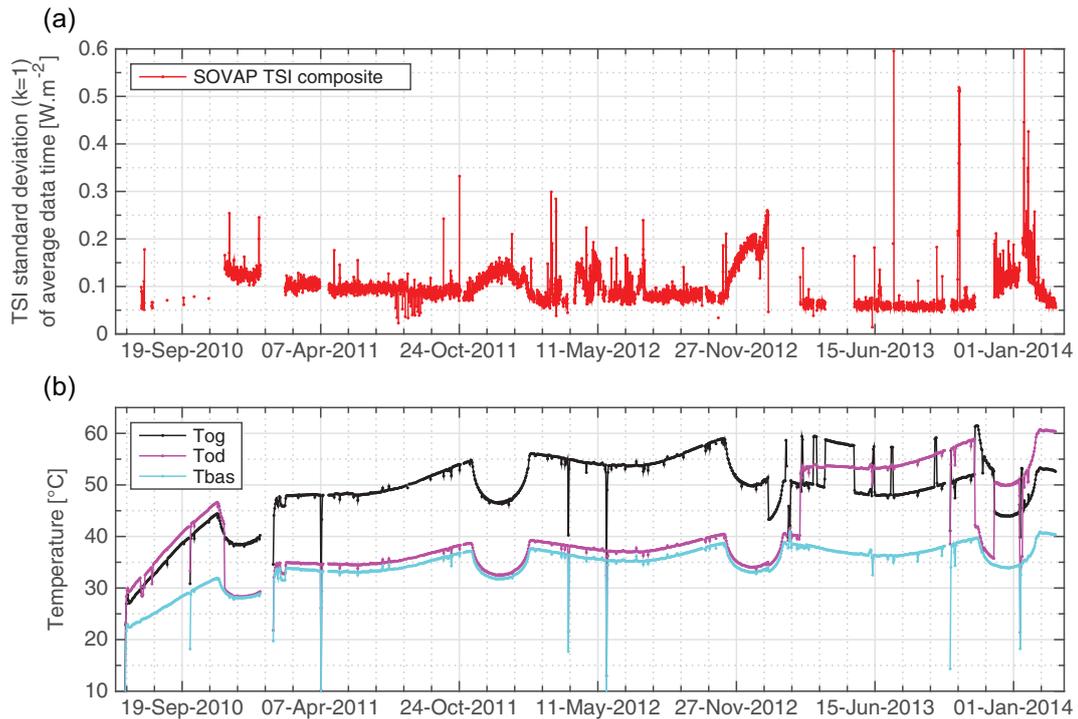
### 5.1. TSI absolute value from SOVAP nominal modes – “Auto 2” and “Auto 3”

In 2010, the first measurements made by the SOVAP radiometer correspond to a state where the instrument was as characterised on ground. The radiometer had not yet suffered degradation due to the effects of the space environment and radiation. A combination of solar irradiation and instrumental contamination can cause polymerisation of organic material and, subsequently, irreversible deposition of this material on

the radiometer. Moreover, the black paint used in the cavities degrades due to radiation. These first measurements are fundamental with respect to the determination of the TSI absolute value. In these conditions, the “Auto 2” SOVAP measurements give a TSI value of  $1361.1 \text{ W m}^{-2}$  with an uncertainty of  $\pm 1.4 \text{ W m}^{-2}$  ( $1\sigma$ ). Similarly, the “Auto 3” SOVAP measurements provide a TSI value of  $1363.0 \pm 1.5 \text{ W m}^{-2}$  ( $1\sigma$ ). By normalising these measurements using VIRGO-DIARAD TSI (data extrapolation) with respect to the 2008 solar minimum period, the “Auto 2” SOVAP TSI is close to  $1360.9 \text{ W m}^{-2}$  and the “Auto 3” SOVAP TSI is close to  $1362.8 \text{ W m}^{-2}$ . The two completely characterised measurements differ by  $\sim 2 \text{ W m}^{-2}$ , where the reproducibility of the thermo-electric sensor characteristics and its integration has a fundamental impact on the differences. Thus, the most conservative approach to determine the absolute value of the SOVAP TSI is to take into account both channels of the radiometer.



**Fig. 4.** TSI time series for different space-based TSI radiometers (VIRGO-DIARAD (left channel), SOVAP composite, TIM and PREMOS). The black curve displays the TSI time series of the SATIRE-S semi-empirical model (SATIRE-S has no ability to determine the absolute scale).



**Fig. 5.** (a) Standard deviation of average data time (6-h high-cadence data points) of the SOVAP TSI composite. (b) Temperature evolution (daily average) of the main components of the SOVAP radiometer. The black curve displays the temperature evolution of the left shutter (Tog). The magenta curve displays the temperature evolution of the right shutter (Tod). The cyan curve displays the temperature evolution of the radiometric core (Tbas).

The absolute TSI as seen by SOVAP is  $1361.8 \pm 2.4 \text{ W m}^{-2}$  ( $1\sigma$ ) for the 2008 solar minimum period. The new value is significantly lower than DIARAD type values – prior to the launch of TIM – of  $1365.4 \text{ W m}^{-2}$ , but still slightly higher than the TIM ( $1360.8 \pm 0.5 \text{ W m}^{-2}$ ) or re-calibrated PREMOS and ACRIM values. The DIARAD type radiometer

has been kept as an independent absolute radiometer, not calibrated against other radiometers, but only compared to other radiometers for validation. We note that for the SOVAP-DIARAD radiometer, we introduced a new term in the radiometric equation that accounts for the thermo-electrical non-equivalence based on a thermo-electrical model

**Table 3.** Pearson's linear correlation coefficient ( $R^2$ ) between SOVAP, VIRGO-DIARAD, TIM, PREMOS and SATIRE-S TSI time series.

$R^2$ linear correlation	S	V	T	P	S-S
SOVAP (S)	–				
VIRGO-DIARAD (V)	0.90	–			
TIM (T)	0.76	0.67	–		
PREMOS (P)	0.88	0.88	0.78	–	
SATIRE-S (S-S)	0.92	0.92	0.78	0.93	–

(Meftah et al. 2014). Introducing this term lowered the TSI value of the SOVAP measurements.

## 5.2. SOVAP TSI time series

The determination of the SOVAP TSI time series has required the establishment of modified instrument equations. For the nominal modes, a parameter ( $\Delta P_o$ ) has been integrated from a theoretical analysis, which highlights the thermo-electrical non-equivalence of the radiometric cavity (open and closed). For the “Rad 10” mode, another parameter ( $K_{\text{Rad10}}$ ) has been integrated from space calibration, which highlights the thermo-electrical non-equivalence between the right and the left cavity. TSI time series for different operation modes of SOVAP-DIARAD are displayed in Figure 3 using instrument equations. Thus, continuous time series of TSI observations have been constructed from the set of measurements made by the SOVAP radiometer from the different operation modes. The presented SOVAP composite (Fig. 4) includes all measurement modes normalised to the mean TSI of the “Auto 2” and “Auto 3” modes at the beginning of the PICARD mission.

Three main parameters (thermo-electrical non-equivalence of the active cavity, correction of the thermal radiative effects of the active shutter and efficiency of the left cavity) can vary over time due to ageing. The thermo-electrical non-equivalence of the active cavity may evolve during the mission and the characteristics of the thermo-electric sensor (temperature dependence) and its attachment (thermal contact resistance) may change over time due to space environment. However, this variation is difficult to assess. Thus, the thermo-electrical non-equivalence requires a ground calibration to get an idea of the impact of various parameters and a potential link with SOVAP housekeeping data. Correction of the thermal radiative effects of the active shutter and efficiency of the left cavity parameters depend on the thermo-optical properties (solar absorptance and emissivity) of the SOVAP cavity's coating. The SOVAP cavity is covered with diffuse black paint (Nextel black velvet). Measurements of the reflectance and ageing characteristics (0.32–14.3  $\mu\text{m}$  wavelength range) of common black coatings were performed by Dury et al. (2007). They highlight that the diffuse reflectance remained flat and below 4% for wavelengths between 0.32 and 2.5  $\mu\text{m}$  (solar absorptance is close to 0.96). Moreover, the diffuse reflectance component exhibits a slight increase (1%) due to solar ageing (solar absorptance variation is close to 0.01). This effect would change the SOVAP TSI measurements by a maximum of  $0.5 \text{ W m}^{-2}$  over time. Dury et al. (2007) shows that the coating is sensitive to thermal ageing effects (thermal cycling). Physical inspection revealed that the surface of the coating had become cracked after thermal ageing. A representative test of the SOVAP cavity

thermal cycling as seen in space may be useful to assess the evolution of the coating. The emissivity of the cavity (15  $^\circ\text{C}$  that corresponds to a wavelength of 10  $\mu\text{m}$ ) can also influence the TSI measurements. The emissivity of the SOVAP cavity is close to 0.94 and can vary up to 1.5% (Dury et al. 2007).  $C_3$  correction that depends on the emissivity takes into account the contribution of the internal thermal emission of the active shutter and its variation during the mission (less than  $0.05 \text{ W m}^{-2}$ ). To conclude, it is difficult to have a complete evaluation of the cavity degradation. However, the left channel cavity degradation is very small from February 2013 to March 2014. If we take VIRGO as reference, it is less than  $0.1 \text{ W m}^{-2}$ .

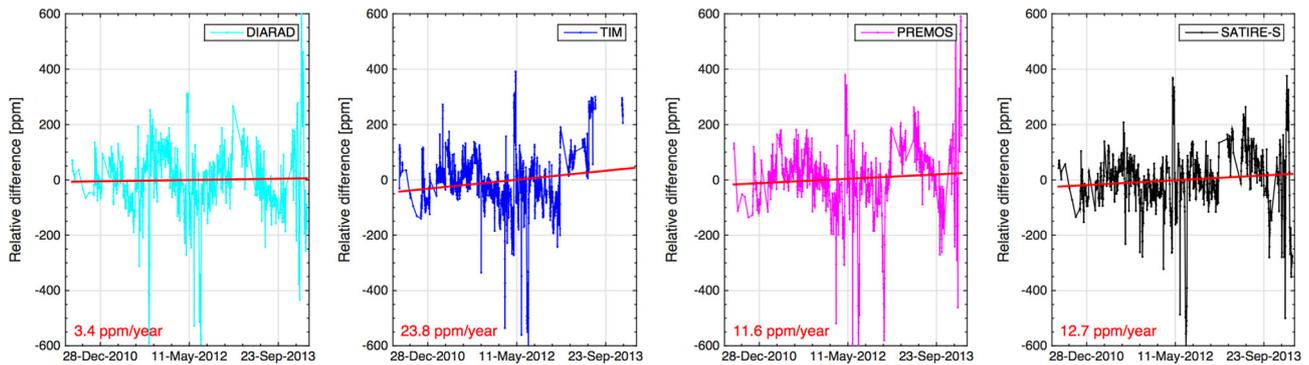
Figure 4 displays the total solar irradiance as seen by the VIRGO-DIARAD radiometer (non-revised by RMIB), SOVAP composite, TIM, PREMOS and SATIRE-S semi-empirical model from July 2010 to March 2014. Time series of SOVAP composite, TIM, PREMOS and SATIRE-S show lower TSI than the canonical value of  $1365.4 \pm 1.3 \text{ W m}^{-2}$  used a decade ago. The VIRGO TSI measurements (new scale) are consistent with the SOVAP values and highlight the interest to revise the TSI absolute values of all DIARAD type radiometers.

Figure 5a displays the standard deviation of average data time (6 h) of the SOVAP composite measurements (“Auto 2”, “Auto 3” and “Rad 10” modes). Repeatability is less than  $\pm 0.1 \text{ W m}^{-2}$  and shows the dependence on the temperature of both SOVAP shutters and radiometric core (Fig. 5b). It also highlights the importance of developing cryogenic radiometers to possibly avoid these effects. Scientific requirements of this type of radiometer could provide a TSI-measurement uncertainty (absolute determination) of  $\pm 0.5 \text{ W m}^{-2}$  ( $\pm 367$  ppm), a measurement repeatability of  $\pm 0.01 \text{ W m}^{-2}$  ( $\pm 7$  ppm) and a long-term stability better than  $\pm 0.05 \text{ W m}^{-2}$  ( $\pm 37$  ppm) during a solar cycle.

## 5.3. TSI time series comparisons

The correlation coefficient ( $R^2$ ) between SOVAP and the semi-empirical model (SATIRE-S) TSI variations is close to 0.92. Thus, there is a very good correlation between these two sets of data based on the Pearson definition. All correlations are given in Table 3. The correlation coefficient between SOVAP and TIM observations is less good. All SORCE instruments ceased operations from July 30, 2013 to December 22, 2013 due to an anomaly of the spacecraft (battery degradation). The discontinuity in the TIM data may influence the results.

Figure 6 displays relative differences between SOVAP and each radiometer (VIRGO-DIARAD, TIM and PREMOS) or model (SATIRE-S) TSI variability. Positive or negative trends of the relative differences highlight non-identical behaviours between SOVAP and the considered radiometer. Relative differences between SOVAP and space-based radiometer (VIRGO-DIARAD, TIM and PREMOS) TSI variability are lower than few hundred ppm. Moreover, relative differences between SOVAP and semi-empirical model (SATIRE-S) TSI variability are lower than few hundred ppm (Fig. 6). Between February 2013 and November 2013, negative trends of the relative differences are observed that are less than 80 ppm ( $\sim 0.1 \text{ W m}^{-2}$ ). During this period, the SOVAP “Auto 2” mode was operational. Thus, this is probably linked to a degradation of the SOVAP left channel cavity.



**Fig. 6.** Relative differences between SOVAP and each instrument (VIRGO-DIARAD, TIM and PREMOS) or model (SATIRE-S) TSI variability. Direction of differences is SOVAP minus instrument or model.

## 6. Conclusions

1. PICARD provides important contributions to TSI variation monitoring during Solar Cycle 24.
2. The SOVAP TSI time series has implemented our state-of-the-art revised instrument equations.
3. SOVAP absolute TSI is equal to  $1361.8 \pm 2.4 \text{ W m}^{-2}$  ( $1\sigma$ ) for the 2008 solar minimum period (VIRGO-DIARAD TSI data extrapolation).
4. From July 2010 to March 2014, the amplitude of the TSI changes has been of the order of  $\pm 0.1\%$ , corresponding to a range of about  $2.7 \text{ W m}^{-2}$ .
5. SOVAP data show very good correlations with VIRGO-DIARAD and SATIRE-S.
6. The radiometric equations for all other DIARAD type radiometers (and thus the absolute value of the TSI coming from these) should be revised to account of the thermo-electrical non-equivalence.

*Acknowledgements.* Part of this work was supported by the *Centre National de la Recherche Scientifique* (CNRS), the RMIB and the Solar-Terrestrial Center of Excellence (STCE). Finally, the authors thank the anonymous referee, Claus Fröhlich and Greg Kopp for many helpful comments and suggestions to improve the manuscript. The editor thanks André Fehlmann and Claus Fröhlich for their assistance in evaluating this paper.

## References

- Butler, J.J., B.C. Johnson, J.P. Rice, E.L. Shirley, and R.A. Barnes. Sources of differences in on-orbital total solar irradiance measurements and description of a proposed laboratory inter-comparison. *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, **113**, 187–203, 2008.
- Conscience, C., M. Meftah, A. Chevalier, S. Dewitte, and D. Crommelynck. The space instrument SOVAP of the PICARD mission, in: *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, vol. 8146 of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 814613, 2011, DOI: [10.1117/12.895447](https://doi.org/10.1117/12.895447).
- Crommelynck, D.A., R.W. Brusa, and V. Domingo. Results of the solar constant experiment onboard Spacelab 1. *Sol. Phys.*, **107**, 1–9, 1987.
- Dewitte, S., D. Crommelynck, and A. Joukoff. Total solar irradiance observations from DIARAD/VIRGO. *J. Geophys. Res. [Space Phys.]*, **109**, A02102, 2004, DOI: [10.1029/2002JA009694](https://doi.org/10.1029/2002JA009694).
- Dury, M.R., T. Theocharous, N. Harrison, N. Fox, and M. Hilton. Common black coatings reflectance and ageing characteristics in the 0.32–14.3  $\mu\text{m}$  wavelength range. *Opt. Commun.*, **270**, 262–272, 2007, DOI: [10.1016/j.optcom.2006.08.038](https://doi.org/10.1016/j.optcom.2006.08.038).
- Fröhlich, C., D.A. Crommelynck, C. Wehrli, M. Anklin, S. Dewitte, et al. In-flight performance of the Virgo solar irradiance instruments on SOHO. *Sol. Phys.*, **175**, 267–286, 1997, DOI: [10.1023/A:1004929108864](https://doi.org/10.1023/A:1004929108864).
- Fröhlich, C., J. Romero, H. Roth, C. Wehrli, B.N. Andersen, et al. VIRGO: experiment for helioseismology and solar irradiance monitoring. *Sol. Phys.*, **162**, 101–128, 1995, DOI: [10.1007/BF00733428](https://doi.org/10.1007/BF00733428).
- Kopp, G., and J.L. Lean. A new, lower value of total solar irradiance: evidence and climate significance. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L01706, 2011, DOI: [10.1029/2010GL045777](https://doi.org/10.1029/2010GL045777).
- Meftah, M., S. Dewitte, A. Irbah, A. Chevalier, C. Conscience, D. Crommelynck, E. Janssen, and S. Mekaoui. SOVAP/Picard, a spaceborne radiometer to measure the total solar irradiance. *Sol. Phys.*, **289**, 1885–1899, 2014, DOI: [10.1007/s11207-013-0443-0](https://doi.org/10.1007/s11207-013-0443-0).
- Schmutz, W., A. Fehlmann, W. Finsterle, G. Kopp, and G. Thuillier. Total solar irradiance measurements with PREMOS/PICARD, in: *American Institute of Physics Conference Series*, vol. 1531 of American Institute of Physics Conference Series, 624–627, 2013, DOI: [10.1063/1.4804847](https://doi.org/10.1063/1.4804847).
- Willson, R.C. ACRIM3 and the Total Solar Irradiance database. *Astrophys. Space Sci.*, **352**, 341–352, 2014, DOI: [10.1007/s10509-014-1961-4](https://doi.org/10.1007/s10509-014-1961-4).
- Yeo, K.L., N.A. Krivova, S.K. Solanki, and K.H. Glassmeier. Reconstruction of total and spectral solar irradiance from 1974 to 2013 based on KPVT, SoHO/MDI, and SDO/HMI observations. *A&A*, **570**, A85, 2014, DOI: [10.1051/0004-6361/201423628](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201423628).

**Cite this article as:** Meftah M, Chevalier A, Conscience C & Nevens S. Total solar irradiance as measured by the SOVAP radiometer onboard PICARD. *J. Space Weather Space Clim.*, **6**, A34, 2016, DOI: [10.1051/swsc/2016027](https://doi.org/10.1051/swsc/2016027).

## 4.4 Conclusions

A partir des mesures réalisées par l'instrument SOVAP de la mission PICARD, la valeur absolue de l'éclairement solaire total a été déterminée avec précision. Il s'agit d'une des rares déterminations de l'éclairement solaire total obtenue hors atmosphère et où un bilan d'erreurs détaillé et réaliste est proposé. Il s'agit d'un travail de métrologie très précis où les erreurs aléatoires et les erreurs systématiques ont été prises en compte. **La valeur de l'éclairement solaire total est donc égale à  $1361.8 \pm 2.4 \text{ W m}^{-2}$  à  $1 \sigma$  (valeur représentative du minimum solaire de 2008 avec une incertitude absolue sur la mesure).** La valeur obtenue représente la quantité d'énergie solaire que recevrait une surface de  $1 \text{ m}^2$  située à une distance de une unité astronomique (distance moyenne Terre-Soleil), exposée perpendiculairement aux rayons du Soleil et en l'absence d'atmosphère. Ce résultat est compatible avec ceux obtenus à partir des instruments spatiaux de dernière génération (l'instrument TIM de la mission SORCE et le radiomètre PREMOS de la mission PICARD).

Par ailleurs, les variations de l'éclairement solaire total ont aussi été mesurées entre 2010 et 2014 par le radiomètre SOVAP. Ces mesures sont très importantes puisque l'éclairement solaire total est considéré comme une variable climatique essentielle. Soulignons que seules les séries chronologiques les plus longues et ininterrompues peuvent permettre d'étudier la variabilité du Soleil. L'objectif de l'étude de sa variabilité est d'apporter des informations fondamentales pour la physique solaire et pour la physique de l'atmosphère et du climat. Dès lors, les mesures réalisées par les instruments de la mission PICARD (SOVAP et PREMOS) présentent aussi un intérêt dans le sens où elles peuvent être utilisées pour générer un composite de l'éclairement solaire total (mélange de mesures acquises par plusieurs instruments). Ces mesures apportent des informations importantes à la série chronologique mesurée par l'instrument TIM de la mission SORCE. En effet, entre juillet 2013 et fin décembre 2013, l'instrument TIM de la mission SORCE a cessé d'observer le Soleil (anomalie du satellite liée à la dégradation des batteries).

# Chapitre 5

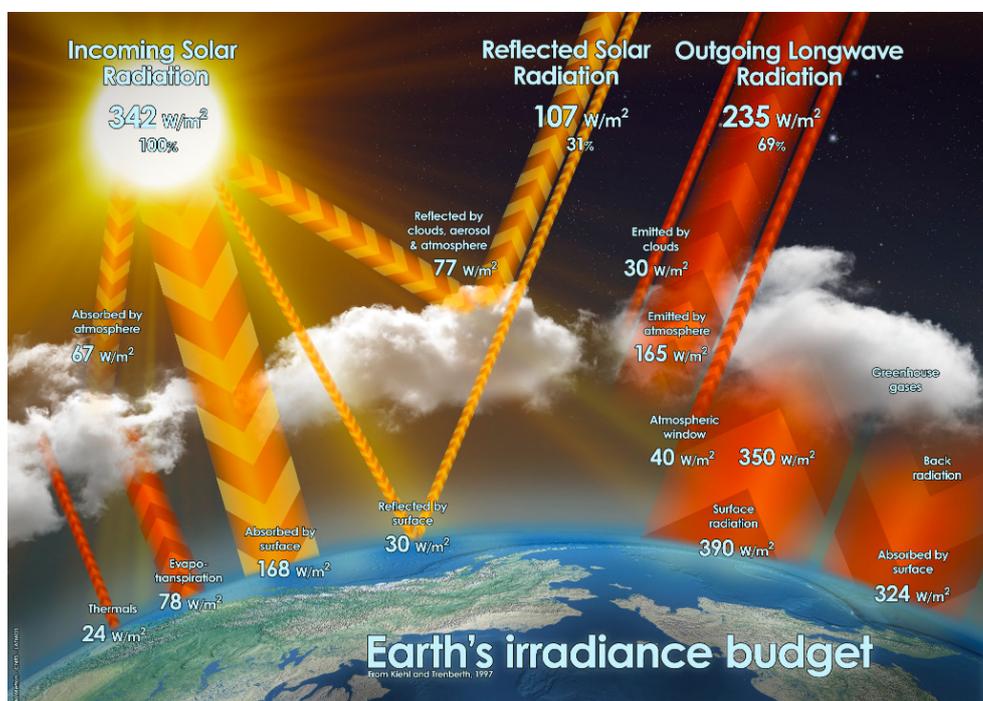
## L'éclairement solaire dans l'UV et ses variations au cours du cycle 24

### Sommaire

---

5.1	Introduction	184
5.2	Détermination d'un spectre solaire de référence dans l'UV (entre 165 et 400 nm) et étude de sa variation	186
5.3	Conclusions	208

---



**FIGURE 5.1** Bilan radiatif de la Terre et les relations Soleil-Terre. L'éclairement solaire représente un paramètre majeur du bilan radiatif de la Terre.

## 5.1 Introduction

La mesure précise de l'éclairement solaire spectral hors atmosphère et de sa variabilité constituent une entrée fondamentale pour la physique solaire (modélisation du Soleil), pour la photochimie atmosphérique terrestre (modèles de chimie-climat), et pour le climat de la Terre (modèles climatiques). Le rôle de la variabilité solaire sur le changement climatique reste un sujet d'intérêt scientifique et sociétal fort. Le rayonnement solaire intervient dans le bilan radiatif de la Terre (Figure 5.1) et de son climat. Comprendre l'évolution récente du climat passé et se projeter dans l'avenir nécessite d'être capable de faire la distinction entre les variations climatiques d'origine anthropique et les variations climatiques d'origine naturelle. Parmi les causes naturelles qui peuvent avoir un effet sur le climat, la variabilité solaire est probablement une des plus importantes. Toutefois, les variations de la concentration des gaz à effets de serre et les émissions de poussières d'origine volcanique introduisent des effets à plus ou moins long terme. Il s'agit de paramètres très importants qui influencent fortement le climat de la Terre.

L'influence de la variabilité solaire sur l'atmosphère et le climat de la Terre est associée à des mécanismes extrêmement complexes; de simples considérations vis à vis du bilan radiatif de la Terre sont largement insuffisantes pour comprendre ces mécanismes. Il est aussi de plus en plus évident que les variations de l'éclairement solaire spectral (SSI) jouent un rôle significatif au niveau de la chimie de l'atmosphère et du climat de la Terre (influence de la longueur d'onde). La variabilité dans le domaine du rayonnement ultraviolet (Section 1.8) est beaucoup plus élevée que celle de l'éclairement solaire total ( $\sim 0.1\%$  au cours d'un cycle solaire). La moyenne atmosphère (stratosphère et mésosphère) est beaucoup plus perturbée par la variabilité solaire dans l'UV que la basse atmosphère. En effet, l'ozone est très sensible au rayonnement UV; il s'agit d'un gaz clé pour la chimie et le bilan d'énergie de la stratosphère.

De nombreuses études démontrent que les variations de l'intensité du rayonnement solaire incident atteignant la Terre (du fait des variations de l'activité du Soleil ou des changements des paramètres orbitaux) affectent les différentes régions de l'atmosphère et le climat de surface de la Terre. Pourtant, il n'existe toujours pas de consensus sur la contribution de la variabilité solaire par rapport à celle de la variabilité climatique, même si cette dernière a été largement dominée par la composante anthropique depuis le milieu du vingtième siècle (Figure 1.26). Bien que des corrélations claires entre indicateurs solaires et paramètres atmosphériques aient été établies dans différents jeux de données, y compris les archives sédimentaires et glaciaires, il est de plus en plus clair que ces corrélations à différentes échelles de temps peuvent impliquer des mécanismes interactifs entre les processus chimiques, dynamiques, et radiatifs.

Les lacunes dans notre compréhension des liens entre la Terre et le Soleil ne se limitent pas à la caractérisation de la variabilité de l'éclairement solaire spectral. Les mécanismes par lesquels la variabilité solaire affecte les différentes régions de l'atmosphère et le climat de surface ne sont pas totalement compris, notamment les mécanismes de propagation des perturbations solaires de l'atmosphère moyenne à la basse atmosphère et jusqu'à la surface de la Terre. Du fait des couplages étroits entre la photochimie, la dynamique et le rayonnement, même à de courtes échelles de temps, l'atmosphère moyenne est l'une des régions les plus susceptibles de répondre avec amplification à une variation de l'activité solaire. Ces forts couplages rendent aussi difficile l'analyse des réponses de l'atmosphère moyenne à la variabilité solaire car les différents processus et mécanismes impliqués ne peuvent pas être traités de façon complètement indépendante. Il faut souligner que, du fait de l'augmentation rapide des moyens de calcul, certains modèles de circulation générale calculent maintenant explicitement la composition chimique de l'atmosphère étant couplés à des modèles de la circulation océanique. Ce type de modèle couplé océan-atmosphère avec chimie interactive, permet de prendre en compte plus d'interactions et de calculer la réponse de l'atmosphère aux variations solaires dans toutes les régions de l'atmosphère jusqu'à la surface des océans.

En résumé, les incertitudes vont de la caractérisation de la variabilité solaire elle-même à l'identification et à la simulation des mécanismes-clés du forçage solaire sur l'atmosphère. Il est nécessaire de mieux caractériser et quantifier l'influence de la variabilité solaire dans les différentes régions de l'atmosphère et sur le climat de surface de la Terre à l'aide d'analyses couplées de données d'observation et de modèles de reconstructions. Dès lors, les mesures de l'éclairement solaire spectral dans l'UV et de ses variations au cours du temps sont fondamentales. Plusieurs instruments permettent de répondre à cette attente (les instruments de la mission SORCE, SOLAR/SOLSPEC, *etc.*). Les mesures réalisées au cours du cycle solaire 24 et les suivants sont très importantes. Une des questions est de savoir si nous ne nous dirigeons pas vers un nouveau minimum de Maunder. En effet, les caractéristiques de la fin du cycle solaire 23 ont été perçues dans la diminution exceptionnelle du nombre de taches solaires comme une des plus importante depuis le Minimum de Maunder [Lockwood *et al.*, 2011]. Les densités thermosphériques à la fin du cycle solaire 23 ont également été les plus faibles observés dans une base de données de 43 ans avec des anomalies qui ont débuté avant 2006 et dont la principale cause était certainement le niveau anormalement bas de l'éclairement solaire spectral dans l'UV extrême [Solomon *et al.*, 2010]. Lorsque ces différents paramètres sont utilisés pour forcer les modèles climatiques, les résultats en termes de réponses atmosphériques et climatiques peuvent varier fortement [Shapiro *et al.*, 2010; Merkel *et al.*, 2011; Haigh *et al.*, 2010].

Ce chapitre est consacré à l'étude de l'éclairement solaire spectral dans l'ultraviolet ; le principal but étant de présenter les résultats obtenus avec l'instrument SOLAR/SOLSPEC. Les mesures réalisées avec SOLAR/SOLSPEC ont été réalisées au cours du cycle solaire 24 (à partir de 2008). Dès lors, il est possible de faire des comparaisons avec les mesures obtenues par les instruments de la mission SORCE (opérationnel depuis 2004) et de pouvoir répondre à certaines interrogations. En effet, les mesures d'éclairement solaire spectral réalisées par les instruments de la mission SORCE ont montré un comportement inattendu au cours de la phase descendante du cycle solaire 23 (de 2004 à 2008) ; une décroissance de l'éclairement solaire spectral UV [Harder *et al.*, 2009] supérieure à toutes les estimations considérées lors des cycles undécennaux précédents [Lean *et al.*, 2005] a été observée.

## 5.2 Détermination d'un spectre solaire de référence dans l'UV (entre 165 et 400 nm) et étude de sa variation

Les résultats obtenus à partir de l'analyse des données de l'instrument SOLAR/SOLSPEC ont été publiés dans une revue scientifique à comité de lecture (Solar Physics). Cet article, intitulé « *Solar Irradiance from 165 to 400 nm in 2008 and UV Variations in Three Spectral Bands During Solar Cycle 24* », est présenté ci-après [Meftah *et al.*, 2016a]. Un nouveau spectre de référence dans l'UV a été obtenu à partir du traitement des données issues de l'instrument SOLAR/SOLSPEC. Les variations de l'éclairement solaire spectral obtenues avec SOLAR/SOLSPEC (bandes UV) sont compatibles avec celles issues des modèles de reconstruction. Les mesures d'éclairement solaire spectral réalisées par les instruments de la mission SORCE montrent des variations cohérentes avec celles observées par SOLAR/SOLSPEC (pour les bandes UV). Le comportement inattendu des instruments de la mission SORCE observé lors du cycle 23 a disparu au cours du cycle 24. Il s'agit d'une question ouverte. Cependant, le comportement observé entre 2004 et 2008 par les instruments de la mission SORCE n'est pas compatible avec notre compréhension de la physique solaire. Il en est de même vis à vis des hypothèses utilisées dans les reconstructions de l'éclairement solaire spectral à partir de l'utilisation des indicateurs solaires usuels [Pagaran *et al.*, 2011].

# Solar Irradiance from 165 to 400 nm in 2008 and UV Variations in Three Spectral Bands During Solar Cycle 24

M. Meftah<sup>1</sup> · D. Bolsée<sup>2</sup> · L. Damé<sup>1</sup> · A. Hauchecorne<sup>1</sup> ·  
N. Pereira<sup>2</sup> · A. Irbah<sup>1</sup> · S. Bekki<sup>1</sup> · G. Cessateur<sup>2</sup> ·  
T. Foujols<sup>1</sup> · R. Thiéblemont<sup>1</sup>

Received: 23 May 2016 / Accepted: 16 September 2016

**Abstract** Accurate measurements of the solar spectral irradiance (SSI) and its temporal variations are of primary interest to better understand solar mechanisms, and the links between solar variability and Earth's atmosphere and climate. The *SOLar SPECTrum* (SOLSPEC) instrument of the *Solar Monitoring Observatory* (SOLAR) payload onboard the *International Space Station* (ISS) has been built to carry out SSI measurements from 165 to 3088 nm. We focus here on the ultraviolet (UV) part of the measured solar spectrum (wavelengths less than 400 nm) because the UV part is potentially important for understanding the solar forcing of Earth's atmosphere and climate. We present here SOLAR/SOLSPEC UV data obtained since 2008, and their variations in three spectral bands during Solar Cycle 24. They are compared with previously reported UV measurements and model reconstructions, and differences are discussed.

**Keywords** Solar irradiance · Solar cycle · Instrumentation and data management · Instrumental effects

## 1. Introduction

The solar spectrum is a key input for different disciplines such as:

- Solar physics where the solar spectrum characterizes the activity of the Sun's outer layers (photosphere, chromosphere, and corona). By comparison with the theoretical reconstructions, an accurately measured solar spectrum allows one to validate temperature, composition, and densities of the solar atmosphere.

---

M. Meftah  
[Mustapha.Meftah@latmos.ipsl.fr](mailto:Mustapha.Meftah@latmos.ipsl.fr)

D. Bolsée  
[David.Bolsee@aeronomie.be](mailto:David.Bolsee@aeronomie.be)

<sup>1</sup> LATMOS-IPSL, Université Paris Saclay, Université Paris VI – Pierre et Marie Curie, CNRS/INSU, 11 Boulevard d'Alembert, 78280 Guyancourt, France

<sup>2</sup> Belgian Institute for Space Aeronomy (BIRA-IASB), Ringlaan 3, 1180 Brussels, Belgium

- Climate physics where solar-dependent processes are recognized as major drivers of rapid climate changes. Climate models require time-varying solar spectra as forcing. The available information is often based on solar reconstructions and models. However, it is not clear that they correctly represent the different levels of solar activity, notably ultraviolet (UV) levels. As a reminder, atmospheric models with representation of the middle stratosphere have been developed (Hegglin *et al.*, 2010). They strongly focus on simulating ozone, stratospheric dynamics (Strahan *et al.*, 2011), and testing knowledge of what controls global ozone (Oman *et al.*, 2010), notably the springtime polar ozone depletion (von Hobe *et al.*, 2013). The acknowledgment that the atmosphere at its different altitude ranges needs to be modeled as a coupled entity is relatively recent. Currently weather forecast models are including a representation of the mesosphere as it enhances the long-term predictability power of the model. Solar variability forces the atmosphere at different altitudes by different mechanisms. The signal is amplified at the upper layers showing some degree of linearity in the chemistry. However, the signal becomes smaller and more complex at lower altitudes making it difficult to extract natural variability from the model. Furthermore, numerical atmosphere models seem sensitive to the choice of solar irradiance variability used to force the model. For example, solar spectral irradiance (SSI) measurements in the Herzberg continuum will help address several questions concerning the climate response to variable solar forcing (Sukhodolov *et al.*, 2016). About the stratospheric ozone, the total column ozone data records analyses show a clear 11-year signature, compatible with the solar cycle. However, models have so far not been able to reproduce completely the profile and magnitude of the signal (Austin *et al.*, 2008). In fact, many meteorological quantities are correlated with the 11-year solar signal; but what are the mechanisms behind those signals?

Before 1970, very few reliable solar irradiance measurements above the atmosphere are available. There is the Neckel and Labs solar spectrum (Labs and Neckel, 1968; Neckel and Labs, 1981, 1984), which is a reference spectrum obtained from ground-based and high-altitude measurements. From 1978, regular space-based measurements of the solar irradiance started. These space-based measurements began with the *Shuttle-borne Solar Backscatter UltraViolet Spectrometer* (Cebula, Hilsenrath, and Guenther, 1989; Cebula, DeLand, and Hilsenrath, 1998). The first regular space-based monitoring of the solar spectrum over a broad range (240–2380 nm) was carried out by the *SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartographY* (SCIAMACHY) onboard *Environmental Satellite* (Bovensmann *et al.*, 1999; Pagaran, Weber, and Burrows, 2009; Pagaran *et al.*, 2011). An overview of the main satellite missions that have made SSI observations at wavelengths higher than 100 nm is given by Ermolli *et al.* (2013).

SOLAR/SOLSPEC is a space-based spectro-radiometer developed by CNRS-LATMOS (France), and by BIRA-IASB (Belgium) with a major collaboration of the Heidelberg Observatory (Germany). It is externally mounted on the Columbus module of the *International Space Station* (ISS). The instrument has been measuring the solar spectral irradiance above the atmosphere since 2008 and is still operational today. SOLAR/SOLSPEC consists of three separated double-spectrometers that use concave holographic gratings made by Jobin-Yvon to cover the specific ‘UV’ (165–371 nm), ‘VIS’ (285–908 nm), and ‘IR’ (646–3088 nm) spectral ranges. The spectral resolution of the ‘UV’ spectrometer is ranging from 0.6 nm to 1.6 nm, whereas the ‘VIS’ spectrometer is ranging from 1.6 nm to 2.1 nm, and the ‘IR’ spectrometer is ranging from 7 nm to 9.5 nm. Using a mechanical shaft, all the gratings are rotating simultaneously and scanning the three spectral ranges at the same time. The detectors are Electro-Mechanical Research photo-multiplier (PM) tubes in the ‘UV’ and ‘VIS’ spectral ranges, and a Hamamatsu P2682 PbS cell cooled at  $-20^{\circ}\text{C}$  in the ‘IR’ spectral band.

SOLAR/SOLSPEC scientific objectives, instrument performances, and absolute calibration using a blackbody as primary standard source are described in more detail by Thuillier *et al.* (2009) and Bolsée (2012).

The present article is dedicated to the UV portion (165–400 nm) of the solar spectrum and its temporal variations during Solar Cycle 24. Measurements from two separated double-spectrometers of SOLAR/SOLSPEC (‘UV’ and ‘VIS’) are combined. From these data, we obtained the UV solar spectrum above Earth’s atmosphere at a distance of one astronomical unit (initial values for studying the UV solar variability). SOLAR/SOLSPEC measurements are compared with previously reported solar UV measurements and model reconstructions and differences are discussed. SOLAR/SOLSPEC UV spectra are first compared with the *ATmospheric Laboratory for Applications and Science* (ATLAS) composite (Thuillier *et al.*, 2003) and with the Solar Irradiance Reference Spectra (SIRS) for the 2008 Whole Heliosphere Interval (WHI) corresponding to the solar Carrington rotation 2068 from mid-March to mid-April 2008 (Woods *et al.*, 2009). Similarly, SOLAR/SOLSPEC UV spectra are compared with reconstructions issued from the Spectral And Total Irradiance REconstruction for the Satellite era (SATIRE-S) semi-empirical model (Yeo *et al.*, 2014).

Degradation of the SOLAR/SOLSPEC instrument is highlighted, providing information for the development of future space-based UV instruments.

Finally, we present SOLAR/SOLSPEC UV SSI temporal variations from 2010 to 2015 in three spectral bands (165–180, 180–200, and 200–242 nm).

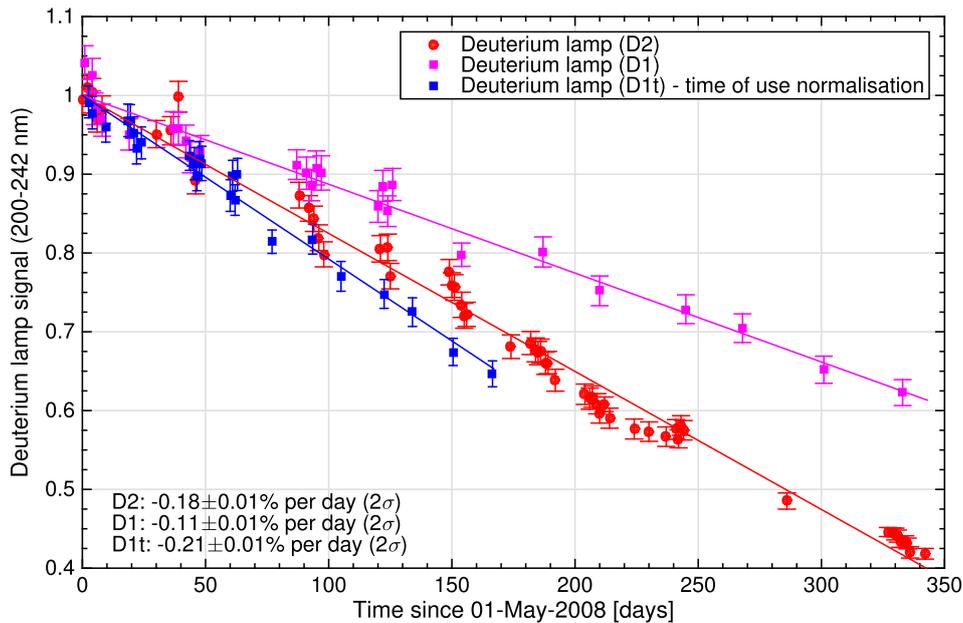
## 2. SOLAR/SOLSPEC Observations and Corrections

SOLAR/SOLSPEC was exposed to sunlight for the first time on April 5, 2008. The duration to record a solar spectrum (165–3088 nm) is less than 17 minutes. Between April 2008 and May 2016, more than 700 solar spectra were acquired. The fundamental issues for solar spectra measurements are:

- high accuracy to determine a reference solar spectrum;
- long-term stability to accurately determine SSI change with time.

A typical day of acquisition consists of one solar spectrum measurement and three calibrations for different purposes (radiometric calibrations, spectral resolutions, and wavelength scales). The deuterium lamp (nominal or spare) allows a calibration of the ‘UV’ spectral band. Similarly, the tungsten ribbon lamp (nominal or spare) allows a calibration of the ‘VIS’ spectral band. Two tungsten ribbon lamps (nominal and redundant) are associated with the ‘IR’ spectral band. Moreover, a helium hollow cathode lamp controls spectral resolutions and wavelength scales for the ‘UV’ and the ‘VIS’ spectral ranges. Thus, SOLAR/SOLSPEC has onboard standards (*i.e.* a lamp system) for calibration to identify possible SSI long-term changes. Indeed, the lamps are used for checking the instrument stability with time in order to provide reference data for aging corrections. However, these corrections are not straightforward (degradation of the lamps themselves as shown in Figure 1, lamps power supply failure, *etc.*). For example, the calibration of the ‘UV’ spectral band (deuterium lamps) was no longer possible since April 2009 due to the power supply failure of the deuterium lamps.

Other calibrations allow one to quantify the SOLAR/SOLSPEC quartz window transmission decreases. Indeed, the solar spectrum measurements are done with or without the quartz window in front of the entrance slit. The mechanical shutters and the quartz windows are used as a shield for limiting the degradation of the optical components due to the harsh space environment.



**Figure 1** Temporal variations of SOLAR/SOLSPEC signal (200–242 nm) during calibrations with deuterium lamps (D1 and D2). The blue curve (D1t) represents the normalized temporal variation during a calibration with the D1 lamp for the same operation time as the D2 lamp.

## 2.1. SOLAR/SOLSPEC Pre-flight Calibration and Expected Uncertainties

Pre-flight calibration to identify critical SOLAR/SOLSPEC performance parameters was described by Thuillier *et al.* (2009) and in more detail in Bolsée (2012). Before the SOLAR mission, the first version of the SOLSPEC instrument has flown on *SpaceLab I*, on the ATLAS missions, and on EURECA. It provided data from 200 to 2400 nm (Thuillier *et al.*, 2003). This heritage has been taken into account in the design of SOLAR/SOLSPEC to increase its accuracy (Thuillier *et al.*, 2009). Pre-flight, the absolute calibration of SOLAR/SOLSPEC was carried out using the spectral irradiance standards, such as the deuterium lamps and the blackbody of the *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* (PTB, Braunschweig, Germany). During the absolute calibration at the PTB, the temperature of the SOLAR/SOLSPEC instrument was  $23.3 \pm 1.5$  °C.

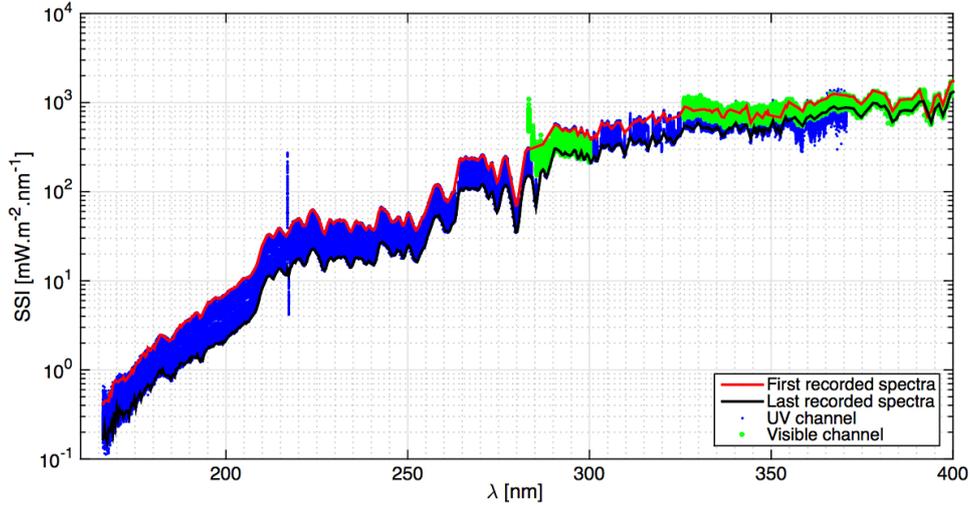
Expected standard measurements uncertainties ( $1\sigma$ ) are between 2 % to 4 % in the 165–370 nm range and less than 2 % in 370–400 nm (see Bolsée, 2012), which correspond to begin of life (BOL) values for SOLAR/SOLSPEC uniform temperatures (no temperature gradient).

## 2.2. SOLAR/SOLSPEC SSI Equation – Ideal Case

The SOLAR/SOLSPEC instrument has made continuous SSI measurements from April 2008 until today. In the best case (BOL and SOLAR/SOLSPEC temperature close to 23 °C), Equation (1) allows one to determine the SSI evolution over time. We have

$$\text{SSI}_S(\lambda, t) = \left( S_n(\lambda, t) - \frac{\langle \text{DC}(t) \rangle}{\tau(t)} \right) \times R(\lambda, t) \times \left( \frac{z(t)}{1 \text{ au}} \right)^2, \quad (1)$$

where  $\text{SSI}_S(\lambda, t)$  is the SSI as measured by SOLAR/SOLSPEC at a given wavelength ( $\lambda$ ) and for a given time ( $t$ ).  $S_n(\lambda, t)$  (in counts  $\text{s}^{-1}$ ) is the linearized signal provided by the detector (solar blind photomultiplier). The two spectral ranges (‘UV’ and ‘VIS’) are linear within



**Figure 2** Measured spectral distribution of UV SSI (165–400 nm) from April 2008 to August 2015. Measurements of the ‘UV’ spectral band are represented as blue dots. Measurements of the ‘VIS’ spectral band are represented as green dots. The red curve represents the first SOLAR/SOLSPEC UV spectrum. The black curve represents the last UV solar spectrum obtained in August 2015.

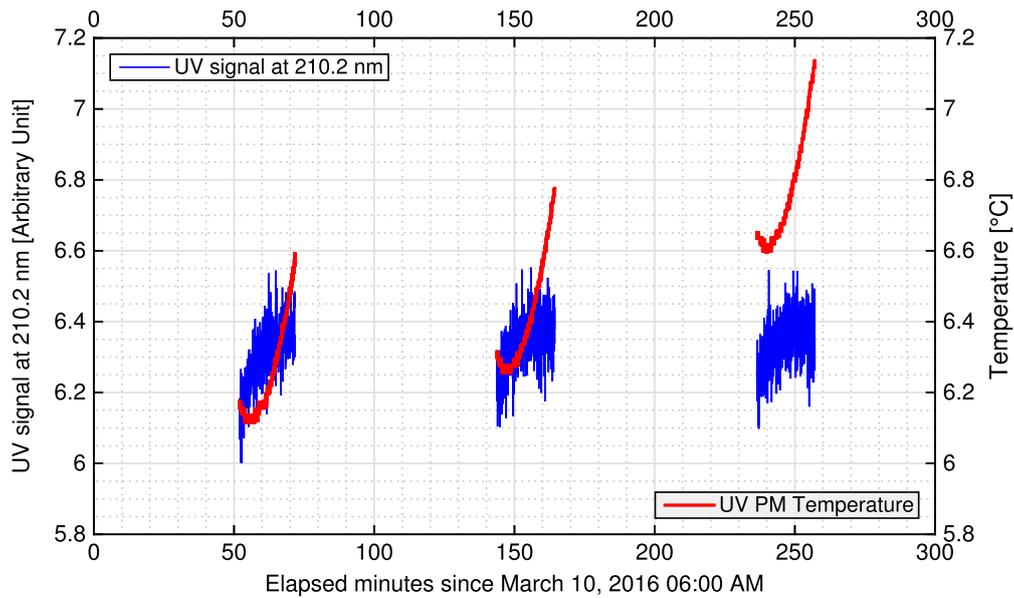
their whole dynamical range (up to 20 000 counts  $s^{-1}$ ).  $\langle DC(t) \rangle$  (in counts) is the mean dark current of the detector taken before and after a solar spectrum measurement during the integration time ( $\tau(t)$  in s).  $R(\lambda, t)$  (in  $mW m^{-2} nm^{-1} counts^{-1} s$ ) represents the absolute responsivity of the instrument.  $z(t)$  (in km) is the distance between SOLAR/SOLSPEC and the Sun. The astronomical unit (1 au) is equal to 149 597 870.700 km.

The first SOLAR/SOLSPEC UV spectral distribution of the Sun’s radiation at the mean Earth–Sun distance of one astronomical unit is shown in Figure 2 (red curve). No correction was applied such as photocathode quantum efficiency change with the temperature, which is a relatively weak effect. All solar spectra acquired between April 2008 and August 2015 are shown in blue for the ‘UV’ spectral band and in green for the ‘VIS’ spectral band. One can notice that the SOLAR/SOLSPEC SSI variations are much higher than the expected values. Indeed, below 400 nm, the long-term SSI variability increases with decreasing wavelength, reaching  $\sim 15\%$  of SSI variation at 165 nm using SATIRE-S data from 2008 to 2015. Yet, the SOLAR/SOLSPEC SSI variation at 165 nm can reach more than 80% from 2008 to 2015. This is obviously an abnormal variation, which highlights the degradation of the SOLAR/SOLSPEC instrument. Indeed, SOLAR/SOLSPEC such as different solar space-based instruments (Meftah *et al.*, 2014a; Cessateur *et al.*, 2016) is vulnerable to the degradation due to the space environment (BenMoussa *et al.*, 2013). Thus, the SOLAR/SOLSPEC signal ( $S_n(\lambda, t)$ ) may evolve over time. Moreover, possible mechanical distortions (location of intermediate and exit slits) associated with temperature gradients can change the responsivity of the instrument.

### 2.3. SOLAR/SOLSPEC SSI Equation – Real Case

With the main correction factors, Equation (2) allows one to determine a more realistic SOLAR/SOLSPEC SSI evolution over time. We have

$$SSI_R(\lambda, t) = SSI_S(\lambda, t) \times \frac{1}{1 - \frac{\alpha_T(\lambda, t)}{100} \times (T_P - T_S(t))} \times \frac{1}{Deg(\lambda, t)} \times \frac{1}{I_E(\lambda, t)}, \quad (2)$$



**Figure 3** The red curve represents the UV PM temperature evolution during a calibration test. The SOLAR/SOLSPEC signal ( $S_n(t)$  at 210.2 nm) evolves during a short time period (the blue curve). This instability effect should be corrected for.

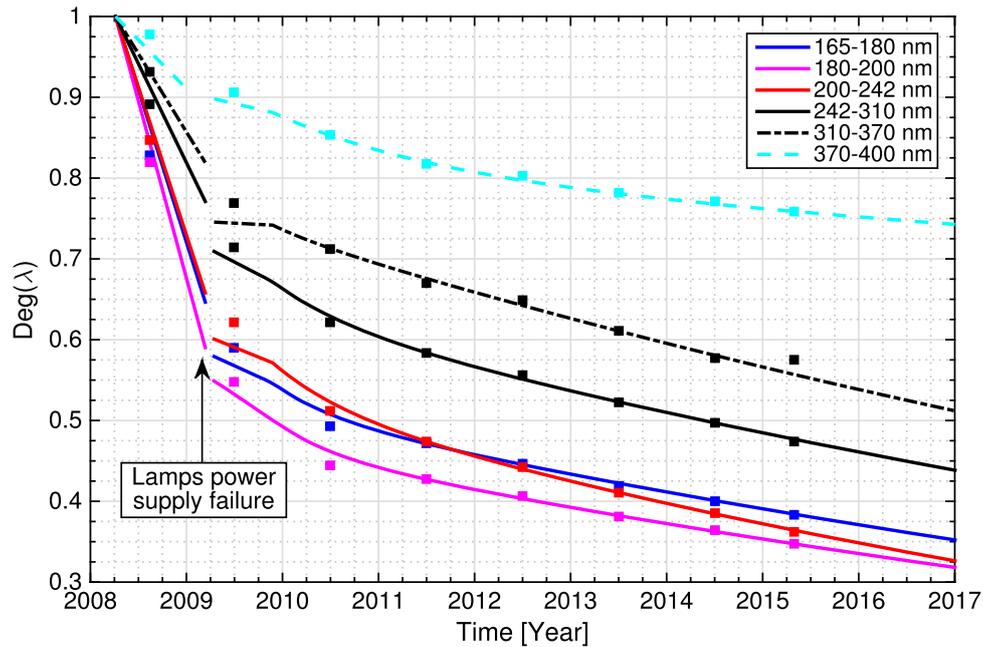
where  $\alpha_T(\lambda, t)$  is the temperature coefficient of the UV PM ( $\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ).  $T_P$  represents the temperature reference of the UV PM during ground calibration ( $23.3 \text{ } ^\circ\text{C}$ ).  $T_S(t)$  (in  $^\circ\text{C}$ ) represents the temperature of the UV PM in space.  $\text{Deg}(\lambda, t)$  characterizes the degradation of the instrument (dimensionless factor where  $\text{Deg}(\lambda, t) \leq 1$ ). The SOLAR/SOLSPEC internal optics and the quartz-plate degradations can be monitored. Correction of the absolute responsivity ( $R(\lambda, t)$ ) degradation of the instrument could have been obtained with the deuterium lamps calibration during a period.  $I_E(\lambda, t)$  corresponds to instrumental effects that impact the optical quality of the instrument.  $I_E(\lambda, t)$  is a dimensionless factor, which is equal to 1 for an optimal calibration of the instrument at a temperature of  $23.3 \text{ } ^\circ\text{C}$  such as the absolute calibration at the PTB.

#### 2.4. Reversible Instrumental Effects Mainly Depicted by the $I_E(\lambda, t)$ Dimensionless Factor

Recent tests (March 2016) were realized to better understand the behavior of the SOLAR/SOLSPEC instrument. The scanning mechanism was maintained at a fixed position in order to measure the SSI evolution over time at a given wavelength (210.2 nm). This test highlights that the instrument is unstable during a short time period ( $\sim 6 \%$  of variation). It was repeated several times (Figure 3), which shows the reversibility of the instrumental effect ( $I_E(\lambda, t)$ ). SOLAR/SOLSPEC measurements during 20 minutes show SSI variations that are above the expected values during a solar cycle. The thermo-mechanical stability of the instrument is questionable and requires an opto-thermo-mechanical analysis. One can notice that during SOLAR/SOLSPEC switch-on, the signature of the signal is slightly different. Currently, we try to understand the link between the SOLAR/SOLSPEC UV photomultiplier (UV PM) temperature and the measured signal.

#### 2.5. Irreversible Instrumental Effects Mainly Depicted by the $\text{Deg}(\lambda, t)$ Dimensionless Factor

Until April 2009, the degradation of the instrument ( $\text{Deg}(\lambda, t)$ ) has been important (Figure 4) and was wavelength dependent. There is a dramatic aging due to the use of deuterium



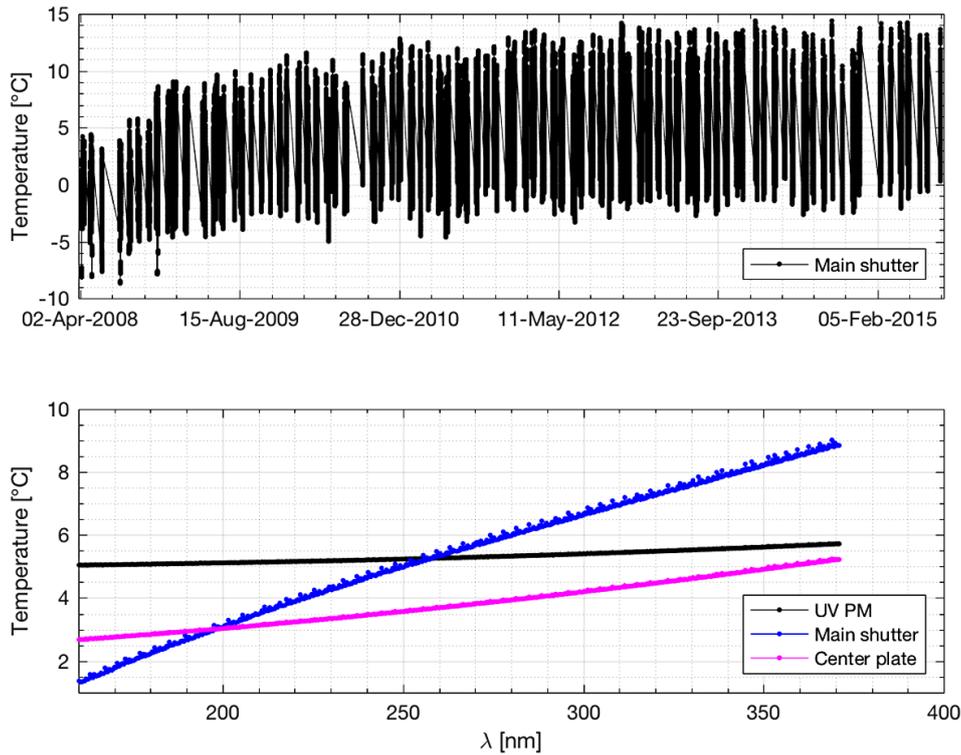
**Figure 4** For different spectral bands, the evolution of the degradation during time is plotted. The square markers represent the annual mean measurements for each spectral band.

lamps. From April 2009 to mid-2010, the degradation began to decrease. Since mid-2010, the SOLAR/SOLSPEC degradation follows a two-term exponential model where two degradation modes exist. The instrument is composed of several optical elements, which have different degradation time processes. This law is demonstrated for different wavelengths of the instrument with different time responses. As a reminder, the instrument contains four lamps (nominal and spare) for checking the responsivity ( $R(\lambda, t)$ ) of the ‘UV’ and ‘VIS’ spectrometers in order to correct for the degradation. As explained in Section 2, the aging correction with the lamps is not trivial. This work is still in progress. First of all, we can make the assumption that the degradation follows an exponential law to control the ability of SOLAR/SOLSPEC for measuring UV variability.

## 2.6. SOLAR/SOLSPEC Main Temperatures Evolutions – $\alpha_T(\lambda, t)$ and $I_E(\lambda, t)$

Over time, the main shutter temperature of SOLAR/SOLSPEC increases (Figure 5, top), which highlights the degradation of the instrument thermal control. One can notice a temperature increase of  $\sim 5^\circ\text{C}$  from April 2008 to mid-2015. The instrument thermal heat sink facing the Sun uses a white paint, which degrades over time (increase of solar absorption). That is another level of degradation that impacts the temperature of the instrument and introduces temperature gradients. Figure 5 (bottom) displays the mean SOLAR/SOLSPEC temperatures (UV PM, main shutter, and center plate) of the time series as a function of wavelength. As a reminder, the duration to record a solar spectrum is less than 17 minutes. Since the beginning of the mission, the measurement process has been the same. Indeed, all gratings are rotating and scanning the three ‘UV’–‘VIS’–‘IR’ spectral ranges at the same time from short wavelengths toward higher.

The mean temperature of the UV photo-multiplier (UV PM) is close to  $5^\circ\text{C}$  during each SSI measurement. During the absolute calibration at the PTB, the UV PM’s temperature was close to  $23^\circ\text{C}$ . Thus, the SSI as seen by SOLAR/SOLSPEC ( $\text{SSI}_S(\lambda, t)$ ) requires a thermal correction ( $\alpha_T(\lambda, t)$ ) of the UV PM temperature that is wavelength dependent. However,



**Figure 5** (Top) Temperature evolution of SOLAR/SOLSPEC main shutter from April 2008 to mid-2015. (Bottom) The Y-axis represents the mean temperatures (UV PM, main shutter, and SOLAR/SOLSPEC center plate) from April 2008 to mid-2015 during SSI measurement with the ‘UV’ spectrometer at a given wavelength (X-axis).

this thermal correction is weak and depends on the PM manufacturer data. One can notice that the temperature between the front face of the instrument (main shutter) and the central part (center plate) is not the same. Moreover, they change significantly during the SSI measurements. There is  $\sim 7.5^\circ\text{C}$  of variation for the front face and  $\sim 2.5^\circ\text{C}$  of variation for the central part of the instrument. There is a thermal gradient on SOLAR/SOLSPEC between the front face and the central part, which is wavelength dependent. Thus, there are mechanical distortions on SOLAR/SOLSPEC due to thermal gradients that cause displacement of intermediate and exit slits. The understanding of this phenomenon is still under study and requires a correction to SOLAR/SOLSPEC data ( $I_E(\lambda, t)$ ).

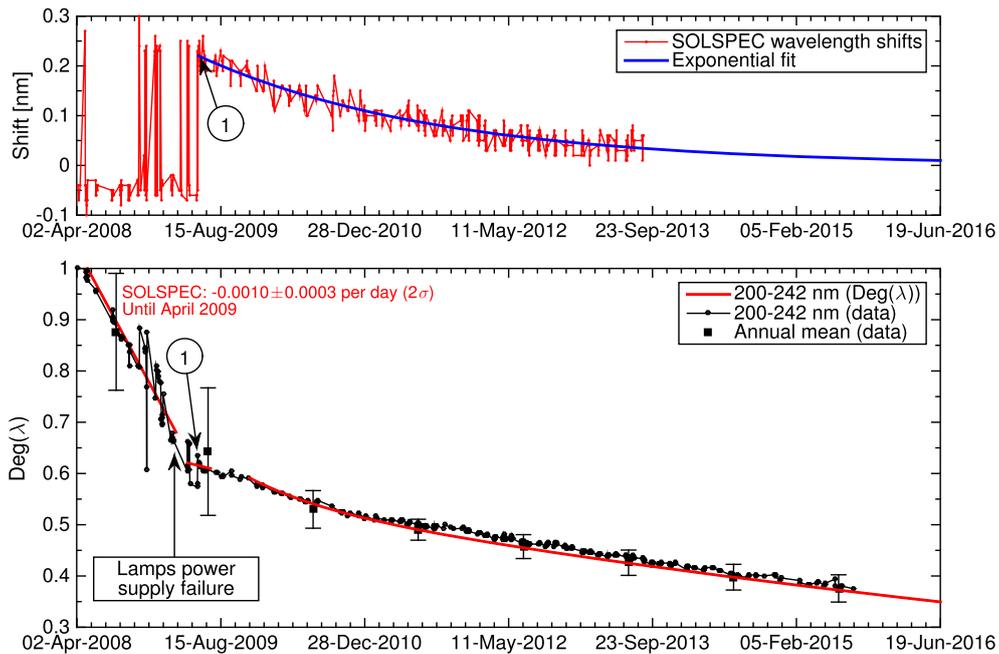
## 2.7. Wavelengths Shift Effect

As a reminder, SOLAR/SOLSPEC has a mechanism (gratings positioning) for directing the selected color to an exit slit. On SOLAR/SOLSPEC raw data, a wavelength shift was observed over time as shown in Figure 6 (top). This effect requires a correction of raw data, which follows a one-term exponential law (stability of the mechanism and its stepper motor that supports the gratings). After applying this correction, Equation (2) is applicable.

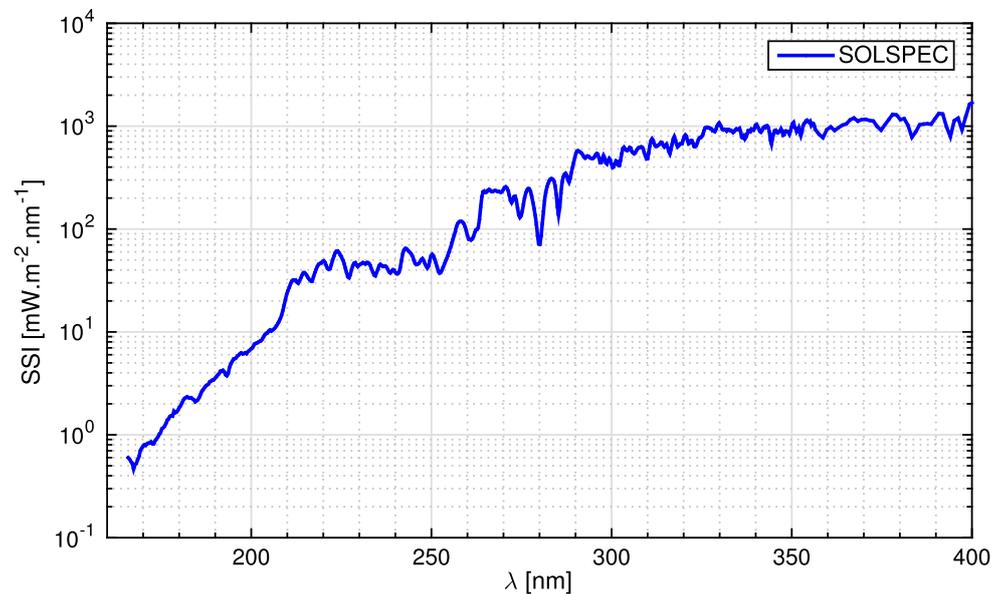
## 3. Results and Discussion

### 3.1. SOLAR/SOLSPEC Solar Irradiance from 165 to 400 nm (2008 Minimum)

Accurate determination of the solar irradiance from 165 to 400 nm is challenging. Calibration is an essential part of any space-based instrument. SOLAR/SOLSPEC response was precisely characterized (radiometric calibration, wavelength calibration, slit-function



**Figure 6** (Top) SOLAR/SOLSPEC wavelength shift. Marker 1 corresponds to a transition period. (Bottom) Estimation of the degradation during time for the 200–242 nm band. A first linear fit corresponds to the degradation of SOLAR/SOLSPEC during the use of deuterium lamps (April 2008 to April 2009). A second fit corresponds to the transition period (transient outgassing period, wavelength shift, *etc.*). A third exponential fit (Levenberg–Marquardt method) corresponds to SOLAR/SOLSPEC degradation from September 2009 to now. This fit is based on all points in the period 2009–2010 where solar activity is close to zero and on annual mean data. The uncertainty of the third exponential fit is  $\pm 0.0065$  ( $1\sigma$ ) on  $\text{Deg}(\lambda, t)$  values.



**Figure 7** Solar irradiance from 165 to 400 nm as measured by SOLAR/SOLSPEC with the proposed method.

characterization, stray-light, field of view, *etc.*) during on-ground calibration phase (Bolsée, 2012). This step will allow us to have the initial values to determine the UV SSI variability.

The main challenge is to keep the ground-based characterization of the instrument during in-space operations. Sun-observing instruments exposed to the space environment degrade due to the harsh space environment. SOLAR/SOLSPEC does not escape the rule (Figure 4).

It is very important to monitor the degradation during the time of the mission and to have in-flight calibration for correcting the raw data. The SOLAR/SOLSPEC responsivity change is derived from comparison of the transmission of the second quartz plate (infrequently used), direct quartz-plate transmission measurements, and deuterium lamps data. The main correction is obtained from deuterium lamps. SOLAR/SOLSPEC used two deuterium lamps, which may have the same behavior in space. However, their rate of use during in-space calibrations are different inducing a different aging and therefore a different correction. Thus, the correction of SOLAR/SOLSPEC raw data by using the deuterium lamps is not obvious. From Figure 1, the degradation of the signal (200–242 nm) seen by the instrument with the D1 lamp is close to  $-0.11 \pm 0.01$  % per day ( $2\sigma$ ). From Figure 6 (bottom), the degradation of the instrument (200–242 nm) is estimated at  $-0.10 \pm 0.03$  % per day. These results are consistent and facilitated by the fact that solar activity is close to zero during this period. However, the degradation of the signal (200–242 nm) seen by the instrument with the D2 lamp is higher ( $-0.18 \pm 0.01$  % per day). By standardizing lamp operating time (D1t), the degradation of the signal (200–242 nm) seen by the instrument with the D1 lamp is close to that seen by the D2 lamp. The lamps have deteriorated as the instrument.

Another approach is to define a UV solar spectrum using the properties of Equation (2). The ideal case corresponds to a configuration where the instrument is not affected by the degradation ( $\text{Deg}(\lambda, t) = 1$ ) and by the instrumental effects ( $I_E(\lambda, t) = 1$ ). We emphasize that SOLAR/SOLSPEC consists of a subtractive three double-spectrometers. Instrumental effects tend to reduce the measured SSI. Thus, the SSI maximum values measured by SOLAR/SOLSPEC ( $\text{SSI}_S(\lambda, t)$ ) from April 2008 to December 2008 correspond to the most probable SSI values of the real UV solar spectrum during the 2008 minimum. The red curve (Figure 2) is close to the most probable UV solar spectrum without temperature coefficient of the UV PM correction. Most of the SSI values used on this UV solar spectrum are derived from SOLAR/SOLSPEC spectra acquired from April 2008 to June 2008 (instrument BOL and quiet Sun). Figure 7 displays the UV solar spectrum using the thermal correction ( $\alpha_T(\lambda, t)$ ) at the temperature associated with the wavelength measurement (Figure 5, bottom). Two SOLAR/SOLSPEC spectrometers ('UV' spectral band between 165.86 and 356.26 nm and the 'VIS' spectral band between 356.50 and 400.42 nm) were used to obtain this UV solar spectrum (resolution and uncertainty optimization).

### 3.2. Definition of the SOLAR/SOLSPEC Analyzed Spectral Bands

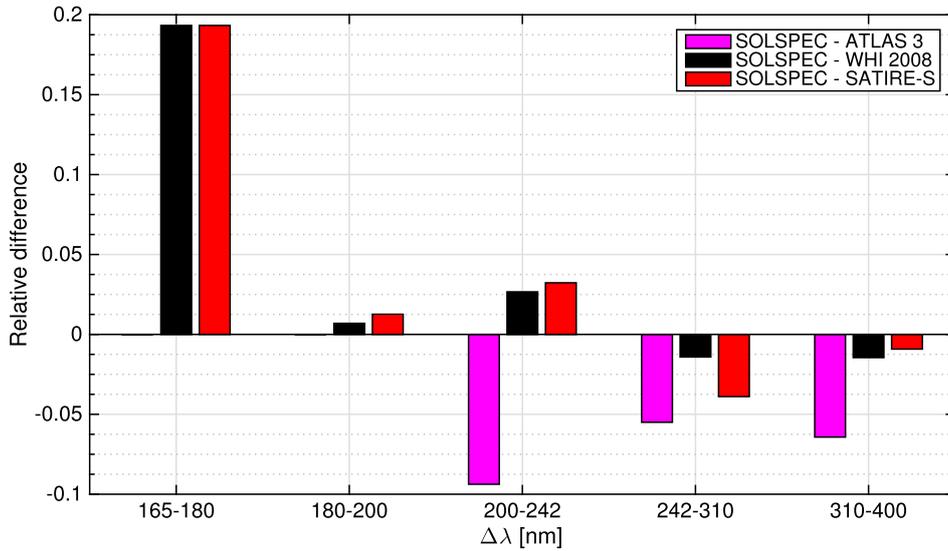
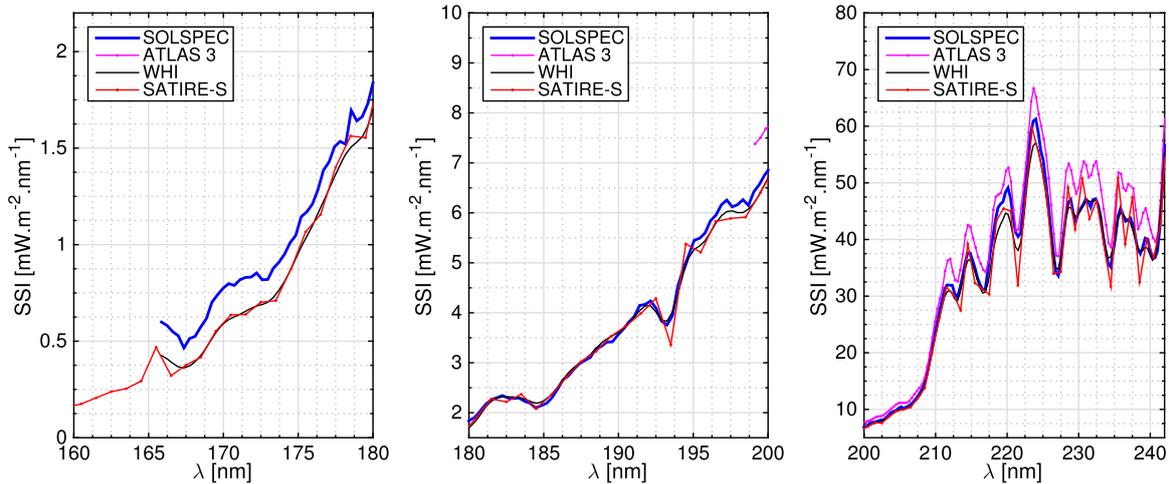
To assess the SOLAR/SOLSPEC UV spectrum (Figure 7), comparisons are needed with reference spectra (ATLAS 3, WHI 2008) or model (SATIRE-S). In this article, we limited our study to a comparison with the SATIRE-S semi-empirical model. However, other solar models exist and could be compared. Several spectral bands considered as important absorption bands of solar radiation (Brasseur and Solomon, 2005) were selected in order to compare different data sets (Table 1) and to increase the number of sample data to be analyzed (for the UV solar variability, see Section 3.5).

### 3.3. Differences Between SOLAR/SOLSPEC and Different Reference Spectra

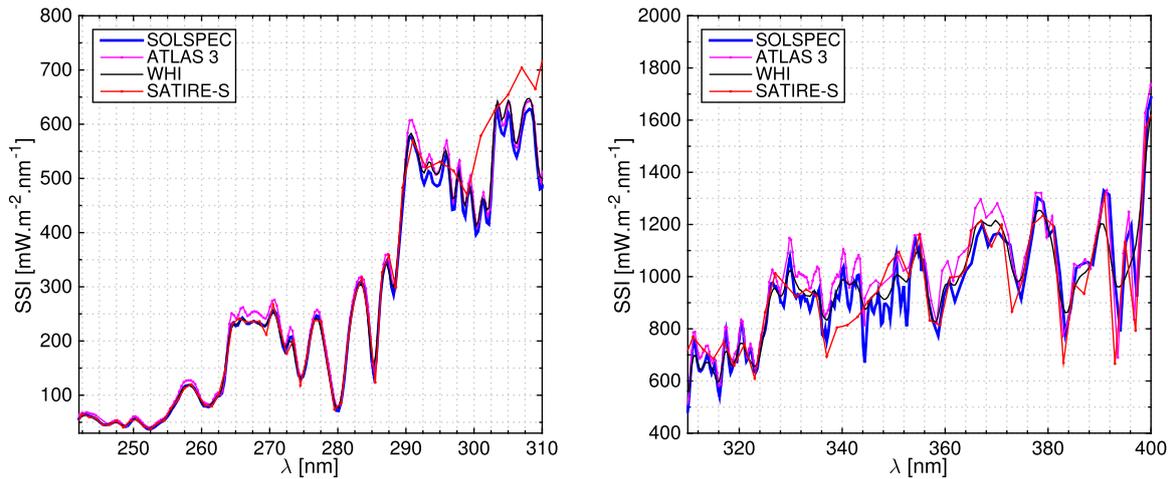
Figure 8 displays the relative differences between SOLAR/SOLSPEC and different reference spectra (ATLAS 3, WHI 2008) or model (SATIRE-S). WHI 2008 solar spectrum was convolved to the SOLAR/SOLSPEC resolution. The SSI variability calculated from the SATIRE-S semi-empirical model is based on the WHI 2008 reference spectra (Yeo *et al.*, 2014) for some wavelength bands.

**Table 1** Important absorption bands of solar radiation in the mesosphere, stratosphere, and troposphere.

$\Delta\lambda$ [nm]	Absorber	Principal location
165–200	O <sub>2</sub> Schumann–Runge bands	Thermosphere/Mesosphere
200–242	O <sub>2</sub> Herzberg continuum/O <sub>3</sub> Hartley band	Stratosphere
242–310	O <sub>3</sub> Hartley band	Stratosphere
310–400	O <sub>3</sub> Huggins band	Stratosphere/Troposphere


**Figure 8** Relative differences between SOLAR/SOLSPEC and different reference spectra (ATLAS 3, WHI 2008) or model (SATIRE-S).

**Figure 9** Solar irradiance for three spectral bands (165–180 nm, 180–200 nm and 200–242 nm) obtained with SOLAR/SOLSPEC, ATLAS 3, WHI 2008, and SATIRE-S.

Figures 9 and 10 display SSI from 165 to 400 nm for SOLAR/SOLSPEC, ATLAS 3, WHI 2008, and SATIRE-S. Between 180 and 400 nm, difference between SOLAR/SOLSPEC and WHI 2008 or SATIRE-S is less than 5 % while the difference between SOLAR/SOLSPEC and ATLAS 3 is greater than 10 %. Data used in the ATLAS 3 spectrum suffered a 1.4 % reduction (Thuillier *et al.*, 2003). ATLAS 3 was nor-

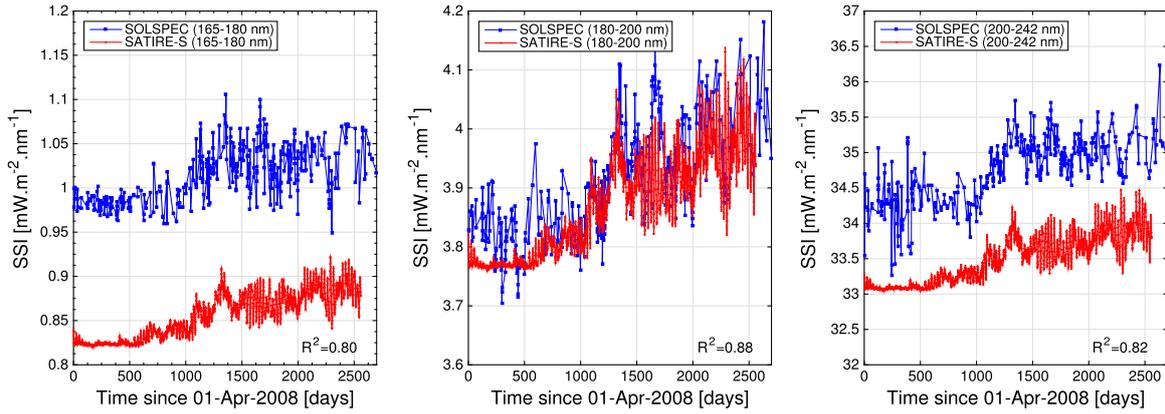


**Figure 10** Solar irradiance for two spectral bands (242–310 nm and 310–400 nm) obtained with SOLAR/SOLSPEC, ATLAS 3, WHI 2008, and SATIRE-S.

malized with a standard value of the total solar irradiance (TSI) of  $1367.7 \text{ W m}^{-2}$ . Between 200 and 2400 nm, ATLAS 3 solar illumination is equal to  $1315.7 \text{ W m}^{-2}$  in agreement with a TSI of  $1367.7 \text{ W m}^{-2}$ . Today, the consensus absolute value of the TSI is close to  $1361 - 1362 \text{ W m}^{-2}$  (Kopp and Lean, 2011; Schmutz *et al.*, 2013; Meftah *et al.*, 2014b). It seems that the normalization of the ATLAS 3 spectrum is insufficient and could explain the greatest SSI values. Thus, the uncertainty analysis of UV and visible data obtained during the ATLAS 3 mission is questionable. Conversely, SOLAR/SOLSPEC with its uncertainty budget, the WHI 2008 solar spectrum, and the SATIRE-S solar spectrum were found to be in good agreement in the 180–400 nm spectral band. Between 165 and 180 nm, the differences between SOLAR/SOLSPEC and WHI 2008 or SATIRE-S are of  $\sim 20\%$ . In this spectral band, the agreement is not good. One can notice that the SOLAR/SOLSPEC SSI from 165 to 180 nm is greater than the WHI 2008 SSI or the SATIRE-S SSI in the same band. This may be due to a SOLAR/SOLSPEC ground-based calibration error and or the linearization of the UV signal at low wavelengths. However, we do not exclude that the WHI 2008 SSI is smaller in this spectral band and requires a correction. As a reminder, one can notice that SATIRE-S is wedged on the measurements made by WHI 2008.

### 3.4. Interest of the UV SSI Variability and Difficulty to Perform Measurements

Precise UV SSI variability measurements are required to quantify the top-down mechanism amplifying UV solar forcing on the climate despite the fact that the UV range (115.5–400 nm) represents only  $\sim 7.7\%$  of the TSI. The main uncertainty in the solar models concerns the wavelength range between 220 and 400 nm, where the magnitude of the variations differs by as much as a factor of three between models (Ermolli *et al.*, 2013). UV wavelengths can vary significantly during solar cycles. *SOLAR STellar Irradiance Comparison Experiment* (SOLSTICE, 115–320 nm) and *Spectral Irradiance Monitor* (SIM, 300–2400 nm) (Harder *et al.*, 2005) measurements onboard the *Solar Radiation and Climate Experiment* (SORCE) space-based mission exhibit an unexpected behavior (Harder *et al.*, 2009). Currently there is insufficient observational evidence to validate the spectral variations observed by SOLSTICE and SIM. Haigh *et al.* (2010) have showed that such a spectral variability would lead to a significant change in the understanding of ozone evolution and atmospheric dynamics. The UV variability yielded by SIM and SOLSTICE indicates that the Sun could have substantially contributed to the observed trends of stratospheric ozone



**Figure 11** UV SSI variability in three spectral bands (165–180, 180–200, and 200–242 nm) during Solar Cycle 24. The blue curves with dots correspond to the measurement made by SOLAR/SOLSPEC. The red curves represent the values obtained with the SATIRE-S model.  $R^2$  is the Pearson linear correlation coefficient between SOLAR/SOLSPEC and SATIRE-S data.

from 2004 to 2007. There is an ongoing discussion whether SOLSTICE and SIM did reveal a real solar behavior, or if its measurements were affected by uncorrected sensitivity drifts (Lean and DeLand, 2012). Overall, the comparison shows that the atmospheric changes simulated with the 3D chemistry–climate Solar Climate Ozone Links (SOCOL) model driven by the SIM and SOLSTICE SSI are closest to the atmospheric measurements (Shapiro *et al.*, 2013). UV SSI variations measurements are questionable and new time series obtained by space-based instruments are of great interest.

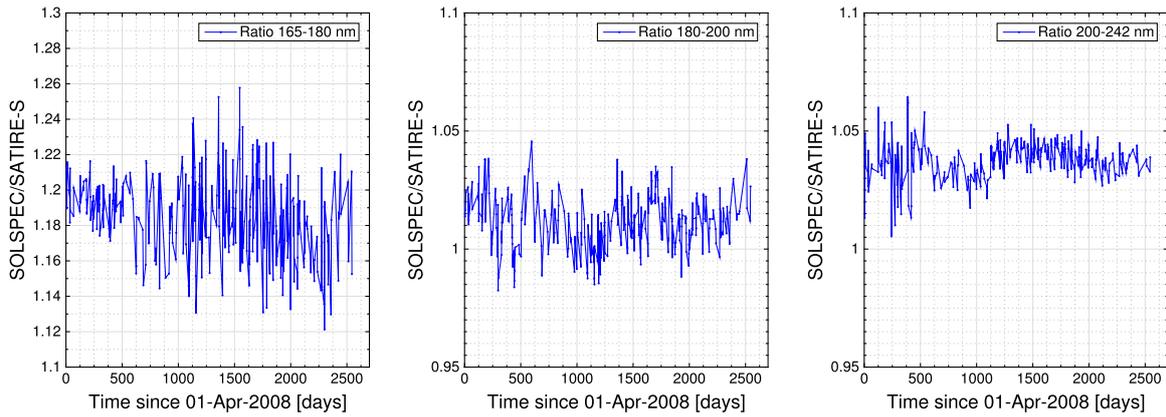
### 3.5. SOLAR/SOLSPEC SSI Variations in Three Spectral Bands

SOLAR/SOLSPEC provides important UV SSI variations contribution monitoring during Solar Cycle 24. We limit this analysis to three spectral bands (165–180 nm, 180–200 nm, and 200–242 nm) due to SOLAR/SOLSPEC instrument effects (Section 2). Equation (3) allows one to determine the SOLAR/SOLSPEC SSI evolution over time in three spectral bands.

$$SSI_{\Delta\lambda}(t_d) = \frac{1}{\Delta\lambda} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} SSI_R(\lambda, t_d) d\lambda, \quad (3)$$

where  $SSI_{\Delta\lambda}(t_d)$  is the mean SOLAR/SOLSPEC SSI value in the desired spectral band ( $\Delta\lambda$ ) over time, and  $t_d$  corresponds to a daily mean time.

With this method, we have collected quantitative data in a spectral band to carry out statistical analysis of the evolution of the mean value ( $SSI_{\Delta\lambda}(t_d)$ ). Figure 11 displays the UV SSI variations as seen by the SOLAR/SOLSPEC instrument during Solar Cycle 24. Similarly, we plotted the SATIRE-S SSI variations in three spectral bands (165–180 nm, 180–200 nm, and 200–242 nm). Figure 12 displays the direct comparison between the ratio SOLAR/SOLSPEC over SATIRE-S for the period between April 2010 and August 2015. The ratio indicates that both data sets agree within  $\pm 5\%$  for the peak-to-peak values. The absolute differences between SOLAR/SOLSPEC and SATIRE-S time series depend on the initial SOLAR/SOLSPEC values (see solar spectrum defined in Figure 7). Absolute deviations correspond to those given in Table 9. In the different spectral bands, the Pearson correlation coefficients ( $R^2$ ) between SOLAR/SOLSPEC and SATIRE-S time series are higher than 0.8 that might indicate very strong relationship during same time operation. In the 180–200 nm spectral band,  $R^2$  between SOLAR/SOLSPEC and SATIRE-S time series is close



**Figure 12** Data comparison between SOLAR/SOLSPEC and SATIRE-S in three spectral bands (165 – 180, 180 – 200, and 200 – 242 nm).

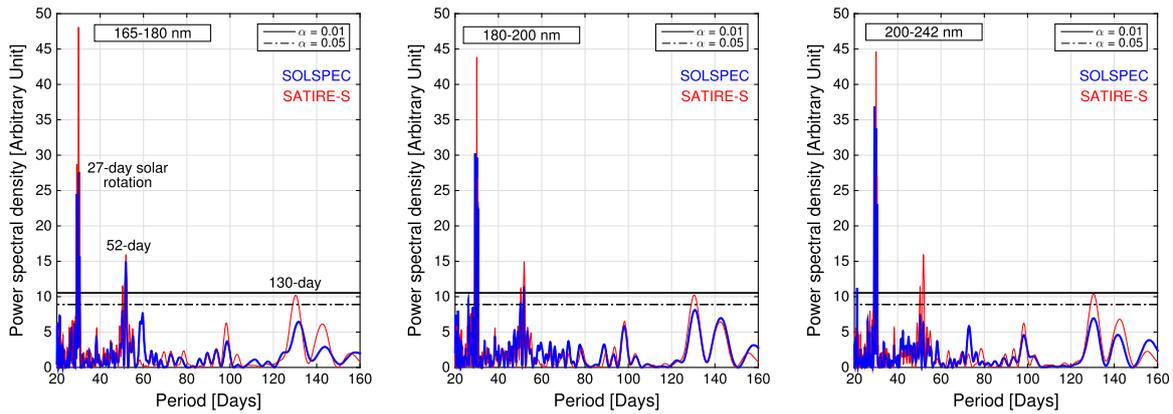
**Table 2** Maximum UV SSI variations from 2008 to 2015 for SOLAR/SOLSPEC (with statistical uncertainty), SATIRE-S, and SORCE/SOLSTICE.

$\Delta\lambda$ [nm]	SOLAR/SOLSPEC	SATIRE-S	SORCE/SOLSTICE
Lyman- $\alpha$ (comparison)	–	–	$\sim 28\%$
165 – 180	$\sim 7.0 \pm 2.0\%$ ( $1\sigma$ )	$\sim 6.7\%$	$\sim 8.3\%$
180 – 200	$\sim 6.9 \pm 2.5\%$ ( $1\sigma$ )	$\sim 5.4\%$	$\sim 8.2\%$
200 – 242	$\sim 3.5 \pm 1.7\%$ ( $1\sigma$ )	$\sim 2.1\%$	$\sim 3.1\%$

to 0.88. In this spectral band, the similarities are the best between SOLAR/SOLSPEC and SATIRE-S (UV variability and absolute value). It is also in this band that the instrument is the most stable (temperature gradient between the front part (main shutter) and the center plate is close to zero as seen in Figure 5). These comparisons were not made with the SORCE instruments because there is a data gap in 2013. Indeed, all SORCE instruments ceased operations from July 30, 2013 to December 22, 2013 due to an anomaly of the satellite (battery degradation).

For each data set, we compute the difference between the minimum and the maximum of the UV SSI variations from 2008 to 2015 (Table 2). Each data set was filtered with a 51.9-days moving mean. In the 165 – 180 nm spectral band, the results are close for each data set. In the 180 – 200 nm spectral band, SOLAR/SOLSPEC maximum UV SSI variation is between SATIRE-S and SORCE/SOLSTICE. In the 200 – 242 nm spectral band, SOLAR/SOLSPEC maximum UV SSI is slightly higher than SORCE/SOLSTICE maximum variation. However, there is a significant difference with SATIRE-S maximum SSI variation from 2008 to 2015. This difference can be explained by an instrumental effect (see Sections 2.4–2.7) and by the use of a wider spectral band of analysis ( $\Delta\lambda = 42$  nm).

For a better comparison of the results, a spectral analysis for each data set was carried out. We took the same time of observations as those made by SOLAR/SOLSPEC from 2008 to 2015. Figure 13 displays the Lomb–Scargle periodograms of two time series (daily mean), which show the link between SOLAR/SOLSPEC and the SATIRE-S semi-empirical model. Similar solar periodicities were highlighted ( $\sim 27$ ,  $\sim 52$ , and  $\sim 130$  days). One can notice a SOLAR/SOLSPEC solar periodicity  $\sim 60$  days (not significant) in the 165 – 180 nm spectral band. This period was also observed with the *Sun Ecartometry Sensor* (SES) of the *Picard* mission at 782 nm, which is also observed in *Picard* solar radius data and sunspot number data.



**Figure 13** Lomb–Scargle periodogram for unevenly sampled time series (SOLAR/SOLSPEC) in three spectral bands (165–180, 180–200, and 200–242 nm) from 2008 to 2015. The blue curves correspond to the SOLAR/SOLSPEC periodogram. The red curves correspond to the SATIRE-S periodogram.  $\alpha$  correspond to the statistical significance levels (0.01 corresponds to 99 % significance level).

## 4. Conclusions

SOLAR/SOLSPEC provides SSI data since April 2008 without discontinuity. Operations were very well managed since the beginning of the mission, where there is a repeatability of the observation sequences. The instrument degradation process corresponds to a two-term exponential model. A method was developed to determine the SOLAR/SOLSPEC SSI evolution during Solar Cycle 24. SOLAR/SOLSPEC provides preliminary new time series of the UV solar spectral irradiance from 2008 to 2015, which are consistent with the SATIRE-S semi-empirical model. During this period, the peak-to-peak UV variation (data with 51.9-days moving mean) is close to  $\sim 7\%$  in the 165–200 nm spectral band from 2008 to 2015. In the 200–242 nm spectral band, the peak-to-peak UV variation is close to  $\sim 3.5\%$ . The latter result has to be consolidated with a more in-depth analysis. Indeed, this result is higher than that obtained from the SATIRE-S semi-empirical model and close to the SORCE/SOLSTICE observations. SOLAR/SOLSPEC can be assumed valid for short-term variations. On longer timescales, SOLAR/SOLSPEC stability is lower and requires a better characterization of instrument effects and degradation. Finally, we plan to use the helium hollow cathode lamp to correct the data. However, we need to do a ground test to characterize the aging of the lamp.

**Acknowledgements** The SOLAR/SOLSPEC investigation is supported by the Royal Belgian Institute for Space Aeronomy, by the Centre National d’Etudes Spatiales (CNES, France), by the Bundesministerium für Forschung und Technologie (Germany), and by the Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS, France). The authors would like to thank the Laboratory for Atmospheric and Space Physics (LASP, United States) for providing the SORCE data and the Max Planck Institute for Solar System Research (Germany) for providing the SATIRE-S data. The authors gratefully acknowledge the anonymous reviewer for carefully reading the manuscript and providing constructive comments that have led to an improved paper.

**Disclosure of Potential Conflicts of Interest** The authors declare that they have no conflicts of interest.

## Appendix

See Table 3.

**Table 3** Spectral Irradiance of the Sun ( $\text{mW m}^{-2} \text{nm}^{-1}$ ) from 165 to 400 nm.

$\lambda$ [nm]	SSI	$\lambda$ [nm]	SSI	$\lambda$ [nm]	SSI	$\lambda$ [nm]	SSI
165.857	0.599	222.239	45.192	274.889	134.376	323.807	690.104
166.233	0.581	222.590	50.064	275.216	149.335	324.111	743.844
166.608	0.549	222.942	54.262	275.544	173.970	324.414	771.529
166.984	0.528	223.293	58.708	275.871	200.941	324.717	773.209
167.359	0.465	223.644	60.904	276.198	225.442	325.020	793.983
167.734	0.514	223.995	61.263	276.525	238.941	325.323	830.073
168.109	0.525	224.346	58.980	276.852	246.952	325.626	900.620
168.484	0.574	224.697	55.683	277.179	245.685	325.929	959.877
168.858	0.616	225.048	54.019	277.505	232.580	326.231	973.656
169.233	0.702	225.398	50.357	277.831	210.076	326.533	976.791
169.607	0.740	225.748	46.485	278.158	181.381	326.835	961.741
169.981	0.774	226.098	42.056	278.484	158.748	327.137	962.805
170.355	0.798	226.448	37.879	278.809	136.648	327.439	944.016
170.729	0.789	226.798	34.329	279.135	110.741	327.741	939.080
171.103	0.818	227.148	33.629	279.461	86.011	328.042	900.976
171.476	0.830	227.497	35.963	279.786	71.505	328.343	900.134
171.850	0.832	227.846	40.246	280.111	71.024	328.645	886.482
172.223	0.853	228.195	44.061	280.436	85.003	328.946	928.108
172.596	0.818	228.544	46.545	280.761	111.498	329.246	999.703
172.969	0.820	228.893	47.055	281.086	148.563	329.547	1041.406
173.342	0.878	229.242	44.662	281.411	189.079	329.848	1073.258
173.714	0.909	229.591	43.188	281.735	226.385	330.148	1030.379
174.087	0.951	229.939	44.704	282.059	257.847	330.448	986.555
174.459	1.010	230.287	45.541	282.384	276.734	330.748	930.130
174.831	1.047	230.635	46.172	282.708	294.397	331.048	918.669
175.203	1.145	230.983	47.182	283.031	306.654	331.348	932.695
175.575	1.170	231.331	46.656	283.355	309.000	331.648	929.176
175.947	1.210	231.678	45.684	283.679	304.639	331.947	897.980
176.318	1.284	232.026	47.081	284.002	294.066	332.246	926.533
176.690	1.386	232.373	47.179	284.325	263.623	332.545	929.576
177.061	1.428	232.720	46.073	284.648	218.024	332.844	907.064
177.432	1.508	233.067	44.082	284.971	163.512	333.143	911.923
177.803	1.535	233.414	40.594	285.294	136.983	333.442	891.378
178.173	1.520	233.761	38.061	285.616	162.033	333.740	868.515
178.544	1.696	234.107	35.676	285.939	223.041	334.039	888.531
178.914	1.641	234.454	35.141	286.261	283.383	334.337	916.906
179.285	1.663	234.800	37.739	286.583	319.981	334.635	939.908
179.655	1.730	235.146	40.501	286.905	340.212	334.933	927.881
180.025	1.845	235.492	44.115	287.227	348.050	335.231	933.436
180.395	1.909	235.838	45.454	287.549	334.821	335.528	951.445
180.764	2.037	236.183	44.383	287.870	300.181	335.826	880.151
181.134	2.173	236.529	43.191	288.192	284.971	336.123	777.630
181.503	2.261	236.874	43.417	288.513	308.893	336.420	769.049

**Table 3** (Continued.)

$\lambda$ [nm]	SSI	$\lambda$ [nm]	SSI	$\lambda$ [nm]	SSI	$\lambda$ [nm]	SSI
181.872	2.301	237.219	43.781	288.834	353.363	336.717	800.060
182.241	2.343	237.564	42.640	289.155	396.957	337.014	752.909
182.610	2.293	237.909	40.457	289.475	442.101	337.311	783.136
182.979	2.285	238.253	38.215	289.796	492.966	337.607	839.202
183.348	2.296	238.598	37.473	290.116	546.323	337.903	902.752
183.716	2.231	238.942	38.625	290.437	573.936	338.200	894.826
184.084	2.193	239.286	40.236	290.757	576.660	338.496	883.369
184.452	2.095	239.630	40.084	291.077	567.718	338.792	935.135
184.820	2.142	239.974	38.002	291.397	555.821	339.087	922.376
185.188	2.188	240.318	36.797	291.716	543.513	339.383	913.634
185.556	2.303	240.662	36.766	292.036	524.794	339.678	959.638
185.923	2.473	241.005	38.016	292.355	500.449	339.973	1025.538
186.291	2.660	241.348	42.228	292.674	489.369	340.269	1038.339
186.658	2.740	241.691	49.270	292.993	500.750	340.564	982.402
187.025	2.873	242.034	57.292	293.312	513.012	340.858	941.040
187.392	2.983	242.377	62.599	293.631	509.500	341.153	890.180
187.758	3.047	242.720	64.741	293.949	492.328	341.447	874.766
188.125	3.109	243.062	64.413	294.268	487.963	341.742	904.017
188.491	3.282	243.404	62.258	294.586	485.486	342.036	960.281
188.857	3.329	243.747	60.565	294.904	487.935	342.330	981.280
189.224	3.414	244.089	59.129	295.222	501.939	342.624	965.968
189.589	3.419	244.430	57.125	295.540	524.518	342.917	1003.732
189.955	3.554	244.772	54.411	295.857	542.201	343.211	1006.671
190.321	3.670	245.114	49.613	296.175	535.238	343.504	971.262
190.686	3.812	245.455	46.467	296.492	493.135	343.798	880.364
191.052	3.924	245.796	45.168	296.809	441.995	344.091	730.872
191.417	4.149	246.137	45.466	297.126	443.126	344.384	669.991
191.782	4.166	246.478	46.156	297.443	488.306	344.676	761.981
192.147	4.237	246.819	48.001	297.760	519.187	344.969	849.561
192.511	4.092	247.160	50.407	298.076	492.302	345.262	905.354
192.876	3.834	247.500	51.609	298.393	439.522	345.554	913.399
193.240	3.755	247.840	49.567	298.709	428.883	345.846	870.241
193.604	3.937	248.181	46.203	299.025	464.549	346.138	860.401
193.968	4.535	248.521	43.703	299.341	485.192	346.430	886.470
194.332	4.880	248.860	41.791	299.657	467.911	346.721	896.511
194.696	5.155	249.200	43.544	299.972	429.029	347.013	939.945
195.060	5.450	249.540	49.189	300.288	396.152	347.304	894.458
195.423	5.492	249.879	54.964	300.603	402.313	347.596	816.531
195.786	5.597	250.218	56.715	300.918	430.602	347.887	825.086
196.150	5.841	250.557	54.874	301.233	459.611	348.178	894.675
196.513	5.953	250.896	50.929	301.548	452.223	348.468	895.904
196.875	6.159	251.235	46.859	301.863	418.657	348.759	888.494
197.238	6.255	251.573	42.971	302.177	415.268	349.049	877.896

**Table 3** (Continued.)

$\lambda$ [nm]	SSI	$\lambda$ [nm]	SSI	$\lambda$ [nm]	SSI	$\lambda$ [nm]	SSI
197.601	6.121	251.912	38.629	302.492	465.414	349.340	836.923
197.963	6.164	252.250	37.231	302.806	541.064	349.630	894.882
198.325	6.264	252.588	37.782	303.120	607.579	349.920	977.397
198.687	6.147	252.926	39.788	303.434	623.870	350.210	1057.687
199.049	6.423	253.264	42.668	303.748	599.245	350.499	1085.598
199.411	6.565	253.602	46.342	304.061	583.641	350.789	980.583
199.772	6.758	253.939	49.480	304.375	579.700	351.078	952.896
200.134	6.909	254.277	51.870	304.688	596.510	351.367	882.700
200.495	7.132	254.614	55.068	305.001	621.033	351.656	917.771
200.856	7.615	254.951	59.862	305.314	612.437	351.945	964.146
201.217	7.723	255.288	65.930	305.627	567.150	352.234	876.652
201.578	7.799	255.624	73.886	305.939	549.206	352.523	809.977
201.939	7.954	255.961	79.803	306.252	539.353	352.811	875.010
202.299	8.100	256.297	87.014	306.564	552.868	353.099	996.755
202.659	8.169	256.634	94.349	306.876	580.174	353.387	1055.727
203.020	8.462	256.970	105.232	307.188	600.808	353.675	1076.958
203.380	8.929	257.306	113.687	307.500	619.688	353.963	1127.047
203.740	9.379	257.642	117.444	307.812	623.848	354.251	1143.025
204.099	9.651	257.977	118.198	308.124	628.104	354.538	1116.110
204.459	9.751	258.313	118.723	308.435	626.125	354.826	1088.138
204.818	10.196	258.648	116.944	308.746	605.675	355.113	1114.213
205.177	10.450	258.983	112.572	309.057	552.326	355.400	1021.510
205.537	10.189	259.318	104.909	309.368	512.840	355.687	1064.785
205.895	10.414	259.653	96.427	309.679	480.267	355.973	1060.818
206.254	10.649	259.988	86.326	309.990	482.944	356.260	1006.610
206.613	10.967	260.322	79.657	310.300	547.232	356.500	931.963
206.971	11.434	260.657	79.617	310.610	642.743	357.578	832.407
207.330	12.065	260.991	78.133	310.921	721.065	358.656	772.831
207.688	12.579	261.325	79.881	311.231	753.544	359.733	926.022
208.046	13.450	261.659	84.373	311.541	726.554	360.810	984.591
208.404	14.521	261.993	91.940	311.850	671.960	361.887	905.480
208.761	16.096	262.326	98.175	312.160	640.507	362.964	966.117
209.119	18.226	262.660	98.893	312.469	636.576	364.040	1023.196
209.476	20.644	262.993	103.355	312.778	643.695	365.116	1050.862
209.834	23.266	263.326	124.006	313.087	658.184	366.191	1152.841
210.191	25.272	263.659	163.071	313.396	675.946	367.266	1201.418
210.548	27.025	263.992	205.728	313.705	698.203	368.341	1116.841
210.904	29.346	264.325	230.178	314.014	691.284	369.416	1160.355
211.261	31.294	264.657	233.984	314.322	650.239	370.490	1166.743
211.617	31.991	264.990	227.793	314.631	627.903	371.563	1137.563
211.974	31.937	265.322	228.852	314.939	644.596	372.637	1122.315
212.330	31.910	265.654	237.988	315.247	666.057	373.710	992.108
212.686	30.396	265.986	243.034	315.555	623.590	374.782	914.084

**Table 3** (Continued.)

$\lambda$ [nm]	SSI	$\lambda$ [nm]	SSI	$\lambda$ [nm]	SSI	$\lambda$ [nm]	SSI
213.042	29.755	266.318	238.147	315.862	566.928	375.855	1032.612
213.397	31.406	266.649	231.847	316.170	539.636	376.927	1160.287
213.753	33.390	266.981	231.603	316.477	592.323	377.998	1303.037
214.108	35.766	267.312	234.407	316.784	667.594	379.069	1286.101
214.463	37.616	267.643	236.856	317.091	748.593	380.140	1158.626
214.818	37.616	267.974	234.994	317.398	790.203	381.211	1184.126
215.173	36.335	268.305	232.435	317.705	737.015	382.281	1014.179
215.528	34.850	268.636	232.674	318.012	668.032	383.351	780.206
215.883	33.138	268.966	229.507	318.318	630.149	384.420	879.851
216.237	31.971	269.297	227.379	318.624	645.055	385.490	1033.839
216.591	31.160	269.627	231.269	318.930	671.971	386.558	1047.708
216.946	31.196	269.957	241.787	319.236	677.292	387.627	1055.989
217.299	34.488	270.287	252.846	319.542	674.052	388.695	1045.526
217.653	37.727	270.616	257.143	319.848	732.872	389.763	1182.325
218.007	40.545	270.946	251.090	320.153	790.364	390.830	1330.439
218.360	43.420	271.275	236.991	320.459	820.567	391.897	1313.691
218.714	45.575	271.605	212.379	320.764	797.904	392.964	983.109
219.067	46.259	271.934	189.886	321.069	721.823	394.030	789.572
219.420	46.649	272.263	180.617	321.374	674.804	395.096	1131.682
219.773	48.363	272.592	190.125	321.679	685.815	396.162	1195.201
220.126	49.120	272.920	206.460	321.983	723.647	397.227	923.357
220.478	47.339	273.249	207.954	322.288	723.985	398.292	1238.139
220.831	44.101	273.577	188.891	322.592	684.011	399.357	1635.823
221.183	41.272	273.905	160.349	322.896	635.446	400.421	1718.332
221.535	40.507	274.233	136.890	323.200	632.407	–	–
221.887	41.139	274.561	129.725	323.504	646.485	–	–

## References

- Austin, J., Tourpali, K., Rozanov, E., Akiyoshi, H., Bekki, S., Bodeker, G., Brühl, C., Butchart, N., Chipperfield, M., Deushi, M., Fomichev, V.I., Giorgetta, M.A., Gray, L., Kodera, K., Lott, F., Manzini, E., Marsh, D., Matthes, K., Nagashima, T., Shibata, K., Stolarski, R.S., Struthers, H., Tian, W.: 2008, Coupled chemistry climate model simulations of the solar cycle in ozone and temperature. *J. Geophys. Res., Atmos.* **113**, D11306. [DOI](#).
- BenMoussa, A., Gissot, S., Schühle, U., Del Zanna, G., Auchère, F., Mekaoui, S., Jones, A.R., Walton, D., Eyles, C.J., Thuillier, G., Seaton, D., Dammasch, I.E., Cessateur, G., Meftah, M., Andretta, V., Berghmans, D., Bewsher, D., Bolsée, D., Bradley, L., Brown, D.S., Chamberlin, P.C., Dewitte, S., Didkovsky, L.V., Dominique, M., Eparvier, F.G., Foujols, T., Gillotay, D., Giordanengo, B., Halain, J.P., Hock, R.A., Irbah, A., Jeppesen, C., Judge, D.L., Kretzschmar, M., McMullin, D.R., Nicula, B., Schmutz, W., Ucker, G., Wieman, S., Woodraska, D., Woods, T.N.: 2013, On-orbit degradation of solar instruments. *Solar Phys.* **288**, 389. [DOI](#).
- Bolsée, D.: 2012, Métrologie de la spectrophotométrie solaire absolue: principes, mise en oeuvre et résultats; instrument solspec à bord de la station spatiale internationale (unpublished doctoral dissertation). Ph.D. thesis, Université libre de Bruxelles, École polytechnique de Bruxelles.
- Bovensmann, H., Burrows, J.P., Buchwitz, M., Frerick, J., Noël, S., Rozanov, V.V., Chance, K.V., Goede, A.P.H.: 1999, SCIAMACHY: Mission objectives and measurement modes. *J. Atmos. Sci.* **56**, 127. [DOI](#).
- Brasseur, G.P., Solomon, S.: 2005, *Aeronomy of the Middle Atmosphere: Chemistry and Physics of the Stratosphere and Mesosphere*, Springer, 3rd edn.

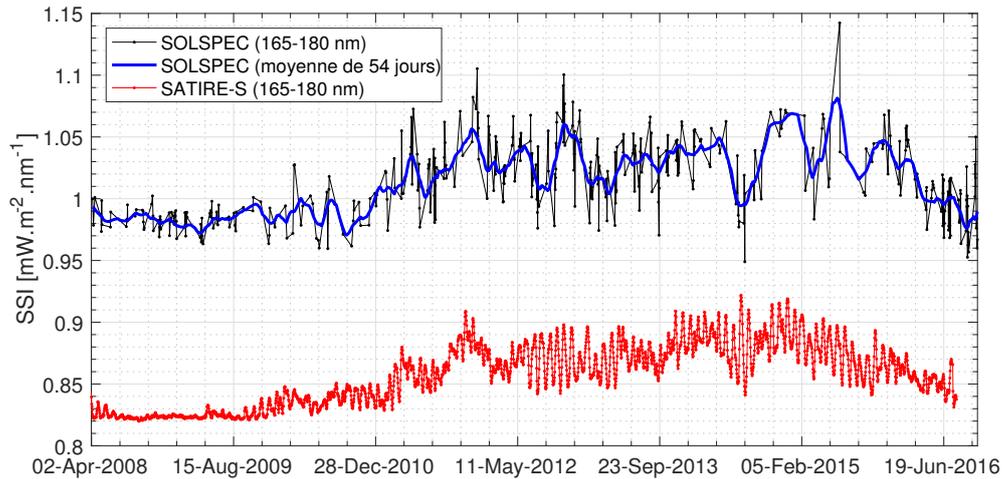
- Cebula, R.P., DeLand, M.T., Hilsenrath, E.: 1998, NOAA 11 solar backscattered ultraviolet, model 2 (SBUV/2) instrument solar spectral irradiance measurements in 1989–1994. 1. Observations and long-term calibration. *J. Geophys. Res.* **103**, 16235. DOI.
- Cebula, R.P., Hilsenrath, E., Guenther, B.: 1989, Calibration of the Shuttle borne solar backscatter ultraviolet spectrometer. In: Palmer, J.M. (ed.) *Optical Radiation Measurements II, Proc. SPIE* **1109**, 205.
- Cessateur, G., Schmutz, W., Wehrli, C., Gröbner, J., Haberleiter, M., Kretzschmar, M., Rozanov, E., Schöll, M., Shapiro, A., Thuillier, G., Egorova, T., Finsterle, W., Fox, N., Hochedez, J.-F., Koller, S., Meftah, M., Meindl, P., Nyeki, S., Pfiffner, D., Roth, H., Rouzé, M., Spescha, M., Tagirov, R., Werner, L., Wyss, J.-U.: 2016, Solar irradiance observations with PREMOS filter radiometers on the PICARD mission: In-flight performance and data release. *Astron. Astrophys.* **588**, A126. DOI.
- Ermolli, I., Matthes, K., Dudok de Wit, T., Krivova, N.A., Tourpali, K., Weber, M., Unruh, Y.C., Gray, L., Langematz, U., Pilewskie, P., Rozanov, E., Schmutz, W., Shapiro, A., Solanki, S.K., Woods, T.N.: 2013, Recent variability of the solar spectral irradiance and its impact on climate modelling. *Atmos. Chem. Phys.* **13**, 3945. DOI.
- Haigh, J.D., Winning, A.R., Toumi, R., Harder, J.W.: 2010, An influence of solar spectral variations on radiative forcing of climate. *Nature* **467**, 696. DOI.
- Harder, J.W., Fontenla, J.M., Pilewskie, P., Richard, E.C., Woods, T.N.: 2009, Trends in solar spectral irradiance variability in the visible and infrared. *Geophys. Res. Lett.* **36**, 7801. DOI.
- Harder, J., Lawrence, G., Fontenla, J., Rottman, G., Woods, T.: 2005, The spectral irradiance monitor: Scientific requirements, instrument design, and operation modes. *Solar Phys.* **230**, 141. DOI.
- Hegglin, M.I., Gettelman, A., Hoor, P., Krichevsky, R., Manney, G.L., Pan, L.L., Son, S.-W., Stiller, G., Tilmes, S., Walker, K.A., Eyring, V., Shepherd, T.G., Waugh, D., Akiyoshi, H., Añel, J.A., Austin, J., Baumgaertner, A., Bekki, S., Braesicke, P., Brühl, C., Butchart, N., Chipperfield, M., Dameris, M., Dhomse, S., Frith, S., Garny, H., Hardiman, S.C., Jöckel, P., Kinnison, D.E., Lamarque, J.F., Mancini, E., Michou, M., Morgenstern, O., Nakamura, T., Olivé, D., Pawson, S., Pitari, G., Plummer, D.A., Pyle, J.A., Rozanov, E., Scinocca, J.F., Shibata, K., Smale, D., Teyssèdre, H., Tian, W., Yamashita, Y.: 2010, Multimodel assessment of the upper troposphere and lower stratosphere: Extratropics. *J. Geophys. Res.*, *Atmos.* **115**, D00M09. DOI.
- Kopp, G., Lean, J.L.: 2011, A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance. *Geophys. Res. Lett.* **38**, 1706. DOI.
- Labs, D., Neckel, H.: 1968, The radiation of the solar photosphere from 2000 Å to 100 μm. *Z. Astrophys.* **69**, 1.
- Lean, J.L., DeLand, M.T.: 2012, How does the Sun's spectrum vary? *J. Climate* **25**, 2555. DOI.
- Meftah, M., Hochedez, J.-F., Irbah, A., Hauchecorne, A., Boumier, P., Corbard, T., Turck-Chièze, S., Abbaki, S., Assus, P., Bertran, E., Bourget, P., Buisson, F., Chaigneau, M., Damé, L., Djafer, D., Dufour, C., Etcheto, P., Ferrero, P., Hersé, M., Marcovici, J.-P., Meissonnier, M., Morand, F., Poiet, G., Prado, J.-Y., Renaud, C., Rouanet, N., Rouzé, M., Salabert, D., Vieau, A.-J.: 2014a, Picard SODISM, a space telescope to study the Sun from the middle ultraviolet to the near infrared. *Solar Phys.* **289**, 1043. DOI.
- Meftah, M., Dewitte, S., Irbah, A., Chevalier, A., Conscience, C., Crommelynck, D., Janssen, E., Mekaoui, S.: 2014b, SOVAP/Picard, a spaceborne radiometer to measure the total solar irradiance. *Solar Phys.* **289**, 1885. DOI.
- Neckel, H., Labs, D.: 1981, Improved data of solar spectral irradiance from 0.33 to 1.25 microns. *Solar Phys.* **74**, 231. DOI.
- Neckel, H., Labs, D.: 1984, The solar radiation between 3300 and 12 500 Å. *Solar Phys.* **90**, 205. DOI.
- Oman, L.D., Plummer, D.A., Waugh, D.W., Austin, J., Scinocca, J.F., Douglass, A.R., Salawitch, R.J., Canty, T., Akiyoshi, H., Bekki, S., Braesicke, P., Butchart, N., Chipperfield, M.P., Cugnet, D., Dhomse, S., Eyring, V., Frith, S., Hardiman, S.C., Kinnison, D.E., Lamarque, J.-F., Mancini, E., Marchand, M., Michou, M., Morgenstern, O., Nakamura, T., Nielsen, J.E., Olivé, D., Pitari, G., Pyle, J., Rozanov, E., Shepherd, T.G., Shibata, K., Stolarski, R.S., Teyssèdre, H., Tian, W., Yamashita, Y., Ziemke, J.R.: 2010, Multimodel assessment of the factors driving stratospheric ozone evolution over the 21st century. *J. Geophys. Res., Atmos.* **115**, D24306. DOI.
- Pagarán, J., Weber, M., Burrows, J.: 2009, Solar variability from 240 to 1750 nm in terms of faculae brightening and sunspot darkening from SCIAMACHY. *Astrophys. J.* **700**, 1884. DOI.
- Pagarán, J., Harder, J.W., Weber, M., Floyd, L.E., Burrows, J.P.: 2011, Intercomparison of SCIAMACHY and SIM vis-IR irradiance over several solar rotational timescales. *Astron. Astrophys.* **528**, A67. DOI.
- Schmutz, W., Fehlmann, A., Finsterle, W., Kopp, G., Thuillier, G.: 2013, Total solar irradiance measurements with PREMOS/PICARD. In: *AIP Conf. Proc., Am. Inst. Phys. Conf. Ser.* **1531**, 624. DOI.
- Shapiro, A.V., Rozanov, E.V., Shapiro, A.I., Egorova, T.A., Harder, J., Weber, M., Smith, A.K., Schmutz, W., Peter, T.: 2013, The role of the solar irradiance variability in the evolution of the middle atmosphere during 2004–2009. *J. Geophys. Res., Atmos.* **118**, 3781. DOI.

- Strahan, S.E., Douglass, A.R., Stolarski, R.S., Akiyoshi, H., Bekki, S., Braesicke, P., Butchart, N., Chipperfield, M.P., Cugnet, D., Dhomse, S., Frith, S.M., Gettelman, A., Hardiman, S.C., Kinnison, D.E., Lamarque, J.-F., Mancini, E., Marchand, M., Michou, M., Morgenstern, O., Nakamura, T., Oliv  , D., Pawson, S., Pitari, G., Plummer, D.A., Pyle, J.A., Scinocca, J.F., Shepherd, T.G., Shibata, K., Smale, D., Teysse  re, H., Tian, W., Yamashita, Y.: 2011, Using transport diagnostics to understand chemistry climate model ozone simulations. *J. Geophys. Res., Atmos.* **116**, D17302. [DOI](#).
- Sukhodolov, T., Rozanov, E., Ball, W.T., Bais, A., Tourpali, K., Shapiro, A.I., Telford, P., Smyshlyaev, S., Fomin, B., Sander, R., Bossay, S., Bekki, S., Marchand, M., Chipperfield, M.P., Dhomse, S., Haigh, J.D., Peter, T., Schmutz, W.: 2016, Evaluation of simulated photolysis rates and their response to solar irradiance variability. *J. Geophys. Res., Atmos.* **121**(10), 6066. 2016. [DOI](#).
- Thuillier, G., Hers  , M., Labs, D., Foujols, T., Peetermans, W., Gillotay, D., Simon, P.C., Mandel, H.: 2003, The solar spectral irradiance from 200 to 2400 nm as measured by the SOLSPEC spectrometer from the Atlas and Eureca Missions. *Solar Phys.* **214**, 1. [DOI](#).
- Thuillier, G., Foujols, T., Bols  e, D., Gillotay, D., Hers  , M., Peetermans, W., Decuyper, W., Mandel, H., Sperfeld, P., Pape, S., Taubert, D.R., Hartmann, J.: 2009, SOLAR/SOLSPEC: Scientific objectives, instrument performance and its absolute calibration using a blackbody as primary standard source. *Solar Phys.* **257**, 185. [DOI](#).
- von Hobe, M., Bekki, S., Borrmann, S., Cairo, F., D'Amato, F., Di Donfrancesco, G., D  rnbrack, A., Ebersoldt, A., Ebert, M., Emde, C., Engel, I., Ern, M., Frey, W., Genco, S., Griessbach, S., Groo  , J.-U., Gulde, T., G  nther, G., H  sen, E., Hoffmann, L., Homonnai, V., Hoyle, C.R., Isaksen, I.S.A., Jackson, D.R., J  nosi, I.M., Jones, R.L., Kandler, K., Kalicinsky, C., Keil, A., Khaykin, S.M., Khosrawi, F., Kivi, R., Kuttippurath, J., Laube, J.C., Lef  vre, F., Lehmann, R., Ludmann, S., Luo, B.P., Marchand, M., Meyer, J., Mitev, V., Molleker, S., M  ller, R., Oelhaf, H., Olschewski, F., Orsolini, Y., Peter, T., Pfeilsticker, K., Piesch, C., Pitts, M.C., Poole, L.R., Pope, F.D., Ravagnani, F., Rex, M., Riese, M., R  ckmann, T., Rognerud, B., Roiger, A., Rolf, C., Santee, M.L., Scheibe, M., Schiller, C., Schlager, H., Siciliani de Cumis, M., Sitnikov, N., S  vde, O.A., Spang, R., Spelten, N., Stordal, F., Sumi  nska-Ebersoldt, O., Ulanovski, A., Ungermann, J., Viciani, S., Volk, C.M., vom Scheidt, M., von der Gathen, P., Walker, K., Wegner, T., Weigel, R., Weinbruch, S., Wetzol, G., Wienhold, F.G., Wohltmann, I., Woiwode, W., Young, I.A.K., Yushkov, V., Zobrist, B., Strohm, F.: 2013, Reconciliation of essential process parameters for an enhanced predictability of Arctic stratospheric ozone loss and its climate interactions (RECONCILE): activities and results. *Atmos. Chem. Phys.* **13**, 9233. [DOI](#).
- Woods, T.N., Chamberlin, P.C., Harder, J.W., Hock, R.A., Snow, M., Eparvier, F.G., Fontenla, J., McClintock, W.E., Richard, E.C.: 2009, Solar Irradiance Reference Spectra (SIRS) for the 2008 Whole Heliosphere Interval (WHI). *Geophys. Res. Lett.* **36**, L01101. [DOI](#).
- Yeo, K.L., Krivova, N.A., Solanki, S.K., Glassmeier, K.H.: 2014, Reconstruction of total and spectral solar irradiance from 1974 to 2013 based on KPVT, SoHO/MDI, and SDO/HMI observations. *Astron. Astrophys.* **570**, A85. [DOI](#).

### 5.3 Conclusions

Les différents domaines de la physique mettent en évidence la nécessité de disposer d'un spectre solaire de référence (en absolu). **A partir des mesures réalisées par SOLAR/SOLSPEC (instrument à bord de la station internationale), un nouveau spectre solaire de référence a été déterminé entre 165 et 400 nm (spectre UV correspondant à un minimum d'activité solaire (avril 2008)).** Avant la mise en orbite de l'instrument SOLAR/SOLSPEC en février 2008, un étalonnage radiométrique a été réalisé au sol en utilisant le corps noir du PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt). Les mesures de calibration réalisées au PTB ont permis d'obtenir les coefficients d'étalonnage (avec leurs incertitudes) de l'instrument SOLAR/SOLSPEC en fonction de la longueur d'onde [Bolsée, 2012]. Les incertitudes des coefficients d'étalonnage introduisent des erreurs au niveau de la détermination absolue du spectre solaire mesuré par SOLAR/SOLSPEC (de 2 et 4% d'erreur au niveau de la détermination de la SSI dans la bande 165–370 nm et inférieures à 2% dans la bande 370–400 nm). Dès lors, la précision du nouveau spectre solaire de référence est au maximum de 4% (incertitude absolue sur la mesure). Ce nouveau spectre solaire de référence (165–400 nm) est compatible avec celui observé par les instruments de la mission SORCE lors du minimum d'activité solaire d'avril 2008 (comparaison réalisée en janvier 2017 (réunion entre le LASP, l'IASB et le LATMOS à Boulder) avec la dernière mise à jour des données SORCE). Le travail de comparaison est toujours en cours. A l'inverse, le spectre solaire de référence SOLAR/SOLSPEC [Meftah *et al.*, 2016a] montre des valeurs de l'éclairement solaire spectral inférieures à celles proposées par le spectre de référence ATLAS 3 [Thuillier *et al.*, 2004]. Il semblerait que les valeurs de l'éclairement solaire spectral d'ATLAS 3 soient surévaluées dans le domaine UV. Les écarts entre les spectres observés hors atmosphère peuvent être justifiés par les effets du vieillissement des instruments en orbite, par des étalonnages absolus présentant des biais de mesures et par les dates d'observation qui sont différentes (ATLAS 3 a été obtenu en novembre 1994 et SOLAR/SOLSPEC en avril 2008 au cours du cycle 24 qui présente un comportement anormal). Le nouveau spectre solaire de référence SOLAR/SOLSPEC (165–400 nm) est issu d'un étalonnage au sol très précis et d'une mesure réalisée en début de vie de l'instrument (très faible impact du vieillissement) lors d'un minimum d'activité solaire.

La connaissance précise des variations de l'éclairement solaire spectral permet d'accéder aux processus (champ magnétique) conduisant à une meilleure compréhension de la variabilité des régions extérieures du Soleil (variabilité undécennale et variabilité due à l'émergence des taches solaires dont l'effet est modulé par la rotation solaire de environ 27 jours). La connaissance précise des variations de l'éclairement solaire spectral (par-



**FIGURE 5.2** Evolution de l'éclairement solaire au cours du cycle 24.

ticulièrement dans l'UV) est aussi nécessaire pour mieux comprendre son influence sur le climat de la Terre (variabilité undécennale, valeurs absolues de l'éclairement solaire spectral lors des différentes transitions de cycles, *etc.*). Les mesures d'éclairement solaire spectral réalisées par SOLAR/SOLSPEC mettent en évidence la rotation solaire de environ 27 jours (analyse spectrale avec la méthode de Lomb-Scargle). Ces mesures sont très utiles (nécessité de faire des comparaisons avec les observations satellites d'ozone stratosphérique et les observations satellites d'ozone mésosphérique). Cependant, il est plus commode d'avoir un traceur continu (F10.7 cm, *etc.*) de l'activité solaire sur une longue durée plutôt que de disposer de spectres répartis irrégulièrement dans le temps. **Les variations de l'éclairement solaire spectral obtenues avec SOLAR/SOLSPEC au cours du cycle 24 sont compatibles avec celles issues des modèles de reconstruction** (utilisation d'une moyenne glissante de deux rotations solaires pour comparer les résultats). **L'instrument SOLAR/SOLSPEC observe des variations de l'éclairement solaire spectral de environ 7.5% pour la bande 165–200 nm et de environ 3.5% pour la bande 200–242 nm entre le minimum et le maximum d'activité du cycle solaire 24 (variabilité undécennale)**. Les mesures réalisées par SOLAR/SOLSPEC peuvent aussi apporter une information précieuse vis à vis des valeurs de l'éclairement solaire spectral dans l'UV entre le minimum de l'entre cycles 23–24 et le minimum de l'entre cycles 24–25. La transition entre le cycle 24 et le cycle 25 passera t'elle par un minimum dont la valeur de l'éclairement solaire spectral sera inférieure à celle observée lors de la transition entre le cycle 23 et le cycle 24? La Figure 5.2 montre que cette différence pourrait être faible entre le minimum de l'entre cycles 23–24 et le minimum de l'entre cycles 24–25 (à venir). Cette question reste ouverte, étant donné que le cycle solaire 24 n'est toujours pas terminé.



# Chapitre 6

## Conclusions et perspectives

### 6.1 Conclusions

Le travail effectué au cours de cette thèse consistait à apporter un nouveau regard sur quelques caractéristiques physiques du Soleil. Au cours de ces trois dernières années, mes recherches étaient principalement axées sur l'étude du Soleil et particulièrement sur la métrologie solaire. Il s'agissait entre autres de montrer comment il est possible d'intégrer de nombreuses corrections physiques dans des données instrumentales pour en extraire les caractéristiques du Soleil étudiées (diamètre du Soleil, aplatissement solaire, éclairement solaire total, spectre solaire, ...). La thèse affronte la dure réalité des expérimentateurs : celle de ne pas disposer de l'instrument dont ils rêvaient et de devoir modéliser, à posteriori, de nombreuses fonctions d'appareil ou des effets parasites.

Le premier chapitre de cette thèse a permis de présenter le contexte scientifique dans lequel se situait cette étude. Une description générale du Soleil était nécessaire afin de mieux comprendre les différents enjeux associés à ce travail de longue haleine. Je me suis aussi intéressé à certains mécanismes susceptibles d'intervenir dans les relations entre le Soleil et la Terre. L'idée étant de mieux comprendre comment le Soleil peut influencer le climat de la Terre. Cette influence peut intervenir à des échelles de temps très diverses. L'existence du réchauffement climatique n'est plus mise en doute, mais il est de plus en plus nécessaire de distinguer et de mieux quantifier les modifications d'origine anthropique de la variabilité naturelle. Ceci permettra de mieux caractériser l'ampleur du réchauffement climatique. Parmi les causes naturelles qui peuvent avoir un effet sur le climat, la variabilité solaire est probablement une des plus importantes. Les mécanismes susceptibles d'intervenir dans les relations Soleil-Climat sont donc complexes. Pour avancer dans leur compréhension, il est nécessaire de bien documenter les paramètres caractérisant la variabilité solaire et d'en comprendre l'origine, et de repré-

senter correctement ces mécanismes dans les modèles de climat. La variabilité solaire peut se manifester au travers de différents paramètres (diamètre du Soleil, aplatissement solaire, éclairement solaire total, éclairement solaire spectral, *etc.*). Dès lors, la mesure des principales caractéristiques physiques du Soleil et de leurs variations au cours du temps représentent un intérêt majeur. La Table 6.1 synthétise une partie des résultats obtenus au cours de cette thèse.

**TABLE 6.1** Valeurs des principales caractéristiques physique du Soleil (valeurs de référence recommandées par l’UAI et résultats de la thèse).

Caractéristiques	Valeurs de référence	Résultats de la thèse
Rayon solaire nominal	$R_{\odot}^N = 695\,700\text{ km}$	$R_{\odot} = 696\,156\text{ km}$
Aplatissement solaire	$\Delta_{\odot} = 9\,10^{-6}$	$\Delta_{\odot} = 8.6\,10^{-6}$
Eclairement solaire total nominal	$S_{\odot}^N = 1\,361\text{ W m}^{-2}$	$S_{\odot} = 1\,361.8\text{ W m}^{-2}$
Luminosité solaire moyenne nominale	$L_{\odot}^N = 3.828\,10^{26}\text{ W}$	$L_{\odot} = 3.830\,10^{26}\text{ W}$
Température effective nominale	$T_{eff\odot}^N = 5\,772\text{ K}^b$	$T_{eff\odot} = 5\,771\text{ K}$

Le deuxième chapitre de cette thèse a été consacré à l’étude du diamètre solaire et de ses variations au cours du temps. Des nouvelles méthodes de calculs ont été développées afin de déterminer avec précision la valeur absolue du diamètre. A partir des mesures réalisées par les instruments de la mission PICARD, la valeur absolue du rayon solaire photosphérique a été déterminée suivant plusieurs longueurs d’onde (535.7, 607.1, 782.2 et 1025 nm). La mesure la plus précise du diamètre solaire a été obtenue à 607.1 nm par l’instrument SODISM lors du passage de Vénus de juin 2012 (événement astronomique rare). Il s’agit de la première détermination du rayon solaire hors atmosphère où un bilan d’erreurs détaillé est proposé ; cette mesure est représentative de la basse photosphère. Dès lors, le rayon solaire ( $R_{\odot}$ ) mesure  $696\,156 \pm 145\text{ km}$  à  $1\sigma$ . J’ai aussi constaté que la dépendance en longueur d’onde du rayon solaire était extrêmement faible entre 535.7 nm et 1025.0 nm (différence de  $\sim 58\text{ km}$ ). A 1025.0 nm, le rayon solaire mesuré est plus petit que celui obtenu à 782.2 nm. Ce résultat est compatible avec les modèles de physique solaire ; à partir de 850.0 nm et jusqu’à  $\sim 1600.0\text{ nm}$ , plus la longueur d’onde augmente et plus le rayon solaire diminue. Les résultats obtenus par les instruments de la mission PICARD sont proches de ceux obtenus à partir des modèles théoriques du limbe solaire. Enfin, aucune tendance long-terme du rayon solaire au cours du cycle solaire 24 n’est détectable. Ce résultat est cohérent avec celui proposé par Antia (2003) où aucune évidence de la variation du rayon solaire n’a été détectée à partir de l’analyse des « modes f » (héliosismologie). En effet, il n’y a aucune corrélation évidente entre la mesure du rayon solaire et l’activité du Soleil sur de longues périodes de temps (aucune tendance à long-terme entre 2010 et 2017). A l’inverse, sur des périodes de courtes du-

rées, des variations du rayon solaire de faibles amplitudes ont été décelées (exemple : variations de  $\pm 4.7$  km avec une périodicité de  $\sim 130$  jours entre 2010 et 2011).

Le troisième chapitre de cette thèse a été consacré à l'étude de la forme du Soleil. A partir des mesures réalisées par les télescopes des missions spatiales PICARD (SODISM) et SDO (HMI), la valeur absolue de l'aplatissement solaire a été déterminée avec précision suivant plusieurs longueurs d'onde et pour deux régions de l'atmosphère solaire (photosphère et chromosphère). Les différentes mesures de l'aplatissement solaire photosphérique (à 535.7, à 617.3 et à 782.2 nm) se situent quasiment à la même altitude au niveau de l'atmosphère solaire (différence d'altitude d'environ 22 km à partir des modèles et de 58 km à partir des mesures PICARD). La forme du Soleil est presque parfaitement sphérique au niveau de la basse photosphère, avec un aplatissement solaire aux pôles ( $\Delta_{\odot}$ ) estimé à environ 8.6 millièmes (moyenne des différents résultats obtenus à 535.7 nm, à 617.3 nm et à 782.2 nm). Le rayon polaire du Soleil (basse photosphère) est plus petit que son rayon équatorial de seulement six kilomètres. Je considère que la mesure la plus précise de la valeur absolue de l'aplatissement solaire a été obtenue à 782.2 nm avec SODISM (longueur d'onde, nombre de mesures, moyenne orbitale pour chaque rotation du satellite); par ailleurs, plus la longueur d'onde d'observation est grande, et plus l'influence de l'environnement spatial sur la réponse optique de l'instrument ( $\text{psf}_t$ ) est faible. Dès lors, la différence entre le rayon équatorial et le rayon polaire photosphérique ( $\Delta r_{\odot}$ ) peut être considérée comme égale à  $5.7 \pm 0.2$  km à  $1\sigma$ . Ce résultat est compatible avec ceux issus de l'héliosismologie où  $\Delta r_{\odot}$  est égale à  $5.9 \pm 0.0$  km. La valeur absolue de l'aplatissement solaire a aussi été déterminé à 393.37 nm avec SODISM. La différence entre le rayon équatorial et le rayon polaire est égale à  $11.9 \pm 2.2$  km à  $1\sigma$ . Le rayon polaire du Soleil (chromosphère) semble être plus petit que son rayon équatorial de environ douze kilomètres (première détermination hors atmosphère à 393.37 nm). Ce résultat est surprenant et nécessite une consolidation au travers d'une analyse théorique. Enfin, il semblerait que l'aplatissement solaire photosphérique diminue très faiblement lorsque l'activité solaire augmente (entre 2010 et 2015); ce résultat a été mis en évidence à partir de l'analyse des données de l'instrument HMI de la mission SDO. Cette « diminution » semblerait aller dans le sens d'une influence du champ magnétique en minimum d'activité. Ce résultat est extrêmement intéressant; il peut nous aider à comprendre certains mécanismes associés au champ magnétique émergeant à la surface du Soleil. Il apporte aussi des informations aux modèles de structure interne du Soleil. En conclusion, la rotation du Soleil génère un aplatissement des régions polaires et le champ magnétique peut introduire une faible modulation au cours d'un cycle solaire.

Le quatrième chapitre de cette thèse a été dédié à l'étude de la valeur absolue de l'éclairement solaire total et de ses variations au cours de la phase ascendante du cycle

solaire 24. A partir des mesures réalisées par l'instrument SOVAP de la mission PICARD, la valeur absolue de l'éclairement solaire total a été déterminée avec précision. Il s'agit d'une des rares déterminations de l'éclairement solaire total hors atmosphère où un bilan d'erreurs détaillé est proposé. A partir de cette analyse, je considère que la valeur de l'éclairement solaire total est égale à  $1361.8 \pm 2.4 \text{ W m}^{-2}$  à  $1 \sigma$  ; il s'agit d'une valeur représentative du minimum solaire de 2008 à une distance de une unité astronomique. Ce résultat est compatible avec ceux obtenus à partir des instruments spatiaux de dernière génération (l'instrument TIM de la mission SORCE et le radiomètre PREMOS de la mission PICARD). Par ailleurs, les variations de l'éclairement solaire total ont aussi été mesurées entre 2010 et 2014 par le radiomètre SOVAP. Ces mesures sont très importantes puisque l'éclairement solaire total est considéré comme une variable climatique essentielle. Soulignons que seules les séries les plus longues et ininterrompues peuvent permettre d'étudier la variabilité du Soleil avec pour objectif la physique solaire, mais aussi la physique de l'atmosphère et du climat. Dès lors, les mesures réalisées par les instruments de la mission PICARD (SOVAP et PREMOS) présentent un intérêt dans le sens où elles peuvent être utilisées pour générer un composite de l'éclairement solaire total (mélange de mesures acquises par plusieurs instruments). Ces mesures apportent des informations à la série chronologique mesurée par l'instrument TIM de la mission SORCE. En effet, entre juillet 2013 et fin décembre 2013, l'instrument TIM de la mission SORCE a cessé d'observer le Soleil (anomalie du satellite liée à la dégradation des batteries).

Le cinquième chapitre de cette thèse porte sur l'étude de l'éclairement solaire spectral dans l'ultraviolet. A partir des mesures réalisées par le spectromètre SOLSPEC, un nouveau spectre solaire de référence a été déterminé entre 165 et 400 nm (spectre UV correspondant à un minimum d'activité solaire (avril 2008)). La précision du nouveau spectre solaire de référence est au maximum de 4%. Ce nouveau spectre solaire de référence (165–400 nm) est compatible avec celui observé par les instruments de la mission SORCE lors du minimum d'activité solaire d'avril 2008. A l'inverse, il montre des différences significatives avec le spectre de référence ATLAS 3 (novembre 1994). Il semblerait que les valeurs de l'éclairement solaire spectral d'ATLAS 3 soient surévaluées dans le domaine UV. Les écarts entre les spectres observés hors atmosphère peuvent être justifiés en partie par les effets du vieillissement des instruments en orbite, par des étalonnages absolus présentant des biais de mesures et par des dates d'observation différentes. Par ailleurs, les variations de l'éclairement solaire spectral ont aussi été mesurées entre 2008 et 2017 par le spectromètre SOLSPEC. Les variations de l'éclairement solaire spectral obtenues au cours du cycle 24 sont compatibles avec celles issues des modèles de reconstruction. L'instrument SOLSPEC observe des variations de l'éclairement solaire

spectral de environ 7.5% pour la bande 165–200 nm et de environ 3.5% pour la bande 200–242 nm entre le minimum et le maximum d’activité du cycle solaire 24 (variabilité undécennale). Les mesures réalisées par l’instrument SOLSPEC peuvent aussi apporter une information précieuse vis à vis des valeurs de l’éclairement solaire spectral dans l’UV entre le minimum de l’entre cycles 23–24 et le minimum de l’entre cycles 24–25. Cette question reste ouverte, étant donné que le cycle solaire 24 n’est toujours pas terminé. Cependant, il semblerait que cette différence soit faible.

## 6.2 Perspectives

Le travail effectué au cours de cette thèse a été très riche et ouvre un grand nombre de perspectives. Il met en évidence la limite des instruments actuels et la nécessité de développer de nouveaux instruments innovants utilisant de nouvelles technologies. Les caractéristiques physiques du Soleil sont extrêmement délicates à quantifier et la détermination d’un bilan d’erreurs justifié reste un sujet complexe. Par ailleurs, ce travail est à la limite des connaissances actuelles pour ce qui concerne les éléments de variabilité solaire étudiés.

### – Le diamètre du Soleil –

Il est nécessaire de continuer l’exploitation de la mission PICARD SOL dans laquelle le LATMOS est le principal investigateur. Il s’agit de poursuivre le programme d’astrométrie solaire par imagerie directe mené depuis 2011 sur le site de Calern et en partenariat avec l’Observatoire de la Côte d’Azur. Le principal objectif sera de déterminer les variations du diamètre solaire jusqu’à la fin du cycle solaire 24. A l’issue de ces mesures, il sera nécessaire de réaliser des étalonnages en laboratoire de l’instrument SODISM II (psf et facteur d’échelle du télescope). Plusieurs paramètres peuvent être analysés (effet de la température du détecteur de l’instrument sur la mesure du diamètre du Soleil, influence de la température des miroirs sur la mesure, *etc.*). De nouvelles méthodes de détermination du diamètre solaire (autres que celles basées sur la position du point d’inflexion) peuvent être proposées afin de rendre les analyses SODISM II plus robustes. Afin de réduire les dispersions de mesure du diamètre solaire, il est nécessaire de corriger les données SODISM II de l’effet de la turbulence optique. Dès lors, il serait intéressant d’essayer d’estimer le paramètre de Fried ( $r_0$ ) en utilisant les images acquises par l’instrument SODISM II (largeur à mi-hauteur ou FWHM de la dérivée première de la courbe d’assombrissement centre bord du Soleil). Il est aussi possible de réaliser des mesures SODISM II sur d’autres sites d’observation afin d’étudier l’effet de la turbulence optique en fonction de la qualité du site.

Par ailleurs, il est nécessaire de développer de nouveaux instruments spatiaux d'observation du Soleil afin de répondre à de nouveaux objectifs scientifiques (suivi de l'activité solaire, météorologie de l'espace, influence du champ magnétique sur les mesures, *etc.*). Une des perspectives serait de développer un nouvel instrument de métrologie solaire en se basant sur l'expérience acquise (SoHO, PICARD, SDO) et en s'appuyant sur les quelques recommandations suivantes :

- Analyse poussée du retour d'expérience (missions passées) ;
- Réalisation de modèles numériques (optique, thermique, opto-thermo-mécanique, *etc.*) afin de vérifier la robustesse de la conception du nouvel instrument (connaissance des principales limitations instrumentales et effets de la contamination) ;
- Mise en place de programmes R&D (Recherche et Développement) avant la phase 0 d'un projet afin d'augmenter le niveau TRL (Technology Readiness Level) des éléments critiques et de permettre les sauts technologiques ;
- Développement de maquettes afin de vérifier les performances instrumentales ;
- Mise en place d'un plan de propreté extrême (au niveau de l'instrument et du satellite et analyse des contraintes liées au lanceur). Ce qui inclut une sélection minutieuse des matériaux (haute tolérance au rayonnement, choix de matériaux utilisables dans l'ultra-vide avec les plus faibles valeurs de dégazage), une minimisation des matières organiques, et des procédures de propreté strictes pour l'instrument et les outils utilisés pendant les intégrations ;
- Mise en place du plan de Vérification-Qualification-Validation et du plan d'Assemblages, d'Intégrations et de Tests (AIT) dès la phase de conception. La méthode de réglage de l'instrument (psf mesurée proche de la psf théorique) doit être proposée à partir de la phase B du projet spatial (définition préliminaire) tout comme la méthode d'alignement optique de l'instrument ;
- Réalisation de réglages et d'étalonnages intensifs de l'instrument spatial dédié à l'étude du Soleil (essais au sol). L'étalonnage au sol de l'instrument peut être réalisé avec des sources étalonnées et traçables (détecteurs, corps noirs, synchrotrons, Soleil, *etc.*). La vérification de la stabilité des performances de l'instrument peut aussi être vérifiée lors d'un essai de balance thermique avec performances optiques. Certains étalonnages doivent être pensés pour pouvoir être réalisés en orbite. Ils seront validés lors de la recette en vol de l'instrument ;
- Nécessité de disposer de sources d'étalonnages en orbite (propres à l'instrument, les étoiles, les passages de planète, *etc.*) ;
- Répétabilité des observations (routine) et températures constantes de l'instrument en orbite. Le choix de l'orbite pour des observations solaires avec peu de vieillissement est extrêmement important. Une des meilleures orbites pour les

missions solaires est celle utilisée par SoHO au point de Lagrange L1 : elle aurait évité les problèmes rencontrés sur PICARD/SODISM qui sont liés à son orbite hélio-synchrone (variations de température de la fenêtre d'entrée du télescope) et aux effets de contamination (lanceur et/ou satellite).

– **La forme du Soleil** –

Une étude théorique de la forme du Soleil doit être entreprise afin de vérifier la différence d'aplatissement solaire entre la chromosphère et la photosphère (influence de l'atmosphère solaire). Avec l'instrument SODISM, nous obtenons une différence de 8 mas qui est peut être liée au fait que le champ magnétique est essentiellement ouvert aux pôles et fermé à l'équateur. Il peut aussi s'agir d'un effet instrumental. Par ailleurs, il est nécessaire de déterminer les variations de l'aplatissement solaire jusqu'à la fin du cycle solaire 24 en utilisant les images acquises par le télescope HMI (vérification de la faible modulation au cours d'un cycle solaire).

– **L'éclairement solaire total** –

Je vais continuer à étudier les variations de l'éclairement solaire total. Il s'agit d'une des variables climatiques essentielles. Il est nécessaire de vérifier si il existe ou non une diminution de la TSI entre chaque minima solaire depuis 1978. Dès lors, je cherche aussi à développer de nouveaux instruments permettant de réaliser ces mesures (constellation de nanosatellites, coopérations nationales et internationales, *etc.*).

– **L'éclairement solaire spectral dans l'ultraviolet** –

Concernant la variabilité solaire dans l'UV, des résultats intéressants ont été obtenus à partir de l'analyse des données du spectromètre SOLSPEC. Ils ouvrent un débat vis à vis de l'amplitude des variations dans les bandes UV au cours d'un cycle solaire. Ils remettent en question les résultats obtenus par les instruments de la mission SORCE (amplitudes et périodicités solaires). Il est donc nécessaire de continuer à travailler sur ce programme scientifique afin de déterminer les variations de l'éclairement solaire spectral entre 2008 et 2017 (fin des acquisitions de l'instrument SOLSPEC en février 2017). Un des objectifs sera de déterminer la variabilité de l'éclairement solaire dans le continuum de Herzberg (entre 200 et 242 nm). Il s'agit d'une bande spectrale où la température et l'ozone stratosphérique réagissent le plus aux variations du flux solaire. L'éclairement solaire spectral entre 200 et 242 nm peut être choisi comme indicateur quantitatif du forçage solaire sur l'ozone. Dans la stratosphère supérieure et la mésosphère, l'ozone et la température sont très sensibles aux variations dans les bandes de Schumann-Runge (180–200 nm). Il sera nécessaire de déterminer la variabilité de l'éclairement solaire dans

les bandes de Schumann-Runge. Enfin, le développement d'un nouveau spectromètre basé sur l'expérience acquise avec l'instrument SOLSPEC représente une perspective intéressante (étalonnages absolus avec incertitudes inférieures à 1%, mesures stables au cours du temps avec maîtrise du vieillissement). Les résultats obtenus au cours de cette thèse ont montré l'intérêt de réaliser des mesures précises de l'éclairement solaire spectral dans l'ultraviolet au cours de plusieurs cycles solaires.

Par ailleurs, un nouveau spectre solaire de référence nommé SOLAR-ISS (0.5–3000.0 nm) est en cours de validation et sera publié fin 2017 dans une revue scientifique à comité de lecture (M. Meftah, L. Damé, D. Bolsée *et al.*, *Astronomy & Astrophysics*). Ce nouveau spectre solaire de référence (date d'observation : avril 2008) couvre un large domaine spectral et présente des incertitudes absolues faibles (étalonnage au sol avec un corps noir et étalonnage en orbite). Dès lors, une étude fine des différences entre SOLAR-ISS et les autres spectres de référence sera réalisée afin de mieux comprendre en quoi ils sont différents.

# Publications

## Journaux

- Meftah M., Bolsée D., Damé L., Hauchecorne A., Pereira N., Irbah A., Bekki S., Cessateur G., Foujols T., Thiéblemont R. Solar Irradiance from 165 to 400 nm in 2008 and UV Variations in Three Spectral Bands During Solar Cycle 24 *Solar Physics*, Springer Verlag, 2016, 291 (12), pages 3527–3547.
- Meftah M., Chevalier A., Conscience C., Nevens S. Total solar irradiance as measured by the SOVAP radiometer onboard PICARD *Journal of Space Weather and Space Climate*, EDP sciences, 2016, 6, pp.A34.
- Meftah M., Hauchecorne A., Bush R. I., Irbah A. On HMI solar oblateness during solar cycle 24 and impact of the space environment on results *Advances in Space Research*, Elsevier, 2016, 58 (7), pp.1425-1440.
- Meftah M., Hauchecorne A., Irbah A., Corbard T., Ikhlef R., Morand F., Renaud C., Riguet F., Pradal F. On the Constancy of the Diameter of the Sun during the Rising Phase of Solar Cycle 24 *Astrophysical Journal*, American Astronomical Society, 2015, 808 (1), pp.808.4
- Meftah M., Irbah A., Hauchecorne A., Corbard T., Turck-Chièze S., Hochedez J.-F., Boumier P., Chevalier A., Dewitte S., Mekaoui S., Salabert D. et al. On the determination and constancy of the solar oblateness *Solar Physics*, Springer Verlag, 2015, 290 (3), pp.673-687.
- Meftah M., Dewitte S., Irbah A., Chevalier A., Conscience C., Crommelynck D., Janssen E., Mekaoui S. SOVAP/Picard, a spaceborne radiometer to measure the Total Solar Irradiance *Solar Physics*, Springer Verlag, 2014, 289 (5), pp.1885-1899.

## Conférences internationales

- Meftah M., Bolsée D., Hauchecorne A., Damé L., Bekki S., Pereira N. A new solar reference spectrum obtained with the SOLAR/SOLSPEC space-based spectroradiometer AGU Fall Meeting 2016, Dec 2016, San Francisco, United States. pp.SH31B-2554.
- Meftah M., Corbard T., Hauchecorne A., Irbah A., Boumier P., Chevalier A., Schmutz W., Ikhlef R., Morand F., Renaud C., Hochedez J.-F. et al. Main results of the PICARD mission. *Proceedings SPIE, Jun 2016, Edinburgh, United Kingdom*. SPIE, 9904, pp.99040Z, 2016.
- Meftah M., Hauchecorne A., Irbah A., Bekki S. The Measurement of the Solar Spectral Irradiance Variability at 782 nm during the Solar Cycle 24 using the SES on-board PICARD. European Geosciences Union General Assembly 2016, Apr 2016, Vienna, Austria. Geophysical Research Abstracts, 18, pp. EGU2016-5047.
- Meftah M., Hauchecorne A., Irbah A., Bush R. On solar oblateness measurements during the current solar cycle 24 AGU Fall Meeting 2015, Dec 2015, San Francisco, United States. pp.SH52A-01, 2015
- Meftah M., Dewitte S., Zhu P., Chevalier A., Conscience C., Irbah A. Evolution of the Total Solar Irradiance during the Rising Phase of Solar Cycle 24 2015 Sun-Climate Symposium. Multi-Decadal Variability in Sun and Earth during the Space Era, Nov 2015, Savannah, Georgia. 2015
- Meftah M., Hauchecorne A., Irbah A. Measuring the solar radius with PICARD during the rising phase of solar cycle 24 EGU General Assembly 2015, Apr 2015, Vienna, Austria. pp. EGU2015-6810, 2015

# Bibliographie

- [Allard et Hauschildt, 1995] F. Allard et P. H. Hauschildt. Model atmospheres for M (sub)dwarf stars. 1 : The base model grid. *Astrophys. J.*, 445 :433–450, Mai 1995.
- [Allen, 1973] C. W. Allen. *Astrophysical quantities*. 1973.
- [Anderson *et al.*, 1987] J. D. Anderson, G. Colombo, P. B. Espitio, E. L. Lau, et G. B. Trager. The mass, gravity field, and ephemeris of Mercury. *Icarus*, 71 :337–349, Septembre 1987.
- [Anderson *et al.*, 1991] J. D. Anderson, M. A. Slade, R. F. Jurgens, E. L. Lau, X. X. Newhall, et E. Myles. Radar and spacecraft ranging to Mercury between 1966 and 1988. *Proceedings of the Astronomical Society of Australia*, 9 :324, 1991.
- [Anderson *et al.*, 1992] J. D. Anderson, J. K. Campbell, R. F. Jurgens, et E. L. Lau. Recent developments in solar-system tests of general relativity. In *Marcel Grossmann Meeting on General Relativity*, éditeurs F. Satō et T. Nakamura, 1992.
- [Anderson et Hall, 1989] G. P. Anderson et L. A. Hall. Solar irradiance between 2000 and 3100 Angstroms with spectral band pass of 1.0 Angstroms. *J. Geophys. Res.*, 94 :6435–6441, Mai 1989.
- [Antia *et al.*, 2000] H. M. Antia, S. Basu, J. Pintar, et B. Pohl. Solar Cycle Variation in Solar f-Mode Frequencies and Radius. *Solar Phys.*, 192 :459–468, Mars 2000.
- [Antia, 2003] H. M. Antia. Does the Sun Shrink with Increasing Magnetic Activity? *Astrophys. J.*, 590 :567–572, Juin 2003.
- [Appourchaux et Pallé, 2013] T. Appourchaux et P. L. Pallé. The History of the g-mode Quest. In *Fifty Years of Seismology of the Sun and Stars*, éditeurs K. Jain, S. C. Tripathy, F. Hill, J. W. Leibacher, et A. A. Pevtsov, volume 478 de *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 125, Décembre 2013.
- [Arvesen *et al.*, 1969] J. C. Arvesen, R. N. Griffin, Jr., et B. D. Pearson, Jr. Determination of extraterrestrial solar spectral irradiance from a research aircraft. *Applied Optics*, 8 :2215, Novembre 1969.
- [Auchère *et al.*, 2000] F. Auchère, C. E. DeForest, et G. Artzner. In-Flight Determination of the Plate Scale of the Extreme-Ultraviolet Imaging Telescope. *Astrophys. J. Lett.*, 529 :L115–L117, Février 2000.
- [Auwers, 1891] A. Auwers. Der Sonnendurchmesser und der Venusdurchmesser nach den Beobachtungen an den Heliometern der deutschen Venus-Expeditionen. *Astronomische Nachrichten*, 128 :361, Décembre 1891.
- [Avrett, 1977] E. H. Avrett. Models of the Solar Atmosphere. In *The Solar Output and its Variation*, éditeur O. R. White, page 327, 1977.
- [BenMoussa *et al.*, 2013] A. BenMoussa, S. Gissot, U. Schühle, G. Del Zanna, F. Auchère, S. Mekaoui, A. R. Jones, D. Walton, C. J. Eyles, G. Thuillier, D. Seaton, I. E. Dammasch, G. Cessateur, M. Meftah, V. Andretta, D. Berghmans, D. Bewsher, D. Bolsée, L. Bradley, D. S. Brown, P. C. Chamberlin, S. Dewitte, L. V. Didkovsky, M. Dominique, F. G. Eparvier,

- T. Foujols, D. Gillotay, B. Giordanengo, J. P. Halain, R. A. Hock, A. Irbah, C. Jeppesen, D. L. Judge, M. Kretzschmar, D. R. McMullin, B. Nicula, W. Schmutz, G. Ucker, S. Wieman, D. Woodraska, et T. N. Woods. On-Orbit Degradation of Solar Instruments. *Solar Phys.*, 288 :389–434, Novembre 2013.
- [BenMoussa *et al.*, 2015] A. BenMoussa, B. Giordanengo, S. Gissot, I. E. Dammasch, M. Dominique, J.-F. Hochedez, A. Soltani, N. Bourzgui, T. Saito, U. Schühle, A. Gottwald, U. Kroth, et A. R. Jones. Degradation assessment of LYRA after 5 years on orbit - Technology Demonstration -. *Experimental Astronomy*, 39 :29–43, Mars 2015.
- [Bethe, 1939] H. A. Bethe. Energy Production in Stars. *Physical Review*, 55 :434–456, Mars 1939.
- [Birch et Downs, 1993] K. P. Birch et M. J. Downs. An Updated Edlén Equation for the Refractive Index of Air. *Metrologia*, 30 :155–162, Janvier 1993.
- [Blitz, 1993] L. Blitz. Giant molecular clouds. In *Protostars and Planets III*, éditeurs E. H. Levy et J. I. Lunine, pages 125–161, 1993.
- [Bolsée, 2012] D. Bolsée. *Métrologie de la spectrophotométrie solaire absolue : principes, mise en oeuvre et résultats ; Instrument SOLSPEC à bord de la station spatiale internationale (Unpublished doctoral dissertation)*. PhD thesis, Université libre de Bruxelles, École polytechnique de Bruxelles, 5 2012.
- [Braun *et al.*, 2005] H. Braun, M. Christl, S. Rahmstorf, A. Ganopolski, A. Mangini, C. Kubatzki, K. Roth, et B. Kromer. Possible solar origin of the 1,470-year glacial climate cycle demonstrated in a coupled model. *Nature*, 438 :208–211, Novembre 2005.
- [Bush *et al.*, 2010] R. I. Bush, M. Emilio, et J. R. Kuhn. On the Constancy of the Solar Radius. III. *Astrophys. J.*, 716 :1381–1385, Juin 2010.
- [Canavaggia et Chalonge, 1946] R. Canavaggia et D. Chalonge. Recherches sur le spectre continu du Soleil. II : Nouvelles données d’observation. *Annales d’Astrophysique*, 9 :143, Janvier 1946.
- [Capitaine *et al.*, 2003] N. Capitaine, P. T. Wallace, et J. Chapront. Expressions for IAU 2000 precession quantities. *Astron. Astrophys.*, 412 :567–586, Décembre 2003.
- [Chapman *et al.*, 2008] G. A. Chapman, J. J. Dobias, et S. R. Walton. On the Variability of the Apparent Solar Radius. *Astrophys. J.*, 681 :1698–1702, Juillet 2008.
- [Charbonneau *et al.*, 1999] P. Charbonneau, J. Christensen-Dalsgaard, R. Henning, R. M. Larsen, J. Schou, M. J. Thompson, et S. Tomczyk. Helioseismic Constraints on the Structure of the Solar Tachocline. *Astrophys. J.*, 527 :445–460, Décembre 1999.
- [Christensen-Dalsgaard *et al.*, 1996] J. Christensen-Dalsgaard, W. Dappen, S. V. Ajukov, E. R. Anderson, H. M. Antia, S. Basu, V. A. Baturin, G. Berthomieu, B. Chaboyer, S. M. Chitre, A. N. Cox, P. Demarque, J. Donatowicz, W. A. Dziembowski, M. Gabriel, D. O. Gough, D. B. Guenther, J. A. Guzik, J. W. Harvey, F. Hill, G. Houdek, C. A. Iglesias, A. G. Kosovichev, J. W. Leibacher, P. Morel, C. R. Proffitt, J. Provost, J. Reiter, E. J. Rhodes, Jr., F. J. Rogers, I. W. Roxburgh, M. J. Thompson, et R. K. Ulrich. The Current State of Solar Modeling. *Science*, 272 :1286–1292, Mai 1996.
- [Ciddor, 1996] P. E. Ciddor. Refractive index of air : new equations for the visible and near infrared. *Applied Optics*, 35 :1566, Mars 1996.
- [Colina *et al.*, 1996] L. Colina, R. C. Bohlin, et F. Castelli. The 0.12-2.5 micron Absolute Flux Distribution of the Sun for Comparison With Solar Analog Stars. *Astron. J.*, 112 :307, Juillet 1996.
- [Conan, 2000] R. Conan. *Modélisation des effets de l’échelle externe de cohérence spatiale du front d’onde pour l’observation à haute résolution angulaire en astronomie : application à*

- l'optique adaptative, à l'interférométrie et aux très grands télescopes*. Thèse de Doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, France, 2000.
- [Conscience *et al.*, 2011] C. Conscience, M. Meftah, A. Chevalier, S. Dewitte, et D. Crommelynck. The space instrument SOVAP of the PICARD mission. In *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, volume 8146 de *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, page 814613, Septembre 2011.
- [Danjon, 1994] A. Danjon. *Astronomie générale, Albert Blanchard Paris*. 1994.
- [de Jong et van Soldt, 1989] T. de Jong et W. H. van Soldt. The earliest known solar eclipse record redated. *Nature*, 338 :238–240, Mars 1989.
- [Delmas et Laclare, 2002] C. Delmas et F. Laclare. Short vs Long Time Series : Example of the Solar Diameter. *Solar Phys.*, 209 :391–396, Octobre 2002.
- [Di Mauro, 2003] M. P. Di Mauro. Helioseismology : A Fantastic Tool to Probe the Interior of the Sun. In *The Sun's Surface and Subsurface : Investigating Shape*, éditeur J.-P. Rozelot, volume 599 de *Lecture Notes in Physics, Berlin Springer Verlag*, pages 31–67, 2003.
- [Dicke et Goldenberg, 1967] R. H. Dicke et H. M. Goldenberg. Solar Oblateness and General Relativity. *Phys. Rev. Lett.*, 18 :313–316, Février 1967.
- [Duda et Hart, 1972] Richard O. Duda et Peter E. Hart. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures. *Commun. Assoc. Comp. Machin.*, 15(1) :11–15, Janvier 1972.
- [Dunham *et al.*, 1980] D. W. Dunham, S. Sofia, A. D. Fiala, P. M. Muller, et D. Herald. Observations of a probable change in the solar radius between 1715 and 1979. *Science*, 210 :1243–1245, Décembre 1980.
- [Dziembowski *et al.*, 2001] W. A. Dziembowski, P. R. Goode, et J. Schou. Does the Sun Shrink with Increasing Magnetic Activity? *Astrophys. J.*, 553 :897–904, Juin 2001.
- [Eddy et Boornazian, 1979] J. A. Eddy et A. A. Boornazian. Secular Decrease in the Solar Diameter, 1863-1953. In *Bulletin of the American Astronomical Society*, volume 11 de *Bulletin of the American Astronomical Society*, page 437, Mars 1979.
- [Eddy, 1976] J. A. Eddy. The Maunder Minimum. *Science*, 192 :1189–1202, Juin 1976.
- [Egidi *et al.*, 2006] A. Egidi, B. Caccin, S. Sofia, W. Heaps, W. Hoegy, et L. Twigg. High-Precision Measurements of the Solar Diameter and Oblateness by the Solar Disk Sextant (SDS) Experiment. *Solar Phys.*, 235 :407–418, Mai 2006.
- [Einstein, 1916] A. Einstein. Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen der Physik*, 354 :769–822, 1916.
- [Emilio *et al.*, 2000] M. Emilio, J. R. Kuhn, R. I. Bush, et P. Scherrer. On the Constancy of the Solar Diameter. *Astrophys. J.*, 543 :1007–1010, Novembre 2000.
- [Emilio *et al.*, 2015] M. Emilio, S. Couvidat, R. I. Bush, J. R. Kuhn, et I. F. Scholl. Measuring the Solar Radius from Space during the 2012 Venus Transit. *Astrophys. J.*, 798 :48, Janvier 2015.
- [Emilio et Leister, 2005] M. Emilio et N. V. Leister. Solar diameter measurements at São Paulo Observatory. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 361 :1005–1011, Août 2005.
- [Encrenaz, 2003] T. Encrenaz. *Le système solaire*. Savoirs actuels. EDP Sciences, 2003.
- [Fienga *et al.*, 2008] A. Fienga, H. Manche, J. Laskar, et M. Gastineau. INPOP06 : a new numerical planetary ephemeris. *Astron. Astrophys.*, 477 :315–327, Janvier 2008.
- [Fontenla *et al.*, 2006] J. M. Fontenla, E. Avrett, G. Thuillier, et J. Harder. Semiempirical Models of the Solar Atmosphere. I. The Quiet- and Active Sun Photosphere at Moderate Resolution. *Astrophys. J.*, 639 :441–458, Mars 2006.

- [Fontenla *et al.*, 2009] J. M. Fontenla, W. Curdt, M. Haberreiter, J. Harder, et H. Tian. Semiempirical Models of the Solar Atmosphere. III. Set of Non-LTE Models for Far-Ultraviolet/Extreme-Ultraviolet Irradiance Computation. *Astrophys. J.*, 707 :482–502, Décembre 2009.
- [Foukal, 2013] P. V. Foukal. *Solar Astrophysics, 3rd, Revised Edition*. 2013.
- [Fried, 1965] D. L. Fried. Statistics of a Geometric Representation of Wavefront Distortion. *Journal of the Optical Society of America (1917-1983)*, 55 :1427–1431, Novembre 1965.
- [Fröhlich et Lean, 1998] C. Fröhlich et J. Lean. The Sun’s total irradiance : Cycles, trends and related climate change uncertainties since 1976. *Geophys. Res. Lett.*, 25 :4377–4380, Décembre 1998.
- [García *et al.*, 2007] R. A. García, S. Turck-Chièze, S. J. Jiménez-Reyes, J. Ballot, P. L. Pallé, A. Eff-Darwich, S. Mathur, et J. Provost. Tracking Solar Gravity Modes : The Dynamics of the Solar Core. *Science*, 316 :1591, Juin 2007.
- [Gilliland, 1981] R. L. Gilliland. Solar radius variations over the past 265 years. *Astrophys. J.*, 248 :1144–1155, Septembre 1981.
- [Gingerich *et al.*, 1971] O. Gingerich, R. W. Noyes, W. Kalkofen, et Y. Cuny. The Harvard-Smithsonian reference atmosphere. *Solar Phys.*, 18 :347–365, Juillet 1971.
- [Haberreiter *et al.*, 2008] M. Haberreiter, W. Schmutz, et I. Hubeny. NLTE model calculations for the solar atmosphere with an iterative treatment of opacity distribution functions. *Astron. Astrophys.*, 492 :833–840, Décembre 2008.
- [Haigh *et al.*, 2010] J. D. Haigh, A. R. Winning, R. Toumi, et J. W. Harder. An influence of solar spectral variations on radiative forcing of climate. *Nature*, 467 :696–699, Octobre 2010.
- [Hanslmeier, 2007] A. Hanslmeier. *The Sun and Space Weather*. 2007.
- [Harder *et al.*, 2009] J. W. Harder, J. M. Fontenla, P. Pilewskie, E. C. Richard, et T. N. Woods. Trends in solar spectral irradiance variability in the visible and infrared. *Geophys. Res. Lett.*, 36 :7801, Avril 2009.
- [Harmanec et Prša, 2011] P. Harmanec et A. Prša. Call to Adopt a Nominal Set of Astrophysical Parameters and Constants to Improve the Accuracy of Fundamental Physical Properties of Stars. *Pub. Astron. Soc. Pac.*, 123 :976–980, Août 2011.
- [Harzer, 1891] P. Harzer. Über die Rotationsbewegung der Sonne. *Astronomische Nachrichten*, 127 :17, Avril 1891.
- [Hauchecorne *et al.*, 2014] A. Hauchecorne, M. Meftah, A. Irbah, S. Couvidat, R. Bush, et J.-F. Hochedez. Solar Radius Determination from Sodism/Picard and HMI/SDO Observations of the Decrease of the Spectral Solar Radiance during the 2012 June Venus Transit. *Astrophys. J.*, 783 :127, Mars 2014.
- [Hestroffer et Magnan, 1998] D. Hestroffer et C. Magnan. Wavelength dependency of the Solar limb darkening. *Astron. Astrophys.*, 333 :338–342, Mai 1998.
- [Hickey *et al.*, 1976] J. R. Hickey, F. J. Griffin, D. T. Hilleary, et H. B. Howell. Extraterrestrial solar irradiance measurements from the Nimbus 6 satellite. In *Sharing the Sun : Solar Technology in the Seventies, Volume 1*, éditeur K. W. Boer, volume 1, pages 329–337, 1976.
- [Hough et Paul, 1962] V Hough et C. Paul. Method and means for recognizing complex patterns. (3069654), December 1962.
- [Ikhlef *et al.*, 2016] R. Ikhlef, T. Corbard, F. Morand, C. Renaud, M. Fodil, A. Ziad, J. Borgnino, M. Meftah, P. Assus, B. Chauvineau, A. Hauchecorne, P. Lesueur, G. Poiet, F. Ubaldi, M. Hamadouche, et T. Abdelatif. MISOLFA : a generalized monitor for daytime spatio-temporal turbulence characterization. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 458 :517–530, Mai 2016.

- [Irbah *et al.*, 2014] A. Irbah, M. Meftah, A. Hauchecorne, D. Djafer, T. Corbard, M. Bocquier, et E. Momar Cisse. New Space Value of the Solar Oblateness Obtained with PICARD. *Astrophys. J.*, 785 :89, Avril 2014.
- [Kilic *et al.*, 2005] H. Kilic, O. Golbasi, et F. Chollet. Measurements of the Solar Radius in Antalya between 2001 2003. *Solar Phys.*, 229 :5–12, Juin 2005.
- [Kolmogorov, 1941] A. Kolmogorov. The Local Structure of Turbulence in Incompressible Viscous Fluid for Very Large Reynolds' Numbers. *Akademiia Nauk SSSR Doklady*, 30 :301–305, 1941.
- [Kopp *et al.*, 2004] G. Kopp, G. Lawrence, et G. Rottman. Total irradiance monitor design and on-orbit functionality. In *SPIE*, éditeurs S. Fineschi et M. A. Gummin, volume 5171 de *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, pages 14–25, Février 2004.
- [Kopp et Lean, 2011] G. Kopp et J. L. Lean. A new, lower value of total solar irradiance : Evidence and climate significance. *Geophys. Res. Lett.*, 38 :1706, Janvier 2011.
- [Kuhn *et al.*, 2004] J. R. Kuhn, R. I. Bush, M. Emilio, et P. H. Scherrer. On the Constancy of the Solar Diameter. II. *Astrophys. J.*, 613 :1241–1252, Octobre 2004.
- [Kuhn *et al.*, 2012] J. R. Kuhn, R. Bush, M. Emilio, et I. F. Scholl. The Precise Solar Shape and Its Variability. *Science*, 337 :1638, Septembre 2012.
- [Labs et Neckel, 1967] D. Labs et H. Neckel. Die absolute Strahlungsintensität der Mitte der Sonnenscheibe im Spektralbereich  $3288 \leq \lambda \leq 12480 \text{ \AA}$ . *Zeitschrift für Astrophysik*, 65 :133, 1967.
- [Labs et Neckel, 1968] D. Labs et H. Neckel. The Radiation of the Solar Photosphere from  $2000 \text{ \AA}$  to  $100 \mu\text{m}$ . *Zeitschrift für Astrophysik*, 69 :1, 1968.
- [Laclare *et al.*, 1996] F. Laclare, C. Delmas, J. P. Coin, et A. Irbah. Measurements and Variations of the Solar Diameter. *Solar Phys.*, 166 :211–229, Juillet 1996.
- [Lamy *et al.*, 2015] P. Lamy, J.-Y. Prado, O. Floyd, P. Rocher, G. Faury, et S. Koutchmy. A Novel Technique for Measuring the Solar Radius from Eclipse Light Curves - Results for 2010, 2012, 2013, and 2015. *Solar Phys.*, 290 :2617–2648, Octobre 2015.
- [Lang, 2006] éditeur Kenneth Lang. *Sun, Earth and Sky, 2nd, Revised Edition*. Springer-Verlag New York, 2006.
- [Le Verrier, 1859] U. J. Le Verrier. Théorie du mouvement de Mercure. *Annales de l'Observatoire de Paris*, 5 :1, 1859.
- [Lean *et al.*, 2005] J. Lean, G. Rottman, J. Harder, et G. Kopp. SORCE Contributions to New Understanding of Global Change and Solar Variability. *Solar Phys.*, 230 :27–53, Août 2005.
- [Lefebvre, 2003] S. Lefebvre. *Déformées solaires : diamètre et structure interne : simulations en vue d'intercomparer les données sol et espace*. Thèse de Doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, France, 2003.
- [Lilensten et Blelly, 1999] J. Lilensten et P.L. Blelly. *Du soleil à la terre : aéronomie et météorologie de l'espace*. Collection Grenoble sciences. Presses universitaires de Grenoble, 1999.
- [Lockwood *et al.*, 2011] M. Lockwood, M. J. Owens, L. Barnard, C. J. Davis, et F. Steinhilber. The persistence of solar activity indicators and the descent of the Sun into Maunder Minimum conditions. *Geophys. Res. Lett.*, 38 :L22105, Novembre 2011.
- [Meftah *et al.*, 2014a] M. Meftah, T. Corbard, A. Irbah, R. Ikhlef, F. Morand, C. Renaud, A. Hauchecorne, P. Assus, J. Borgnino, B. Chauvineau, M. Crepel, F. Dalaudier, L. Damé, D. Djafer, M. Fodil, P. Lesueur, G. Poiet, M. Rouzé, A. Sarkissian, A. Ziad, et F. Laclare. Ground-based measurements of the solar diameter during the rising phase of solar cycle 24. *Astron. Astrophys.*, 569 :A60, Septembre 2014.

- [Meftah *et al.*, 2014b] M. Meftah, S. Dewitte, A. Irbah, A. Chevalier, C. Conscience, D. Crommelynck, E. Janssen, et S. Mekaoui. SOVAP/ Picard, a Spaceborne Radiometer to Measure the Total Solar Irradiance. *Solar Phys.*, 289 :1885–1899, Mai 2014.
- [Meftah *et al.*, 2014c] M. Meftah, A. Hauchecorne, M. Crepel, A. Irbah, T. Corbard, D. Djafer, et J.-F. Hochedez. The Plate Scale of the SODISM Instrument and the Determination of the Solar Radius at 607.1 nm. *Solar Phys.*, 289 :1–10, Janvier 2014.
- [Meftah *et al.*, 2014d] M. Meftah, J.-F. Hochedez, A. Irbah, A. Hauchecorne, P. Boumier, T. Corbard, S. Turck-Chièze, S. Abbaki, P. Assus, E. Bertran, P. Bourget, F. Buisson, M. Chaigneau, L. Damé, D. Djafer, C. Dufour, P. Etcheto, P. Ferrero, M. Hersé, J.-P. Marcovici, M. Meissonnier, F. Morand, G. Poiet, J.-Y. Prado, C. Renaud, N. Rouanet, M. Rouzé, D. Salabert, et A.-J. Vieau. Picard SODISM, a Space Telescope to Study the Sun from the Middle Ultraviolet to the Near Infrared. *Solar Phys.*, 289 :1043–1076, Mars 2014.
- [Meftah *et al.*, 2015a] M. Meftah, A. Hauchecorne, A. Irbah, T. Corbard, R. Ikhlef, F. Morand, C. Renaud, F. Riguet, et F. Pradal. On the Constancy of the Diameter of the Sun during the Rising Phase of Solar Cycle 24. *Astrophys. J.*, 808 :4, Juillet 2015.
- [Meftah *et al.*, 2015b] M. Meftah, A. Irbah, A. Hauchecorne, T. Corbard, S. Turck-Chièze, J.-F. Hochedez, P. Boumier, A. Chevalier, S. Dewitte, S. Mekaoui, et D. Salabert. On the Determination and Constancy of the Solar Oblateness. *Solar Phys.*, 290 :673–687, Mars 2015.
- [Meftah *et al.*, 2016a] M. Meftah, D. Bolsée, L. Damé, A. Hauchecorne, N. Pereira, A. Irbah, S. Bekki, G. Cessateur, T. Foujols, et R. Thiéblemont. Solar Irradiance from 165 to 400 nm in 2008 and UV Variations in Three Spectral Bands During Solar Cycle 24. *Solar Phys.*, 291 :3527–3547, Décembre 2016.
- [Meftah *et al.*, 2016b] M. Meftah, A. Chevalier, C. Conscience, et S. Nevens. Total solar irradiance as measured by the SOVAP radiometer onboard PICARD. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 6(27) :A34, Septembre 2016.
- [Meftah *et al.*, 2016c] M. Meftah, T. Corbard, A. Hauchecorne, A. Irbah, P. Boumier, A. Chevalier, W. Schmutz, R. Ikhlef, F. Morand, C. Renaud, J.-F. Hochedez, G. Cessateur, S. Turck-Chièze, D. Salabert, M. Rouzé, M. van Ruymbeke, P. Zhu, S. Kholikov, S. Koller, C. Conscience, S. Dewitte, L. Damé, et D. Djafer. Main results of the PICARD mission. In *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, volume 9904 de *SPIE*, page 99040Z, Juillet 2016.
- [Meftah *et al.*, 2016d] M. Meftah, A. Hauchecorne, R. I. Bush, et A. Irbah. On HMI solar oblateness during solar cycle 24 and impact of the space environment on results. *Advances in Space Research*, 58 :1425–1440, Octobre 2016.
- [Mein, 2015] N. Mein. Modèle théorique du limbe solaire en fonction de la longueur d’onde. Communication privée, 2015.
- [Merkel *et al.*, 2011] A. W. Merkel, J. W. Harder, D. R. Marsh, A. K. Smith, J. M. Fontenla, et T. N. Woods. The impact of solar spectral irradiance variability on middle atmospheric ozone. *Geophys. Res. Lett.*, 38 :L13802, Juillet 2011.
- [Mitchell, 1976] J. M. Mitchell. An overview of climatic variability and its causal mechanisms. *Quaternary Research*, 6 :481–493, Décembre 1976.
- [Mitchell, 1981] W. E. Mitchell, Jr. Limb darkening in the solar ultraviolet. *Solar Phys.*, 69 :391–398, Février 1981.
- [Morand *et al.*, 2010] F. Morand, C. Delmas, T. Corbard, B. Chauvineau, A. Irbah, M. Fodil, et F. Laclare. Mesures du rayon solaire avec l’instrument DORAYSOL (1999-2006) sur le site de Calern (observatoire de la Côte d’Azur). *Comptes Rendus Physique*, 11 :660–673, Novembre 2010.

- [Moritz, 1990] H. Moritz. *The figure of the Earth : theoretical geodesy and the Earth's interior*. 1990.
- [Mossman, 1989] J. E. Mossman. A comprehensive search for sunspots without the aid of a telescope, 1981-1982. *Q. Jl. R. astr. Soc.*, 30 :59–64, Mars 1989.
- [Neckel et Labs, 1984] H. Neckel et D. Labs. The solar radiation between 3300 and 12500 Å. *Solar Phys.*, 90 :205–258, Février 1984.
- [Neckel et Labs, 1994] H. Neckel et D. Labs. Solar limb darkening 1986-1990 ( $\lambda$  303 to 1099nm). *Solar Phys.*, 153 :91–114, Août 1994.
- [Neckel, 2005] H. Neckel. Analytical Reference Functions  $F(\lambda)$  for the Sun's Limb Darkening and Its Absolute Continuum Intensities ( $\lambda$  300 to 1100 m). *Solar Phys.*, 229 :13–33, Juin 2005.
- [Newcomb, 1895] S. Newcomb. *On the principal fundamental constants of astronomy*. 1895.
- [Noël, 2004] F. Noël. Solar cycle dependence of the apparent radius of the Sun. *Astron. Astrophys.*, 413 :725–732, Janvier 2004.
- [Pagaran et al., 2011] J. Pagaran, M. Weber, M. T. Deland, L. E. Floyd, et J. P. Burrows. Solar Spectral Irradiance Variations in 240 - 1600 nm During the Recent Solar Cycles 21 - 23. *Solar Phys.*, 272 :159–188, Août 2011.
- [Parkinson et al., 1980] J. H. Parkinson, L. V. Morrison, et F. R. Stephenson. The constancy of the solar diameter over the past 250 years. *Nature*, 288 :548–551, Décembre 1980.
- [Pecker et Schatzman, 1959] J. C. Pecker et E. Schatzman. *Astrophysique generale*. 1959.
- [Piau et al., 2011] L. Piau, R. F. Stein, S. Melo, S. Turck-Chièze, G. Thuillier, et A. Hauchecorne. Simulations of the solar atmosphere and solar limbs. In *SF2A-2011 : Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics*, éditeurs G. Alecian, K. Belkacem, R. Samadi, et D. Valls-Gabaud, pages 407–410, Décembre 2011.
- [Pierce et al., 1977] A. K. Pierce, C. D. Slaughter, et D. Weinberger. Solar limb darkening in the interval 7404-24 018 Å. II. *Solar Phys.*, 52 :179–189, Avril 1977.
- [Pierce et Slaughter, 1977] A. K. Pierce et C. D. Slaughter. Solar limb darkening. I - At wavelengths of 3033-7297. *Solar Phys.*, 51 :25–41, Février 1977.
- [Pijpers, 1998] F. P. Pijpers. Helioseismic determination of the solar gravitational quadrupole moment. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 297 :L76–L80, Juillet 1998.
- [Pouillet, 1838] C. S. M. Pouillet. *Mémoire sur la chaleur solaire*. Paris, Bachelier. 1838.
- [Ribas, 2010] I. Ribas. The Sun and stars as the primary energy input in planetary atmospheres. In *Solar and Stellar Variability : Impact on Earth and Planets*, éditeurs A. G. Kosovichev, A. H. Andrei, et J.-P. Rozelot, volume 264 de *IAU Symposium*, pages 3–18, Février 2010.
- [Ribes et al., 1987] E. Ribes, J. C. Ribes, et R. Bartholot. Evidence for a larger sun with a slower rotation during the seventeenth century. *Nature*, 326 :52–55, Mars 1987.
- [Roddier, 1981] F. Roddier. The effects of atmospheric turbulence in optical astronomy. *Progress in optics. Volume 19*. Amsterdam, North-Holland Publishing Co., 1981, p. 281-376., 19 :281–376, 1981.
- [Rozelot et Damiani, 2011] J.-P. Rozelot et C. Damiani. History of solar oblateness measurements and interpretation. *European Physical Journal H*, 36 :407–436, Novembre 2011.
- [Rozelot et Damiani, 2012] J. P. Rozelot et C. Damiani. Rights and wrongs of the temporal solar radius variability. *European Physical Journal H*, 37 :709–743, Octobre 2012.
- [Schaefer, 1993] B. E. Schaefer. Visibility of sunspots. *Astrophys. J.*, 411 :909–919, Juillet 1993.

- [Scherrer, 2002] P. H. Scherrer. The Helioseismic and Magnetic Imager for the Solar Dynamics Observatory. In *American Astronomical Society Meeting Abstracts #200*, volume 34 de *Bulletin of the American Astronomical Society*, page 735, Mai 2002.
- [Schmutz *et al.*, 2013] W. Schmutz, A. Fehlmann, W. Finsterle, G. Kopp, et G. Thuillier. Total solar irradiance measurements with PREMOS/PICARD. In *American Institute of Physics Conference Series*, volume 1531 de *American Institute of Physics Conference Series*, pages 624–627, Mai 2013.
- [Schou *et al.*, 2012] J. Schou, P. H. Scherrer, R. I. Bush, R. Wachter, S. Couvidat, M. C. Rabello-Soares, R. S. Bogart, J. T. Hoeksema, Y. Liu, T. L. Duvall, D. J. Akin, B. A. Allard, J. W. Miles, R. Rairden, R. A. Shine, T. D. Tarbell, A. M. Title, C. J. Wolfson, D. F. Elmore, A. A. Norton, et S. Tomczyk. Design and ground calibration of the helioseismic and magnetic imager (hmi) instrument on the solar dynamics observatory (sdo). *Solar Physics*, 275(1) :229–259, 2012.
- [Seidelmann, 1992] P. K. Seidelmann. *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac. A revision to the Explanatory Supplement to the Astronomical Ephemeris and the American Ephemeris and Nautical Almanac.* 1992.
- [Shapiro *et al.*, 1976] I. I. Shapiro, C. C. Counselman, III, et R. W. King. Verification of the principle of equivalence for massive bodies. *Physical Review Letters*, 36 :555–558, Mars 1976.
- [Shapiro *et al.*, 2010] A. I. Shapiro, W. Schmutz, M. Schoell, M. Haberreiter, et E. Rozanov. NLTE solar irradiance modeling with the COSI code. *Astron. Astrophys.*, 517 :A48, Juillet 2010.
- [Shapiro, 1980] I. I. Shapiro. Is the sun shrinking. *Science*, 208 :51–53, Avril 1980.
- [Shimizu *et al.*, 2007] T. Shimizu, Y. Katsukawa, K. Matsuzaki, K. Ichimoto, R. Kano, E. E. Deluca, L. L. Lundquist, M. Weber, T. D. Tarbell, R. A. Shine, M. Sōma, S. Tsuneta, T. Sakao, et K. Minesugi. Hinode Calibration for Precise Image Co-Alignment between SOT and XRT (2006 November-2007 April). *Pub. Astron. Soc. Japan*, 59 :845, Novembre 2007.
- [Short et Hauschildt, 2009] C. I. Short et P. H. Hauschildt. Non-LTE Modeling of the Near-Ultraviolet Band of Late-Type Stars. *Astrophys. J.*, 691 :1634–1647, Février 2009.
- [Sofia *et al.*, 2013] S. Sofia, T. M. Girard, U. J. Sofia, L. Twigg, W. Heaps, et G. Thuillier. Variation of the diameter of the Sun as measured by the Solar Disk Sextant (SDS). *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 436 :2151–2169, Décembre 2013.
- [Solomon *et al.*, 2010] S. Solomon, J. S. Daniel, T. J. Sanford, D. M. Murphy, G.-K. Plattner, R. Knutti, et P. Friedlingstein. Persistence of climate changes due to a range of greenhouse gases. *Proceedings of the National Academy of Science*, 107 :18354–18359, Octobre 2010.
- [Spiegel et Zahn, 1992] E. A. Spiegel et J.-P. Zahn. The solar tachocline. *Astron. Astrophys.*, 265 :106–114, Novembre 1992.
- [Stix, 2004] M. Stix. *The sun : an introduction.* 2004.
- [Sveshnikov, 2002] M. L. Sveshnikov. Solar-Radius Variations from Transits of Mercury Across the Solar Disk. *Astronomy Letters*, 28 :115–120, Février 2002.
- [Tatarski, 1961] V. I. Tatarski. *Wave Propagation in Turbulent Medium.* McGraw-Hill, 1961.
- [Thekaekara, 1974] M. P. Thekaekara. Extraterrestrial solar spectrum, 3000 - 6100 Å at 1-Å intervals. *Applied Optics*, 13 :518–522, 1974.
- [Thuillier *et al.*, 2003] G. Thuillier, M. Hersé, D. Labs, T. Foujols, W. Peetermans, D. Gillotay, P. C. Simon, et H. Mandel. The Solar Spectral Irradiance from 200 to 2400 nm as Measured by the SOLSPEC Spectrometer from the Atlas and Eureca Missions. *Solar Phys.*, 214 :1, Mai 2003.

- [Thuillier *et al.*, 2004] G. Thuillier, L. Floyd, T. N. Woods, R. Cebula, E. Hilsenrath, M. Hersé, et D. Labs. Solar irradiance reference spectra for two solar active levels. *Advances in Space Research*, 34 :256–261, Janvier 2004.
- [Toulmonde, 1997] M. Toulmonde. The diameter of the Sun over the past three centuries. *Astron. Astrophys.*, 325 :1174–1178, Septembre 1997.
- [Ulrich et Bertello, 1995] R. K. Ulrich et L. Bertello. Solar-cycle dependence of the Sun’s apparent radius in the neutral iron spectral line at 525 nm. *Nature*, 377 :214–215, Septembre 1995.
- [Unsöld, 1968] A. Unsöld. *Physik der Sternatmosphären MIT besonderer Beruecksichtigung der Sonne*. 1968.
- [Vernazza *et al.*, 1976] J. E. Vernazza, E. H. Avrett, et R. Loeser. Structure of the solar chromosphere. II - The underlying photosphere and temperature-minimum region. *Astrophys. J. Suppl.*, 30 :1–60, Janvier 1976.
- [Vernazza *et al.*, 1981] J. E. Vernazza, E. H. Avrett, et R. Loeser. Structure of the solar chromosphere. III - Models of the EUV brightness components of the quiet-sun. *Astrophys. J. Suppl.*, 45 :635–725, Avril 1981.
- [Veselovsky, 1973] I. N. Veselovsky. Copernicus and Nasir al-Din al-Tusi. *Journal for the History of Astronomy*, 4 :128, 1973.
- [Willson et Hudson, 1981] R. C. Willson et H. S. Hudson. Solar Maximum Mission experiment - Initial observations by the active cavity radiometer. *Advances in Space Research*, 1 :285–288, 1981.
- [Willson et Hudson, 1991] R. C. Willson et H. S. Hudson. The Sun’s luminosity over a complete solar cycle. *Nature*, 351 :42–44, Mai 1991.
- [Wittmann *et al.*, 1993] A. D. Wittmann, E. Alge, et M. Bianda. Detection of a significant change in the solar diameter. *Solar Phys.*, 145 :205, Mai 1993.
- [Wittmann et Debarbat, 1990] A. D. Wittmann et S. Debarbat. The solar diameter and its variability. *Sterne und Weltraum*, 29 :420–426, Août 1990.
- [Woods *et al.*, 2009] T. N. Woods, P. C. Chamberlin, J. W. Harder, R. A. Hock, M. Snow, F. G. Eparvier, J. Fontenla, W. E. McClintock, et E. C. Richard. Solar Irradiance Reference Spectra (SIRS) for the 2008 Whole Heliosphere Interval (WHI). *Geophys. Res. Lett.*, 36 :L01101, Janvier 2009.



# Annexe A

## Caractéristiques d'un modèle de l'atmosphère solaire

Cette annexe présente les principales caractéristiques d'un modèle de l'atmosphère solaire. Il s'agit d'un modèle de l'atmosphère solaire développé par [Vernazza \*et al.\* \(1981\)](#).

La définition des principales caractéristiques du modèle est donnée ci-après :

- $h$  : altitude
- $m$  : la densité
- $\tau_{500}$  : profondeur optique à 500 nm
- $T$  : température
- $V$  : vitesse de micro-turbulence
- $n_H$  : densité de protons
- $n_e$  : densité d'électrons
- $P_{total}$  : pression totale
- $P_{gas}$  : pression du gaz
- $\rho$  : densité

TABLE A-1: Principales caractéristiques du modèle C.

$h$ [km]	$m$ [ $g\ cm^{-2}$ ]	$\tau_{500}$	$T$ [K]	$V$ [ $km\ s^{-1}$ ]	$n_H$ [ $cm^{-3}$ ]	$n_e$ [ $cm^{-3}$ ]	$P_{total}$ [ $dyn\ cm^{-2}$ ]	$P_{gas}/P_{total}$	$\rho$ [ $g\ cm^{-3}$ ]
2543	5.26E-06	0.	447000	11.28	1.01E+09	1.21E+09	1.44E+01	0.9896	2.35E+15
2298	5.37E-06	3.71E-08	141000	9.87	3.21E+09	3.84E+09	1.47E+01	0.9752	7.49E+15
2290	5.37E-06	3.97E-08	89100	9.82	5.04E+09	5.96E+09	1.47E+01	0.9614	1.18E+14
2280	5.39E-06	4.49E-08	50000	9.76	9.04E+09	9.99E+09	1.48E+01	0.9318	2.11E+14
2274	5.40E-06	4.95E-08	37000	9.73	1.20E+10	1.32E+10	1.48E+01	0.9102	2.81E+14
2271	5.41E-06	5.23E-08	32000	9.71	1.38E+10	1.50E+10	1.48E+01	0.8976	3.22E+14
2267	5.43E-06	5.66E-08	28000	9.7	1.57E+10	1.68E+10	1.49E+01	0.884	3.67E+14
2263	5.44E-06	6.12E-08	25500	9.68	1.72E+10	1.81E+10	1.49E+01	0.8738	4.02E+14
2255	5.48E-06	7.11E-08	24500	9.64	1.80E+10	1.88E+10	1.50E+01	0.8698	4.20E+14
2230	5.58E-06	1.03E-07	24200	9.49	1.86E+10	1.94E+10	1.53E+01	0.8718	4.36E+14
2200	5.72E-06	1.43E-07	24000	9.33	1.93E+10	2.01E+10	1.57E+01	0.8645	4.52E+14
2160	5.90E-06	1.98E-07	23500	9.08	2.05E+10	2.12E+10	1.62E+01	0.8778	4.80E+14
2129	6.06E-06	2.43E-07	23000	8.87	2.16E+10	2.22E+10	1.66E+01	0.8801	5.06E+14
2120	6.10E-06	2.56E-07	22500	8.81	2.23E+10	2.28E+10	1.67E+01	0.8789	5.22E+14
2115	6.13E-06	2.64E-07	21000	8.78	2.40E+10	2.40E+10	1.68E+01	0.871	5.62E+14
2113	6.14E-06	2.67E-07	18500	8.77	2.73E+10	2.62E+10	1.68E+01	0.8539	6.39E+14
2109	6.17E-06	2.75E-07	12300	8.74	4.09E+10	3.31E+10	1.69E+01	0.7839	9.57E+14
2107	6.19E-06	2.80E-07	10700	8.72	4.67E+10	3.54E+10	1.70E+01	0.7552	1.09E+13
2104	6.23E-06	2.88E-07	9500	8.71	5.24E+10	3.71E+10	1.71E+01	0.7277	1.23E+13
2090	6.42E-06	3.24E-07	8440	8.6	6.13E+10	3.80E+10	1.76E+01	0.6986	1.43E+13
2080	6.56E-06	3.51E-07	8180	8.55	6.54E+10	3.78E+10	1.80E+01	0.6891	1.53E+13

$h$ [km]	$m$ [ $g\text{ cm}^{-2}$ ]	$\tau_{500}$	$T$ [K]	$V$ [ $\text{km s}^{-1}$ ]	$n_H$ [ $\text{cm}^{-3}$ ]	$n_e$ [ $\text{cm}^{-3}$ ]	$P_{total}$ [ $\text{dyn cm}^{-2}$ ]	$P_{gas}/P_{total}$	$\rho$ [ $g\text{ cm}^{-3}$ ]
2070	6.72E-06	3.77E-07	7940	8.5	6.96E+10	3.78E+10	1.84E+01	0.6808	1.63E+13
2050	7.07E-06	4.30E-07	7660	8.42	7.71E+10	3.79E+10	1.94E+01	0.6701	1.80E+13
2016	7.73E-06	5.20E-07	7360	8.22	9.08E+10	3.81E+10	2.12E+01	0.6616	2.12E+13
1990	8.32E-06	5.90E-07	7160	8.01	1.03E+11	3.86E+10	2.28E+01	0.66	2.42E+13
1925	1.02E-05	7.72E-07	6940	7.63	1.38E+11	4.03E+10	2.78E+01	0.662	3.23E+13
1785	1.65E-05	1.21E-06	6630	6.92	2.60E+11	4.77E+10	4.51E+01	0.6772	6.08E+13
1605	3.41E-05	1.96E-06	6440	5.85	6.39E+11	6.01E+10	9.33E+01	0.7262	1.49E+12
1515	5.14E-05	2.42E-06	6370	5.26	1.05E+12	6.46E+10	1.41E+00	0.7595	2.45E+12
1380	1.01E-04	3.29E-06	6280	4.51	2.27E+12	7.60E+10	2.77E+00	0.8051	5.32E+12
1280	1.75E-04	4.08E-06	6220	3.92	4.20E+12	7.49E+10	4.79E+00	0.8423	9.82E+12
1180	3.11E-04	5.08E-06	6150	3.48	7.87E+12	8.11E+10	8.53E+00	0.8694	1.84E+11
1065	6.30E-04	6.86E-06	6040	2.73	1.71E+13	9.35E+10	1.73E+01	0.9136	4.00E+11
980	1.10E-03	9.15E-06	5925	2.14	3.15E+13	1.04E+11	3.01E+01	0.944	7.36E+11
905	1.84E-03	1.24E-05	5755	1.7	5.55E+13	1.05E+11	5.04E+01	0.9628	1.30E+10
855	2.63E-03	1.55E-05	5650	1.53	8.14E+13	1.06E+11	7.21E+01	0.9691	1.90E+10
755	5.58E-03	2.54E-05	5280	1.23	1.86E+14	8.84E+10	1.53E+02	0.9784	4.36E+10
705	8.33E-03	3.29E-05	5030	1.09	2.94E+14	7.66E+10	2.28E+02	0.9821	6.86E+10
655	1.28E-02	4.45E-05	4730	0.96	4.79E+14	8.09E+10	3.50E+02	0.9852	1.12E+09
605	2.01E-02	7.02E-05	4420	0.83	8.12E+14	1.11E+11	5.52E+02	0.9881	1.90E+09
555	3.27E-02	1.46E-04	4230	0.7	1.38E+15	1.73E+11	8.96E+02	0.9912	3.23E+09
515	4.88E-02	3.01E-04	4170	0.6	2.10E+15	2.50E+11	1.34E+03	0.9934	4.90E+09
450	9.38E-02	1.02E-03	4220	0.53	3.99E+15	4.52E+11	2.57E+03	0.9949	9.33E+09
350	2.48E-01	5.63E-03	4465	0.52	9.98E+15	1.11E+12	6.80E+03	0.9954	2.33E+08

$h$ [km]	$m$ [ $g\ cm^{-2}$ ]	$\tau_{500}$	$T$ [K]	$V$ [ $km\ s^{-1}$ ]	$n_H$ [ $cm^{-3}$ ]	$n_e$ [ $cm^{-3}$ ]	$P_{total}$ [ $dyn\ cm^{-2}$ ]	$P_{gas}/P_{total}$	$\rho$ [ $g\ cm^{-3}$ ]
250	6.17E-01	2.67E-02	4780	0.63	2.32E+16	2.67E+12	1.69E+04	0.9936	5.41E+08
150	1.43E+00	1.12E-01	5180	1	4.92E+16	6.48E+12	3.93E+04	0.9854	1.15E+07
100	2.12E+00	2.20E-01	5455	1.2	6.87E+16	1.07E+13	5.80E+04	0.9801	1.61E+07
50	3.06E+00	4.40E-01	5840	1.4	9.20E+16	2.12E+13	8.27E+04	0.9748	2.15E+07
0	4.28E+00	9.95E-01	6420	1.6	1.17E+17	6.43E+13	1.17E+05	0.9702	2.73E+07
-25	4.99E+00	1.68E+00	6910	1.7	1.26E+17	1.55E+14	1.37E+05	0.9688	2.95E+07
-50	5.75E+00	3.34E+00	7610	1.76	1.32E+17	4.65E+14	1.58E+05	0.9697	3.08E+07
-75	6.53E+00	7.45E+00	8320	1.8	1.37E+17	1.20E+15	1.79E+05	0.9711	3.19E+07

# Annexe B

## Calcul des éphémérides

### B.1 Les données d'entrée

Plusieurs types de données d'entrée sont nécessaires pour effectuer le calcul des éphémérides lors du passage de Vénus.

1. Le fichier qui fournit les positions ( $x$ ,  $y$  et  $z$ ) et les vitesses du satellite PICARD ( $Vx_p$ ,  $Vy_p$  et  $Vz_p$ ) pendant le passage de Vénus. Les positions du satellite sont converties en temps UTC ( $x_p$ ,  $y_p$  et  $z_p$ ) dans le repère cartésien équatorial géocentrique apparent de la date (Table B-1).
2. Le fichier qui contient les coefficients des polynômes de Tchebychev (résultats fournis par l'IMCCE (Patrick Rocher)). Les données astronomiques sont souvent développées en fonctions simples telles que les polynômes de Tchebychev. Les éphémérides Tchebychev se présentent sous la forme d'une suite de coefficients du type  $T(0)$ ,  $T(1)$ , ...,  $T(n)$  sur un intervalle de temps donné  $[T_{Tcheb}^0 \ T_{Tcheb}^1]$ . Le calcul des coordonnées équatoriales cartésiennes apparentes géocentriques de Vénus ( $x_v$ ,  $y_v$  et  $z_v$ ) et du Soleil ( $x_s$ ,  $y_s$  et  $z_s$ ) se fait ainsi à l'aide de développement en séries de polynômes de Tchebychev des coordonnées cartésiennes équatoriales géocentriques apparentes.
3. Le fichier qui fournit l'évolution de l'angle au pôle du Soleil (angle  $P$ ) au cours du temps. L'axe de rotation du Soleil est incliné par rapport au nord céleste (angle  $P$  ou  $P_0$ ). Une correction liée à cet effet doit être apportée afin de calculer les éphémérides de Vénus et du Soleil. L'angle  $P$  est compris entre  $-13.76^\circ$  le 5 juin 2012 à 00H00, et  $-12.96^\circ$  le 6 juin 2012 à 23H59.

**TABLE B-1** Positions géocentriques équatoriales J2000 du satellite PICARD ( $x$ ,  $y$  et  $z$ ) à partir de la restitution des données, vitesses du satellite dans le repère vrai ( $Vx_p$ ,  $Vy_p$  et  $Vz_p$ ) et positions géocentriques équatoriales apparentes ( $x'_p$ ,  $y'_p$  et  $z'_p$ ). Les coordonnées  $x_p$ ,  $y_p$  et  $z_p$  sont exprimées en unités astronomiques à partir des positions  $x'_p$ ,  $y'_p$  et  $z'_p$ .

Date	$x$ [m]	$y$ [m]	$z$ [m]
5 juin 2012 00H00	4929406.75874	-2322086.43116	4556355.95770
5 juin 2012 00H01	4627210.34347	-2272792.55069	4885325.29752
5 juin 2012 00H02	4306520.11995	-2214415.13071	5194718.27365
5 juin 2012 00H03	3968620.45704	-2147188.86520	5483298.48582
5 juin 2012 00H04	3614864.12299	-2071383.76887	5749913.32358
5 juin 2012 00H05	3246666.79245	-1987304.05573	5993498.46685
Date	$Vx_p$ [m s <sup>-1</sup> ]	$Vy_p$ [m s <sup>-1</sup> ]	$Vz_p$ [m s <sup>-1</sup> ]
5 juin 2012 00H00	-4884.72704	730.94902	5632.70675
5 juin 2012 00H01	-5203.30244	883.18356	5316.78552
5 juin 2012 00H02	-5501.03456	1031.86501	4979.61191
5 juin 2012 00H03	-5776.73914	1176.39988	4622.54421
5 juin 2012 00H04	-6029.32141	1316.21158	4247.01869
5 juin 2012 00H05	-6257.78032	1450.74316	3854.54380
...			
Date	$x'_p$ [m]	$y'_p$ [m]	$z'_p$ [m]
5 juin 2012 00H00	4930357.36623	-2307958.17197	4562501.65127
5 juin 2012 00H01	4627615.36379	-2259517.93147	4891095.94733
5 juin 2012 00H02	4306377.99765	-2202047.20837	5200090.81562
5 juin 2012 00H03	3967931.82716	-2135777.06529	5488251.45032
5 juin 2012 00H04	3613631.80763	-2060973.68912	5754426.92073
5 juin 2012 00H05	3244895.78864	-1977937.28512	5997554.66505
...			

## B.2 Les équations utilisées dans le calcul des éphémérides

### B.2.1 Ephémérides de Vénus et du Soleil

Le calcul des éphémérides s'effectue à l'aide des développements à l'ordre 11 en polynômes de Tchebychev où le temps est exprimé en temps universel coordonné (UTC). En effet, toute fonction peut être approchée sur un intervalle de temps donné par un polynôme dont le degré et le nombre de termes sont d'autant plus élevés que l'intervalle de temps est grand. La Table B-2 fournit les coefficients de Tchebychev utilisés pour calculer les éphémérides de Vénus et du Soleil. Pour chaque coordonnée géocentrique équatoriale du Soleil ( $Xg_s$ ,  $Yg_s$  et  $Zg_s$ ) et de Vénus ( $Xg_v$ ,  $Yg_v$  et  $Zg_v$ ), 11 coefficients de Tchebychev ( $T(i)$ ) sont fournis.

**TABLE B-2** Coefficients de Tchebychev ( $T(i)$ ) valables sur un intervalle de temps allant du 5 juin 2012 à 00H00 ( $T_{Tcheb}^0 = 0$ ) au 7 juin 2012 à 00H00 ( $T_{Tcheb}^1 = 2$ ). Les données sont exprimées en unité astronomique.

$i$	$T_{X_{g_s}}(i)$	$T_{Y_{g_s}}(i)$	$T_{Z_{g_s}}(i)$	$T_{X_{g_v}}(i)$	$T_{Y_{g_v}}(i)$	$T_{Z_{g_v}}(i)$
0	0.250626581	0.902107981	0.391058233	0.070950625	0.256490624	0.112105238
1	-0.016384998	0.003959507	0.001717062	0.003074925	-0.000236418	-0.001401912
2	-1.78E-05	-6.35E-05	-2.75E-05	1.69E-05	6.14E-05	2.64E-05
3	1.81E-07	-4.61E-08	-2.33E-08	-4.53E-07	7.94E-08	7.42E-08
4	5.83E-12	-8.31E-11	-1.45E-10	-2.40E-10	-2.24E-09	-9.64E-10
5	1.27E-12	1.02E-11	1.73E-11	1.98E-11	1.26E-11	9.88E-12
6	1.04E-12	-7.74E-14	2.23E-13	3.96E-13	3.34E-13	8.91E-14
7	4.63E-13	-1.16E-13	-1.03E-13	-1.12E-12	1.90E-13	1.72E-13
8	-6.18E-15	-5.62E-18	3.44E-16	-1.01E-12	2.19E-13	1.63E-13
9	-6.50E-13	1.57E-13	6.83E-14	1.09E-12	-2.33E-13	-2.17E-13
10	-1.60E-15	-5.75E-15	-2.52E-15	5.49E-15	1.90E-14	8.13E-15

Pour chaque coordonnée géocentrique équatoriale, un vecteur  $B$  est calculé à l'aide des relations de récurrence suivantes.

$$Bx_V(i) = 2t Bx_V(i+1) - Bx_V(i+2) + T_{X_{g_v}}(i) \quad (\text{B-1})$$

$$By_V(i) = 2t By_V(i+1) - By_V(i+2) + T_{Y_{g_v}}(i)$$

$$Bz_V(i) = 2t Bz_V(i+1) - Bz_V(i+2) + T_{Z_{g_v}}(i)$$

$$Bx_V(12) = Bx_V(11) = 0 \quad By_V(12) = By_V(11) = 0 \quad Bz_V(12) = Bz_V(11) = 0$$

$$Bx_S(i) = 2t Bx_S(i+1) - Bx_S(i+2) + T_{X_{g_s}}(i) \quad (\text{B-2})$$

$$By_S(i) = 2t By_S(i+1) - By_S(i+2) + T_{Y_{g_s}}(i)$$

$$Bz_S(i) = 2t Bz_S(i+1) - Bz_S(i+2) + T_{Z_{g_s}}(i)$$

$$Bx_S(12) = Bx_S(11) = 0 \quad By_S(12) = By_S(11) = 0 \quad Bz_S(12) = Bz_S(11) = 0$$

$$t = 2 \frac{T_{cal} - T_{Tcheb}^0}{T_{Tcheb}^1 - T_{Tcheb}^0} - 1 \quad (\text{B-3})$$

$$T_{cal} = T + \frac{66.184}{3600 * 24}$$

où l'argument  $T$  représente le temps universel (UTC); il s'exprime en jour et fraction de jour à partir de la date de référence (5 juin 2012 à 00H00).

### B.2.2 Calcul des coordonnées de Vénus vues depuis le satellite PICARD

Les coordonnées équatoriales cartésiennes apparentes géocentriques du centre de Vénus ( $x_v$ ,  $y_v$  et  $z_v$ ) et du Soleil ( $x_s$ ,  $y_s$  et  $z_s$ ) sont obtenues à partir des coefficients de Tchebychev (en unités astronomiques).

$$x_v = \frac{Bx_V(0) - Bx_V(2)}{2} + \frac{T_{Xg_v(0)}}{2} \quad (\text{B-4})$$

$$y_v = \frac{By_V(0) - By_V(2)}{2} + \frac{T_{Yg_v(0)}}{2}$$

$$z_v = \frac{Bz_V(0) - Bz_V(2)}{2} + \frac{T_{Zg_v(0)}}{2}$$

$$x_s = \frac{Bx_S(0) - Bx_S(2)}{2} + \frac{T_{Xg_s(0)}}{2} \quad (\text{B-5})$$

$$y_s = \frac{By_S(0) - By_S(2)}{2} + \frac{T_{Yg_s(0)}}{2}$$

$$z_s = \frac{Bz_S(0) - Bz_S(2)}{2} + \frac{T_{Zg_s(0)}}{2}$$

On obtient les coordonnées apparentes équatoriales de Vénus ( $X_v$ ,  $Y_v$  et  $Z_v$ ) et du Soleil ( $X_s$ ,  $Y_s$  et  $Z_s$ ) vues depuis le satellite PICARD par les relations suivantes :

$$X_V = x_v - x_p \quad Y_V = y_v - y_p \quad Z_V = z_v - z_p \quad (\text{B-6})$$

$$X_S = x_s - x_p \quad Y_S = y_s - y_p \quad Z_S = z_s - z_p \quad (\text{B-7})$$

Les distances PICARD–Vénus ( $PV$ ) et PICARD–Soleil ( $PS$ ) sont données par :

$$PV = \sqrt{X_V^2 + Y_V^2 + Z_V^2} \quad (\text{B-8})$$

$$PS = \sqrt{X_S^2 + Y_S^2 + Z_S^2} \quad (\text{B-9})$$

Les calculs réalisés prennent en considération les aberrations dues à la vitesse du satellite. Dans un premier temps, il est nécessaire de calculer les vecteurs unitaires de Vénus et du Soleil vus depuis le satellite PICARD. Ensuite, les corrections apportées dépendent des vecteurs unitaires, des vitesses du satellite ( $Vx_p$ ,  $Vy_p$  et  $Vz_p$  en  $\text{m s}^{-1}$ ) et de la vitesse de la lumière ( $c$  exprimée en  $\text{m s}^{-1}$ ).

$$X_{uV} = \frac{X_V}{PV} \quad Y_{uV} = \frac{Y_V}{PV} \quad Z_{uV} = \frac{Z_V}{PV} \quad (\text{B-10})$$

$$X_{uS} = \frac{X_S}{PS} \quad Y_{uS} = \frac{Y_S}{PS} \quad Z_{uS} = \frac{Z_S}{PS} \quad (\text{B-11})$$

On obtient ensuite les coordonnées apparentes équatoriales de Vénus ( $X'_v$ ,  $Y'_v$  et  $Z'_v$ ) et du Soleil ( $X'_s$ ,  $Y'_s$  et  $Z'_s$ ) vues depuis le satellite PICARD après correction des aberrations de vitesse par les relations suivantes :

$$X'_V = \left[ \left( 1 - \frac{X_{uV} Vx_p + Y_{uV} Vy_p + Z_{uV} Vz_p}{c} \right) X_{uV} + \frac{Vx_p}{c} \right] PV \quad (\text{B-12})$$

$$Y'_V = \left[ \left( 1 - \frac{X_{uV} Vx_p + Y_{uV} Vy_p + Z_{uV} Vz_p}{c} \right) Y_{uV} + \frac{Vy_p}{c} \right] PV$$

$$Z'_V = \left[ \left( 1 - \frac{X_{uV} Vx_p + Y_{uV} Vy_p + Z_{uV} Vz_p}{c} \right) Z_{uV} + \frac{Vz_p}{c} \right] PV$$

$$X'_S = \left[ \left( 1 - \frac{X_{uS} Vx_p + Y_{uS} Vy_p + Z_{uS} Vz_p}{c} \right) X_{uS} + \frac{Vx_p}{c} \right] PS \quad (\text{B-13})$$

$$Y'_S = \left[ \left( 1 - \frac{X_{uS} Vx_p + Y_{uS} Vy_p + Z_{uS} Vz_p}{c} \right) Y_{uS} + \frac{Vy_p}{c} \right] PS$$

$$Z'_S = \left[ \left( 1 - \frac{X_{uS} Vx_p + Y_{uS} Vy_p + Z_{uS} Vz_p}{c} \right) Z_{uS} + \frac{Vz_p}{c} \right] PS$$

Les ascensions droites et déclinaisons apparentes de Vénus ( $\alpha_V$  et  $\delta_V$ ) et du Soleil ( $\alpha_S$  et  $\delta_S$ ) vues depuis le satellite sont données par les équations suivantes :

$$\alpha_V = \arctan \left( \frac{Y'_V}{X'_V} \right) \quad \delta_V = \arcsin \left( \frac{Z'_V}{PV} \right) \quad (\text{B-14})$$

$$\alpha_S = \arctan \left( \frac{Y'_S}{X'_S} \right) \quad \delta_S = \arcsin \left( \frac{Z'_S}{PS} \right) \quad (\text{B-15})$$

Les coordonnées différentielles sont calculées à partir des relations suivantes :

$$X_{diff} = \frac{\cos(\delta_V) \sin(\alpha_V - \alpha_S)}{\sin(\delta_V) \sin(\delta_S) + \cos(\delta_V) \cos(\delta_S) \cos(\alpha_V - \alpha_S)} \quad (\text{B-16})$$

$$Y_{diff} = \frac{\sin(\delta_V) \cos(\delta_S) - \cos(\delta_V) \sin(\delta_S) \cos(\alpha_V - \alpha_S)}{\sin(\delta_V) \sin(\delta_S) + \cos(\delta_V) \cos(\delta_S) \cos(\alpha_V - \alpha_S)}$$

Les coordonnées ( $X_{diff}$  et  $Y_{diff}$ ) représentent des coordonnées équatoriales; le nord est la direction du nord céleste et non la direction nord de l'axe de rotation du Soleil. Il faut donc faire une rotation correspondant à l'angle  $P$ , angle entre la direction de l'axe de rotation du

Soleil et le pôle nord céleste.

$$X_{diff}^P = -X_{diff} \cos(P) - Y_{diff} \sin(P) \quad (\text{B-17})$$

$$Y_{diff}^P = X_{diff} \sin(P) + Y_{diff} \cos(P)$$

A partir des relations précédentes et des projections (Figure B-1), on obtient la distance ( $D$ ) entre le centre du Soleil et le centre de Vénus, les rayons apparents de Vénus ( $Ra_V$ ) et du Soleil ( $Ra_S$ ) dans le plan tangent à la direction d'observation et centré sur le Soleil et l'angle au pôle céleste ( $w$ ) de la direction  $SV'$ .

$$w = \arctan\left(\frac{X_{diff}^P}{Y_{diff}^P}\right) \quad (\text{B-18})$$

$$D = \sqrt{\left(X_{diff}^P\right)^2 + \left(Y_{diff}^P\right)^2} \quad (\text{B-19})$$

$$Ra_V = \tan\left[\arcsin\left(\frac{R_{\oplus}}{PV}\right)\right] \quad (\text{B-20})$$

$$Ra_S = \tan\left[\arcsin\left(\frac{R_{\odot}}{PS}\right)\right] \quad (\text{B-21})$$

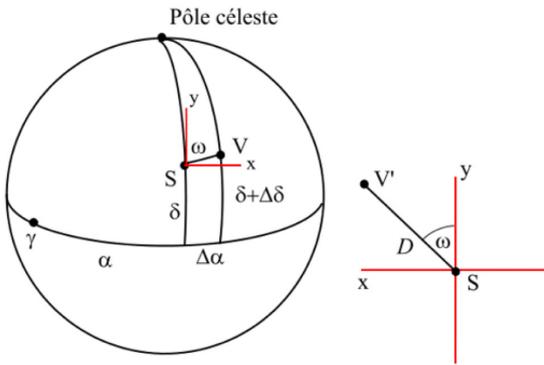


FIGURE B-1 Coordonnées différentielles – calcul des éphémérides. Le rayon de Vénus ( $R_{\oplus}$ ) est égal à 6051.8 km. Le rayon du Soleil ( $R_{\odot}$ ) est égal à 695700 km. La détermination des éphémérides ne dépend pas de la valeur absolue du rayon solaire.

Les calculs des instants de contact se font par la recherche des instants où la projection de la distance entre les centres de Vénus et du Soleil ( $D$ ) est égale à la somme (contacts extérieurs) ou à la différence (contacts intérieurs) des deux projections tangentielles des rayons apparents :

$$C_{ext} = D - (Ra_V + Ra_S) \quad (\text{B-22})$$

Ces prédictions sont faites à l'aide du modèle d'éphémérides INPOP06 [Fienga *et al.*, 2008] élaboré à l'IMCCE. Les précisions des positions des planètes dans ces théories sont de l'ordre de 0.005 secondes d'arc. L'obtention des coordonnées apparentes des astres nécessite l'usage de théories de la précession, de la nutation et du temps sidéral. Ces prédictions dépendent également d'un certain nombre de paramètres physiques qui doivent être cohérents entre eux et avec les théories planétaires utilisées. Comme les théories INPOP06 utilisent la valeur de l'unité astronomique de l'IERS 1992 ( $a = 149597870.610$  km), les constantes IERS 1992 pour le demi-diamètre équatorial terrestre ( $R_{\oplus} = 6378.1363$  km) et pour la valeur de la parallaxe équatoriale horizontale moyenne du Soleil ( $\Pi_{\odot} = \arcsin\left(\frac{R_{\oplus}}{a}\right) \sim 8.794143$  secondes d'arc) sont également utilisées. Pour l'échelle de temps, les calculs peuvent se faire en UTC si les positions du satellite sont également données en UTC dans le repère équatorial de la date. Enfin, il existe une petite erreur en utilisant les distances lumières géocentriques à la place des distances lumières des corps vus depuis le satellite, mais ces différences sont parfaitement négligeables par rapport à la précision des mesures.



# Annexe C

## Polynômes de Zernike

Les polynômes de Zernike ont été utilisés afin de déterminer la fonction d'étalement du point de l'instrument SODISM ( $\text{psf}_t(w_0)$ ). L'étude associée à ces polynômes est présentée au niveau de la Section 2.4.5. Les polynômes de Zernike représentent une série de polynômes orthogonaux vis à vis du disque unité. Ils sont très souvent utilisés en optique géométrique (aberrations optiques). Une des propriétés des polynômes de Zernike est l'invariance des moments sous dilatation et rotation. Ils peuvent se décomposer en fonctions paires et impaires et s'expriment de la manière suivante :

$$Z_1 = \rho \times \cos(\theta) \quad - \quad \text{tilt en X} \quad (\text{C-1})$$

$$Z_2 = \rho \times \sin(\theta) \quad - \quad \text{tilt en Y}$$

$$Z_3 = (2 \times \rho^2 - 1) \quad - \quad \text{focus}$$

$$Z_4 = \rho^2 \times \cos(2 \times \theta) \quad - \quad \text{astigmatisme à } 0^\circ$$

$$Z_5 = \rho^2 \times \sin(2 \times \theta) \quad - \quad \text{astigmatisme à } 45^\circ$$

$$Z_6 = (3 \times \rho^3 - 2 \times \rho) \times \cos(\theta) \quad - \quad \text{coma en X}$$

$$Z_7 = (3 \times \rho^3 - 2 \times \rho) \times \sin(\theta) \quad - \quad \text{coma en Y}$$

$$Z_8 = (6 \times \rho^4 - 6 \times \rho^2 + 1) \quad - \quad \text{aberration sphérique du troisième ordre}$$

$$Z_9 = \rho^3 \times \cos(3 \times \theta) \quad - \quad \text{astigmatisme triangulaire à } 0^\circ$$

$$Z_{10} = \rho^3 \times \sin(3 \times \theta) \quad - \quad \text{astigmatisme triangulaire à } 30^\circ$$

$$Z_{11} = (4 \times \rho^4 - 3 \times \rho^2) \times \cos(2 \times \theta) \quad - \quad \text{astigmatisme du cinquième ordre à } 0^\circ$$

$$Z_{12} = (4 \times \rho^4 - 3 \times \rho^2) \times \sin(2 \times \theta) \quad - \quad \text{astigmatisme du cinquième ordre à } 45^\circ$$

$$Z_{13} = (10 \times \rho^5 - 12 \times \rho^3 + 3 \times \rho) \times \cos(\theta) \quad - \quad \text{coma du cinquième ordre en X}$$

$$Z_{14} = (10 \times \rho^5 - 12 \times \rho^3 + 3 \times \rho) \times \sin(\theta) \quad - \quad \text{coma du cinquième ordre en Y}$$

$Z_{15} = (20 \times \rho^6 - 30 \times \rho^4 + 12 \times \rho^2 - 1)$  – aberration sphérique du cinquième ordre

$$Z_{16} = \rho^4 \times \cos(4 \times \theta)$$

$$Z_{17} = \rho^4 \times \sin(4 \times \theta)$$

$$Z_{18} = (5 \times \rho^5 - 4 \times \rho^3) \times \cos(3 \times \theta)$$

$$Z_{19} = (5 \times \rho^5 - 4 \times \rho^3) \times \sin(3 \times \theta)$$

$$Z_{20} = (15 \times \rho^6 - 20 \times \rho^4 + 6 \times \rho^2) \times \cos(2 \times \theta)$$

$$Z_{21} = (15 \times \rho^6 - 20 \times \rho^4 + 6 \times \rho^2) \times \sin(2 \times \theta)$$

$$Z_{22} = (35 \times \rho^7 - 60 \times \rho^5 + 30 \times \rho^3 - 4 \times \rho) \times \cos(\theta)$$

$$Z_{23} = (35 \times \rho^7 - 60 \times \rho^5 + 30 \times \rho^3 - 4 \times \rho) \times \sin(\theta)$$

$$Z_{24} = (70 \times \rho^8 - 140 \times \rho^6 + 90 \times \rho^4 - 20 \times \rho^2 + 1)$$

$$Z_{25} = \rho^5 \times \cos(5 \times \theta)$$

$$Z_{26} = \rho^5 \times \sin(5 \times \theta)$$

$$Z_{27} = (6 \times \rho^6 - 5 \times \rho^4) \times \cos(4 \times \theta)$$

$$Z_{28} = (6 \times \rho^6 - 5 \times \rho^4) \times \sin(4 \times \theta)$$

$$Z_{29} = (21 \times \rho^7 - 30 \times \rho^5 + 10 \times \rho^3) \times \cos(3 \times \theta)$$

$$Z_{30} = (21 \times \rho^7 - 30 \times \rho^5 + 10 \times \rho^3) \times \sin(3 \times \theta)$$

$$Z_{31} = (56 \times \rho^8 - 105 \times \rho^6 + 60 \times \rho^4 - 10 \times \rho^2) \times \cos(2 \times \theta)$$

$$Z_{32} = (56 \times \rho^8 - 105 \times \rho^6 + 60 \times \rho^4 - 10 \times \rho^2) \times \sin(2 \times \theta)$$

$$Z_{33} = (126 \times \rho^9 - 280 \times \rho^7 + 210 \times \rho^5 - 60 \times \rho^3 + 5 \times \rho) \times \cos(\theta)$$

$$Z_{34} = (126 \times \rho^9 - 280 \times \rho^7 + 210 \times \rho^5 - 60 \times \rho^3 + 5 \times \rho) \times \sin(\theta)$$

$$Z_{35} = (252 \times \rho^{10} - 630 \times \rho^8 + 560 \times \rho^6 - 210 \times \rho^4 + 30 \times \rho^2 - 1)$$

$$Z_{36} = (924 \times \rho^{12} - 2772 \times \rho^{10} + 3150 \times \rho^8 - 1680 \times \rho^6 + 420 \times \rho^4 - 42 \times \rho^2 + 1)$$

où  $\rho$  et  $\theta$  représentent des coordonnées cylindriques.

# Annexe D

## Code du modèle optique de l'instrument SODISM

Le code développé sous MATLAB permet de déterminer la fonction d'étalement du point de l'instrument SODISM ( $\text{psf}_t(w_0)$ ) en fonction du gradient de température de la fenêtre d'entrée de l'instrument. L'étude est présentée au niveau de la Section [2.4.5](#).

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% SODISM / Modèle optique
% Front d'onde basé sur les polynômes de Zernike
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear all;
close all

%% Récupération du fichier d'entrée et paramètres du système optique
fid = fopen('input.txt'); % Longueur d'onde, rayon en as, focus,
gradient
data = fscanf(fid, '%f');
fclose(fid);

% Programme global
Z = data(7:42); % Zernike en nm
EPD = 90; % Diamètre de la pupille d'entrée (mm)
EFL = 2628.88315; % Focale du télescope (mm)
WL = data(1); % Longueur d'onde (nm)
FNO = EFL/EPD; % Ouverture relative (f/29.2098)
PIX = 13.5; % Largeur des pixels du détecteur (µm)

ep_hublot = 8.08; % Epaisseur du hublot d'entrée (mm)
r_norm = data(2); % Rayon de normalisation du profil HM98 (as)

% Calcul de la variation d'indice de la silice (dn/dT)
A0 = 8.241466462;
A1 = 524.4619629;
A2 = 7.836746871;
B1 = 45.22476821;
B2 = 211.2250895;
dndT = A0+A1*exp(-WL/B1)+A2*exp(-WL/B2); % ppm/K

% Terme de focus lié à la défocalisation
Z3_defoc = data(3)/(16*FNO^2)*1e6; %data(3)--> défocalisation en µm
% Terme de focus lié au gradient thermique de la fenêtre d'entrée
Z3_gradient = -data(4)*ep_hublot*dndT/2; % data(4)--> gradient en °C
% Terme de focus total (C3)
Z(3) = Z(3)+Z3_defoc+Z3_gradient;

% Terme de trèfle lié à un gradient thermique triangulaire (C5)
trefle_thermique = -data(5)*ep_hublot*dndT/2; %data(5)--> valeur en
°C
orientation_trefle_thermique = data(6)/180*pi(); %data(6)--> valeur
en °
Z(9) = Z(9)+trefle_thermique*cos(3*orientation_trefle_thermique);
Z(10) = Z(10)+trefle_thermique*sin(3*orientation_trefle_thermique);

% Zernike en lambda
Z = Z/WL;

%% Paramètres du calcul
GRI = 1.2745; % taille des pixels (µm)
TGR = 1024; % taille de la grille de la TF

%% Pupille
d_pup = 1/(GRI*TGR); % échantillonnage dans l'espace de Fourier

```

```

pupille = -(TGR-1)/2:(TGR-1)/2)*d_pup*EFL*WL*1e-3;
[X,Y] = meshgrid(pupille/(EPD/2));
rho = sqrt(X.^2 + Y.^2);
theta = 2*atan(-Y.*(X+sqrt(X.^2 + Y.^2)).^-1);

%% Front d'onde
Z0 = 0; % piston nul
Z1 = Z(1)*rho.*cos(theta); % tilt X
Z2 = Z(2)*rho.*sin(theta); % tilt Y
Z3 = Z(3)*(2*rho.^2-1); % focus
Z4 = Z(4)*rho.^2.*cos(2*theta); % astig 0°
Z5 = Z(5)*rho.^2.*sin(2*theta); % astig 45°
Z6 = Z(6)*(3*rho.^3-2*rho).*cos(theta); % coma X
Z7 = Z(7)*(3*rho.^3-2*rho).*sin(theta); % coma Y
Z8 = Z(8)*(6*rho.^4-6*rho.^2+1); % aberration sphérique 3ème ordre
Z9 = Z(9)*rho.^3.*cos(3*theta); % astig tri 0°
Z10 = Z(10)*rho.^3.*sin(3*theta); % astig tri 30°
Z11 = Z(11)*(4*rho.^4-3*rho.^2).*cos(2*theta); % astig 5ème ordre 0°
Z12 = Z(12)*(4*rho.^4-3*rho.^2).*sin(2*theta); % astig 5ème ordre 45°

% coma 5ème ordre X
Z13 = Z(13)*(10*rho.^5-12*rho.^3+3*rho).*cos(theta);
% coma 5ème ordre Y
Z14 = Z(14)*(10*rho.^5-12*rho.^3+3*rho).*sin(theta);
% aberration sphérique 5ème ordre
Z15 = Z(15)*(20*rho.^6-30*rho.^4+12*rho.^2-1);
% astig quad 0°
Z16 = Z(16)*rho.^4.*cos(4*theta);
% astig quad 22,5°
Z17 = Z(17)*rho.^4.*sin(4*theta);
% astig tri 7ème ordre 0°
Z18 = Z(18)*(5*rho.^5-4*rho.^3).*cos(3*theta);
% astig tri 7ème ordre 30°
Z19 = Z(19)*(5*rho.^5-4*rho.^3).*sin(3*theta);
% astig 7ème ordre 0°
Z20 = Z(20)*(15*rho.^6-20*rho.^4+6*rho.^2).*cos(2*theta);
% astig 7ème ordre 45°
Z21 = Z(21)*(15*rho.^6-20*rho.^4+6*rho.^2).*sin(2*theta);
% coma 7ème ordre X
Z22 = Z(22)*(35*rho.^7-60*rho.^5+30*rho.^3-4*rho).*cos(theta);
% coma 7ème ordre Y
Z23 = Z(23)*(35*rho.^7-60*rho.^5+30*rho.^3-4*rho).*sin(theta);
% aberration sphérique 7ème ordre
Z24 = Z(24)*(70*rho.^8-140*rho.^6+90*rho.^4-20*rho.^2+1);
% astig penta 0°
Z25 = Z(25)*rho.^5.*cos(5*theta);
% astig penta 18°
Z26 = Z(26)*rho.^5.*sin(5*theta);
% astig quad 9ème ordre 0°
Z27 = Z(27)*(6*rho.^6-5*rho.^4).*cos(4*theta);
% astig quad 9ème ordre 22,5°
Z28 = Z(28)*(6*rho.^6-5*rho.^4).*sin(4*theta);
% astig tri 9ème ordre 0°
Z29 = Z(29)*(21*rho.^7-30*rho.^5+10*rho.^3).*cos(3*theta);
% astig tri 9ème ordre 30°
Z30 = Z(30)*(21*rho.^7-30*rho.^5+10*rho.^3).*sin(3*theta);

```

```

% astig 9ème ordre 0°
Z31 = Z(31)*(56*rho.^8-105*rho.^6+60*rho.^4-
10*rho.^2).*cos(2*theta);
% astig 9ème ordre 45°
Z32 = Z(32)*(56*rho.^8-105*rho.^6+60*rho.^4-
10*rho.^2).*sin(2*theta);
% coma 9ème ordre X
Z33 = Z(33)*(126*rho.^9-280*rho.^7+210*rho.^5-
60*rho.^3+5*rho).*cos(theta);
% coma 9ème ordre Y
Z34 = Z(34)*(126*rho.^9-280*rho.^7+210*rho.^5-
60*rho.^3+5*rho).*sin(theta);
% aberration sphérique 9ème ordre
Z35 = Z(35)*(252*rho.^10-630*rho.^8+560*rho.^6-210*rho.^4+30*rho.^2-
1);
% aberration sphérique 11ème ordre
Z36 = Z(36)*(924*rho.^12-2772*rho.^10+3150*rho.^8-...
-1680*rho.^6+420*rho.^4-42*rho.^2+1);

W_0 = Z1+Z2+Z3+Z4+Z5+Z6+Z7+Z8;
W_0 = W_0+Z9+Z10+Z11+Z12+Z13+Z14+Z15;
W_0 = W_0+Z16+Z17+Z18+Z19+Z20+Z21+Z22+Z23+Z24;
W_0 = W_0+Z25+Z26+Z27+Z28+Z29+Z30+Z31+Z32+Z33+Z34+Z35+Z36;

W_0(rho>1) = 0;

% Front d'onde complexe
E = exp(2*1i*pi*W_0);

% Obstruction centrale et araignée
masque_0 = ones(TGR);
masque_0(rho>1) = 0;
masque_0(rho<0.505556) = 0; % obstruction centrale
X_bis = imrotate(X, 30, 'bilinear', 'crop');
X_ter = imrotate(X, -30, 'bilinear', 'crop');
masque_0(Y<0.033333 & Y>-0.033333 & X>0) = 0; % araignée 1
masque_0(X_bis<0.033333 & X_bis>-0.033333 & Y<0) = 0; % araignée 2
masque_0(X_ter<0.033333 & X_ter>-0.033333 & Y>0) = 0; % araignée 3
E = E.*masque_0;

%% PSF
PSF_0 = abs(fftshift(fft2(E))).^2;

% Rotation à 180° pour se remettre dans le repère image télescope
PSF_0 = imrotate(PSF_0, 180);
PSF_0 = PSF_0/sum(PSF_0(:));
echelle = (-(TGR-1)/2:(TGR-1)/2)*GRI;

% Affichage de la PSF pour le secteur 0°
figure
imagesc(echelle,echelle,PSF_0);

% Export de la PSF dans un fichier texte
fid = fopen('PSF_0.txt','w');
dlmwrite('PSF_0.txt', PSF_0, ' ')
fclose(fid);

```

# Notations

## – Abréviations –

ACRIM	Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor
as	seconde d'arc (arc-second)
ASH	Anelastic Spherical Harmonics – code hydro-magnétique en 3-D
ATLAS-3	ATmospheric Laboratory for Applications and Science
CCD	Charge Coupled Device (détecteur)
CESAM	Code d'Evolution Stellaire Adaptatif et Modulaire
COSI	COde for Solar Irradiance
DORAYSOL	Définition et Observation du RAYon SOLaire
FWHM	Full Width at Half Maximum (largeur à mi-hauteur)
HMI	Helioseismic and Magnetic Imager
HSRA	Harvard Smithsonian Reference Atmosphere
IASB	Institut royal d'Aéronomie Spatiale de Belgique
IMCCE	Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides
IRMB	Institut Royal Météorologique de Belgique
LATMOS	Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales
LDF	Limb Darkening Function (assombrissement du limbe solaire)
LPC2E	Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement et de l'Espace
mas	millièmes de seconde d'arc (milli-arc-second)
MATLAB	MATrix LABoratory
MDI	Michelson Doppler Imager
MISOLFA	Moniteur d'Images Solaires Franco-Algérien
NRLSSI	Naval Research Laboratory Solar Spectral Irradiance
PMOD	Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos
PREMOS	PREcision MONitor Sensor
PICARD SOL	Composante sol de la mission PICARD
psf	Point Spread Function (fonction d'étalement du point)
PSPT	Precision Solar Photometric Telescope

SA	Service d'Aéronomie (actuellement LATMOS)
SATIRE	Spectral And Total Irradiance REconstruction
RHESSI	Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager
RMS	Root Mean Square (moyenne quadratique)
SCIAMACHY	SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartographY
SCLERA	Santa Catalina Laboratory for Experimental (télescope) Relativity by Astrometry
SDO	Solar Dynamics Observatory
SDS	Solar Disk Sextant
SIRS	Solar Irradiance Reference Spectra
SODISM	Solar Diameter Imager and Surface Mapper
SODISM II	Solar Diameter Imager and Surface Mapper (réplique utilisée au sol)
SoHO	Solar and Heliospheric Observatory
SOLSPEC	SOLar SPECTral Irradiance Measurements
SORCE	Solar Radiation and Climate Experiment
SOVAP	Solar VARIability PICARD
SSI	Solar Spectral Irradiance (éclairage solaire spectral)
TIM	Total Irradiance Monitor
TSI	Total Solar Irradiance (éclairage solaire total)
UTC	Temps Universel Coordonné
WHI 2008	The 2008 Whole Heliosphere Interval
ZAMS	Zero Age Main Sequence

– Symboles –

$c$	Vitesse de la lumière – $c = 299\,792\,458\, m\, s^{-1}$
$k$	Constante de Boltzmann – $k = 1.380648813 \times 10^{-23}\, J\, K^{-1}$
$h$	Constante de Planck – $h = 6.6260695729 \times 10^{-34}\, J\, s$
$G$	Constante de Gravitation – $G = 6.67408 (\pm 0.00031) \times 10^{-11}\, m^3\, kg^{-1}\, s^{-2}$
$pc$	Parsec – $1\, pc$ vaut exactement $648000\, ua/\pi$
$M_{\odot}$	Masse du Soleil
$R_{\odot}$	Rayon du Soleil
$T_{\odot}$	Température effective du Soleil
$T_0$	Température de surface du Soleil
$\mathcal{R}$	Constante des gaz parfaits
$ua$	Unité astronomique de longueur

$\Pi_{\odot}$	Parallaxe horizontale équatoriale moyenne du Soleil
$r$	Rayon de la sphère solaire
$m(r)$	Masse de la sphère solaire
$P(r)$	Pression de la sphère solaire
$T(r)$	Température de la sphère solaire
$L(r)$	Luminosité de la sphère solaire
$S(r)$	Entropie de la sphère solaire
$a_{\text{☿}}$	Demi-grand axe de l'orbite de Mercure – $a_{\text{☿}} = 57\,909\,176\text{ km}$
$e_{\text{☿}}$	Excentricité de l'orbite de Mercure – $e_{\text{☿}} = 0.20563069$
$T_{\text{☿}}$	Période de révolution de Mercure – $T_{\text{☿}} = 87.96934\text{ jours}$
–	–
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann – $\sigma = 5.670373\,10^{-8}\text{ W m}^{-2}\text{ K}^{-4}$
$\mu_H$	Masse molaire de l'hydrogène
$\mu_{He}$	Masse molaire de l'hélium
$\mu_0$	Perméabilité magnétique du vide
$\epsilon_0$	Permittivité diélectrique du vide
$\tau$	Profondeur optique
$\rho(r)$	Densité de la sphère solaire, masse volumique
$\epsilon(r)$	Taux de production d'énergie
$\kappa(r)$	Opacité dépendant de la composition chimique et du transport radiatif
$\mu$	Poids moléculaire moyen associé aux espèces chimiques composant le plasma
$\Delta\text{IPP}$	Position du point d'inflexion par rapport à une mesure à 535.7 nm