

Université de Montréal

Modélisation de l'irradiance solaire spectrale dans le proche et moyen ultraviolet

par
Cassandra Bolduc

Département de physique
Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)
en physique

Avril, 2011

© Cassandra Bolduc, 2011.

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé:

Modélisation de l'irradiance solaire spectrale dans le proche et moyen ultraviolet

présenté par:

Cassandra Bolduc

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes:

René Doyon,	président-rapporteur
Paul Charbonneau,	directeur de recherche
Gilles Fontaine,	membre du jury

Mémoire accepté le: 4 juillet 2011

RÉSUMÉ

Nous présentons un modèle pour l'irradiance solaire spectrale entre 200 et 400 nm. Celui-ci est une extension d'un modèle d'irradiance solaire totale basé sur la simulation de la fragmentation et l'érosion des taches qui utilise, en entrée, les positions et aires des taches observées pour chaque pas de temps d'une journée. L'émergence des taches sur la face du Soleil opposée à la Terre est simulée par une injection stochastique. Le modèle simule ensuite leur désintégration, qui produit des taches plus petites et des facules. Par la suite, l'irradiance est calculée en sommant la contribution des taches, des facules et du Soleil inactif. Les paramètres libres du modèle sont ajustés en comparant les séquences temporelles produites avec les données provenant de divers satellites s'étalant sur trois cycles d'activité. Le modèle d'irradiance spectrale, quant à lui, a été obtenu en modifiant le calcul de la contribution des taches et des facules, ainsi que celle du Soleil inactif, afin de tenir compte de leur dépendance spectrale. Le flux de la photosphère inactive est interpolé sur un spectre synthétique non magnétisé, alors que le contraste des taches est obtenu en calculant le rapport du flux provenant d'un spectre synthétique représentatif des taches et de celui provenant du spectre représentatif du Soleil inactif. Le contraste des facules est quand à lui calculé avec une procédure simple d'inversion de corps noir. Cette dernière nécessite l'utilisation d'un profil de température des facules obtenu à l'aide de modèles d'atmosphère. Les données produites avec le modèle d'irradiance spectrale sont comparées aux observations de SOLSTICE sur UARS. L'accord étant peu satisfaisant, particulièrement concernant le niveau d'irradiance minimal ainsi que l'amplitude des variations, des corrections sont appliquées sur le flux du Soleil inactif, sur le profil de température des facules, ainsi qu'à la dépendance centre-bord du contraste des facules. Enfin, un profil de température des facules est reconstruit empiriquement en maximisant l'accord avec les observations grâce à un algorithme génétique. Il est utilisé afin de reconstruire les séquences temporelles d'irradiance jusqu'en 1874 à des longueurs d'ondes d'intérêt pour la chimie et la dynamique stratosphérique.

Mots clés: Soleil : irradiance spectrale : ultraviolet : variabilité radiative

ABSTRACT

We present a model for spectral solar irradiance between 200 and 400 nm. It is an extension of a model for total solar irradiance based on sunspots fragmentation and erosion. This model takes the observed sunspot position and area as input for every one-day time step whereas emergences on the far side of the Sun are injected stochastically. The model simulates the spot's disintegration and fragmentation into smaller structures such as spots and faculae and produces a magnetic structures area distribution evolving with time. The model contains many free parameters controlling the spots fragmentation, the quiet Sun irradiance, etc. They are adjusted by comparing the model outputs with observations from satellites spanning approximately three activity cycles. The model for spectral irradiance is a modified version of the model for total irradiance. More precisely, the spots and faculae contrast calculation and the quiet Sun contribution are adjusted to account for their spectral dependence. First, the quiet Sun flux is interpolated on a non magnetic synthetic spectrum, while the spots contrast is calculated with the ratio of the flux from a synthetic spectrum colder than the non magnetic photosphere, and the flux from a quiet Sun spectrum. The facular brightening is calculated with a simple procedure using the black body theory. This procedure interpolates a temperature associated with the formation height of photons from faculae on a temperature profile resulting from model atmosphere calculations. The spectral irradiance time series calculated with the model are compared to data from SOLSTICE on UARS. The two data sets do not agree very well, especially when we consider the minimum irradiance level and the amplitude variations over a complete cycle. Therefore, we apply a correction on the quiet Sun level and on the facular temperature profile. Finally, using a genetic algorithm, we reconstruct an empirical facular temperature profile by maximizing the fitness with observations. We use it to reconstruct spectral irradiance time series starting in 1874 at wavelengths of interest for stratospheric chemistry and dynamics.

Keywords: Sun: spectral irradiance: ultraviolet: relative variability

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	iii
ABSTRACT	iv
TABLE DES MATIÈRES	v
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES ANNEXES	x
LISTE DES SIGLES	xi
DÉDICACE	xii
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
1.1 Mesures de l'irradiance	1
1.1.1 Irradiance totale	1
1.1.2 Irradiance spectrale	3
1.2 Les sources de variabilité	7
1.2.1 Modélisation de l'irradiance totale	11
1.2.2 Modélisation de l'irradiance spectrale	14
1.3 Influences sur le climat terrestre	15
1.4 Modélisation de l'irradiance spectrale dans l'ultraviolet : présentation de l'article et de l'annexe	18
CHAPITRE 2 :	20
2.1 Introduction	21
2.2 The reconstruction Model	24
2.2.1 TSI reconstruction with a model based on active region decay	24

2.2.2	Adaptation for Spectral Irradiance in UV	27
2.3	Results	31
2.3.1	Spectral irradiance data : UARS/SOLSTICE	31
2.3.2	Modifications to the model	33
2.4	Validation, reconstructions and correlations	45
2.4.1	Validation	45
2.4.2	Reconstruction	47
2.4.3	Correlations	47
2.5	Discussion and conclusions	50
2.6	Acknowledgements	53
	BIBLIOGRAPHIE	54
	CHAPITRE 3 : CONCLUSION	62
	REMERCIEMENTS	65
	BIBLIOGRAPHIE	66
I.1	Fonctionnement de l’algorithme génétique	xiii
I.2	Corrections sur le modèle de l’irradiance spectrale	xv

LISTE DES TABLEAUX

1.I	Synthèse des instruments ayant mesuré l'irradiance solaire spectrale dans l'ultraviolet et de leurs caractéristiques.	5
2.I	Optimal temperature, original FAL-P model temperature, quiet-Sun temperature, quiet Sun flux and formation height for each wavelength.	43

LISTE DES FIGURES

1.1	Séquences temporelles des mesures d'irradiance totale acquises depuis 1978 et séquences de données composites.	4
1.2	Spectre solaire et variabilité de l'irradiance spectrale.	6
1.3	Image en visible prise le 30 mars 2001 par le MDI sur SOHO.	8
1.4	Magétogramme pris le 30 mars 2001 par le MDI sur SOHO.	9
1.5	Séquences temporelles de l'irradiance totale du composite PMOD d_41_61_1102 et de la couverture surfacique des taches lissées sur 81 jours.	10
1.6	Contribution à l'irradiance totale des taches, des facules et de leur somme en fonction du temps.	11
2.1	Comparison between reconstructed and observed TSI.	28
2.2	Observed and synthetic solar spectra.	29
2.3	Formation height for FAL-B and FAL-P models.	32
2.4	Mean flux over the ten realizations of the model at 210.5 nm with different seeds for the random number generators used for synthetic emergences, and mean $\pm\sigma$	36
2.5	Best-fitting model fitness and parameter values in function of generation for the 210.5 nm model.	37
2.6	Observed and reconstructed spectral irradiance time series for $\lambda = 210.5, 220.5, 240.5$ and 300.5 nm.	39
2.7	Kurucz synthetic spectrum with $T_{eff} = 5750$ K and $T_{eff} = 5250$ K, UARS minimum activity spectrum, Atlas 3 and Atlas 1 spectra.	41
2.8	FAL-B and FAL-P temperature profile, and piecewise linear fit to the optimized facular temperatures found with Pikaia for given wavelengths and their associated formation height.	42

2.9	Difference between optimal facular temperature profile and FAL-P temperatures at a given wavelength versus relative correction on the quiet Sun flux level.	44
2.10	Observed and reconstructed spectral irradiance time series for $\lambda = 230.5$, 250.5 , 350.5 and 370.5 nm.	46
2.11	ATLAS 1 spectrum and reconstructed spectrum for the same day.	48
2.12	Spectral irradiance time series from 1874 to 2002, for $\lambda = 210.5$, 240.5 , 300.5 and 370.5 nm.	49
2.13	Correlation between flux at $\lambda = 210.5$ nm and $\lambda = 220.5$ nm, $\lambda = 220.5$ nm and $\lambda = 280.5$ nm, $\lambda = 240.5$ nm and $\lambda = 300.5$ nm and $\lambda = 280.5$ nm and $\lambda = 240.5$ nm, for the model and for observations.	51

LISTE DES ANNEXES

Annexe I :	Optimisation des paramètres à l'aide d'un algorithme génétique	
	tique xiii

LISTE DES SIGLES

ETL	Équilibre Thermodynamique Local
SSI	Spectral Solar Irradiance
TSI	Total Solar Irradiance

À Jean-Guy, Marie-Claude, Gabrielle et Pierre-Luc.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

L'irradiance solaire, ou constante solaire, est la puissance lumineuse émise par le Soleil, incidente sur une unité de surface, à une distance d'une unité astronomique. Cette valeur peut être donnée pour un intervalle de longueur d'onde $d\lambda$ centré à une certaine longueur d'onde λ ; on parle dans ce cas d'irradiance spectrale. Elle peut aussi être intégrée sur le spectre électromagnétique complet ; on parle donc d'irradiance totale.

L'énergie lumineuse du Soleil fournit plus de 99% de l'apport énergétique reçu à la surface de la Terre, déterminant ainsi sa température de surface. La découverte de la variabilité de l'irradiance pose donc le problème de déterminer si cette variation peut influencer le climat planétaire.

1.1 Mesures de l'irradiance

1.1.1 Irradiance totale

Les premières mesures de l'irradiance totale remontent au milieu du 19^e siècle. La découverte de la variation cyclique du nombre de taches sombres à la surface du Soleil motiva la prise de données régulières afin de déterminer si leur présence pouvait en influencer la valeur mesurée. Le *Smithsonian Astrophysical Observatory* effectua des observations au sol durant l'intervalle 1902-1957, ce qui permis d'établir certaines corrélations entre la couverture de taches sombres et la quantité d'énergie lumineuse émise. Selon l'échelle temporelle considérée, la présence de taches semblait coïncider avec une diminution ou une augmentation de luminosité. Le premier cas a été décelé sur de courtes échelles temporelles tandis que le second était plutôt observé sur des périodes correspondant au cycle d'activité de 11 ans. Par contre, il a été démontré que les variations observées étaient grandement influencées par les perturbations de l'atmosphère terrestre (Fröhlich and Lean (2004)).

Des mesures précises de l'irradiance solaire totale ont pu être effectuées à l'aide

d'instruments en orbite, pouvant ainsi s'affranchir de l'absorption et de la turbulence atmosphériques. Une panoplie de détecteurs à bord de divers satellites ont été utilisés à cette fin depuis plus d'une trentaine d'années, par exemple : le radiomètre *Hickey-Frieden* (HF) à bord de la mission NIMBUS 7 du NOAA/NASA, l'*Active Cavity Radiometer for Irradiance Monitoring* (ACRIM I) à bord de la mission *Solar Maximum Mission* (SMM) de la NASA, le *Earth Radiation Budget Experiment* (ERBE) sur le *Earth Radiation Budget Satellite* de la NASA, l'instrument ACRIM II à bord du *Upper Atmospheric Research Satellite* (UARS) de la NASA, le *European Retrievable Carrier* (EURECA), l'instrument *Variability of Irradiance and Gravity Oscillations* (VIRGO) à bord de la mission *Solar and Heliospheric Observatory* (SOHO), le radiomètre ACRIM III à bord de ACRIMSat, et finalement le *Total Solar Irradiance Monitor* (TIM) à bord de *Solar Radiation and Climate Experiment* (SORCE) (Domingo et al. (2009), Fröhlich and Lean (2004)). Les séquences temporelles de mesures d'irradiance acquises par ces instruments sont comparées sur la figure 1.1 rendue disponible par le Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos / World Radiation Center. Il est à noter que seuls les instruments ACRIM I, II et III et VIRGO sont corrigés pour la dégradation des détecteurs.

Ces instruments et détecteurs ont une précision absolue d'environ 0.1 à 0.2%, alors que l'amplitude du cycle de 11 ans de l'irradiance est d'environ 0.1%. Il faut donc compter sur la précision relative des instruments, c'est-à-dire leur capacité à répéter les mesures à long terme, afin d'observer les variations cycliques de l'irradiance totale (Fröhlich and Lean (2002)). La combinaison des données des divers instruments en une séquence continue nécessite donc de calibrer les niveaux observés afin d'en extraire le cycle. Le composite *Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos* (PMOD) utilise les données de Nimbus 7 et de ACRIM avant 1996 et les données de VIRGO sur SOHO après cette date (Fröhlich and Lean (2002)). Le composite ACRIM, comme son nom l'indique, est quant à lui basé essentiellement sur les données acquises par les instruments du même nom (Willson and Mordvinov (2003)). La principale différence entre ces deux composites est la tendance observée dans le niveau minimal d'irradiance. En effet, le composite PMOD montre des niveaux similaires pendant les minima de 1986 et

1996, tandis que le composite ACRIM montre un niveau plus élevé pendant le minimum de 1996. Cela semble suggérer une variabilité à long terme indépendante du cycle de 11 ans (Fröhlich and Lean (2004)). Des observations plus récentes incluant le minimum prolongé entre les cycles 23 et 24 en 2008 indiquent un niveau d'irradiance totale inférieur de 0.2 Wm^{-2} au niveau minimal de 1996 du composite PMOD (Fröhlich (2009)). Il est donc probable qu'un phénomène influence le niveau d'irradiance totale de façon indépendante de ceux qui régissent les variations sur des échelles temporelles de l'ordre d'un cycle magnétique. De plus, il faut également noter la différence frappante du niveau d'irradiance totale mesurée par l'instrument TIM sur SORCE depuis 2003 en comparaison avec les mesures de VIRGO et ACRIM III, de l'ordre de 4 Wm^{-2} , qui reste encore inexplicée (Kopp et al. (2005) et références qui s'y trouvent).

Finalement, la séquence se poursuit avec le satellite PICARD, lancé en juin 2010, qui possède à son bord l'instrument SOVAP, destiné à mesurer l'irradiance solaire totale durant le cycle 24 (Thuillier et al. (2003b)). Les premières données scientifiques devraient être obtenues en 2011 et la durée prévue de la mission est de deux ans.

1.1.2 Irradiance spectrale

Les observations de l'irradiance spectrale ont quant à elles été faites directement en orbite, particulièrement dans l'ultraviolet et les rayons X, étant donné l'absorptivité de l'atmosphère terrestre à ces longueurs d'ondes. Une panoplie d'instruments ont acquis des mesures dans plusieurs régions du spectre, et ce pendant des périodes plus ou moins étendues depuis le début des années 1980, tel que détaillés dans le tableau 1.I.

Dans la région spectrale d'intérêt pour cette recherche, soit le proche et moyen ultraviolet, les données les plus complètes, autant du point de vue de l'intervalle spectral que de l'étendue temporelle, proviennent sans doute des instruments SOLSTICE et SUSIM sur UARS. Les données couvrent l'intervalle de 115 nm à 425 nm de 1991 à 2002. En 2003, le satellite SORCE a pris la relève et poursuit l'acquisition de données d'irradiance dans l'ultraviolet (Domingo et al. (2009)).

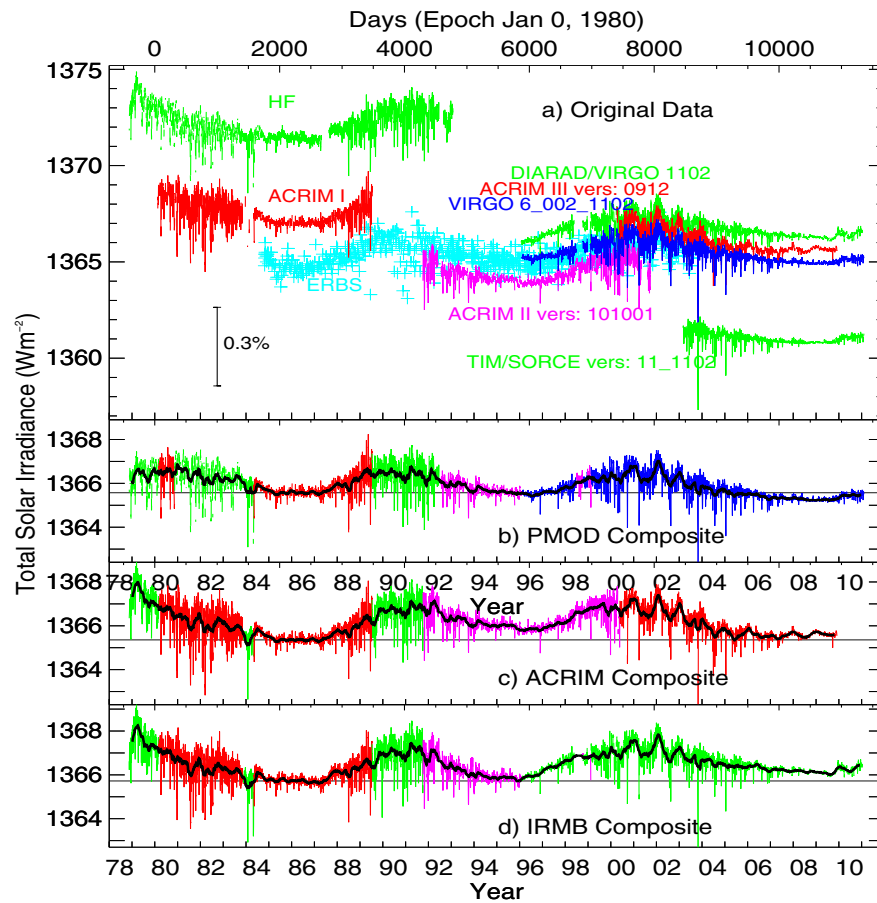


Figure 1.1 – Séquences temporelles des mesures d’irradiance totale acquises depuis 1978 et séquences de données composites, tirée de ftp://ftp.pmodwrc.ch/pub/data/irradiance/composite/DataPlots/org_comp2_d41_62_1102_vg.pdf. Il est à noter que les corrections appliquées sur les séquences de données brutes dépassent souvent en amplitude les variations intrinsèques de l’irradiance.

Instrument	Satellite/mission	Intervalle spectral	Intervalle temporel	Références
Solar Backscatter Ultraviolet (SBUV)	Nimbus-7	256, 273, 283, 288, 292, 298, 302, 306, 312, 318, 331 et 340 nm	1978-1990	DeLand and Cebula (2001)
Spectral Irradiance Monitor (SIM)	Solar Radiation and Climate Experiment (SORCE)	200-2400 nm	2003-...	Rottman et al. (2005) et Har-der et al. (2010)
Solar Ultraviolet Monitor	Solar Mesosphere Explorer (SME)	1989-1991	200-310nm	Thomas et al. (1980) Rottman (1988)
SBUV/2 et SBUV/3	NOAA-9 et NOAA-11	170-400nm	1985-1997 et 1988-1994	DeLand et al. (2004), DeLand and Cebula (1998) et Cebula et al. (1998)
Solar Stellar Irradiance Comparison Experiment (SOLSTICE) et Solar Ultraviolet Irradiance Monitor (SUSIM)	Upper Atmospheric Research Satellite (UARS)	119-420nm	1991-2002	Rottman et al. (2001) et Floyd et al. (2002)
SOLar SPECTrum (SOLSPEC) et SOLar SPECTrum (SOSP)	Atmospheric Laboratory for Applications and Science (ATLAS) et European Retrievable Carrier (EURECA)	200-3000nm	1992, 1993, 1994	Thuillier et al. (2003a), Thuillier et al. (1997), Thuillier et al. (1998)
Global Ozone Monitoring Experiment (GOME)	European Remote Sensing satellite (ERS-2)	240-790 nm	1995-...	Weber et al. (1998)
Solar EUV Experiment (SEE)	Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics Dynamics (TIMED)	0.1-194 nm	2001-...	Woods et al. (2005)
SCanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric CHartography (SCIAMACHY)	Environment Satellite (ENVISAT)	240-2380 nm	2002-...	Skupin et al. (2005)
Variability of Solar Irradiance and Oscillations (VIRGO)	Solar and Heliospheric Observatory (SOHO)	402, 500 et 862 nm	1995-...	Fröhlich et al. (1995)
PRECision MOonitoring Sensor (PREMOS)	PICARD	215, 268, 535, 607 et 782 nm	2010-...	Thuillier et al. (2003b)

Tableau 1.1 – Synthèse des instruments ayant mesuré l'irradiance solaire spectrale dans l'ultraviolet et de leurs caractéristiques.

Grâce à ces nombreuses missions, la variabilité du spectre solaire en fonction de la longueur d'onde a pu être déterminée. Celle-ci est superposée au spectre lui-même sur la figure 1.2 tirée de Domingo et al. (2009).

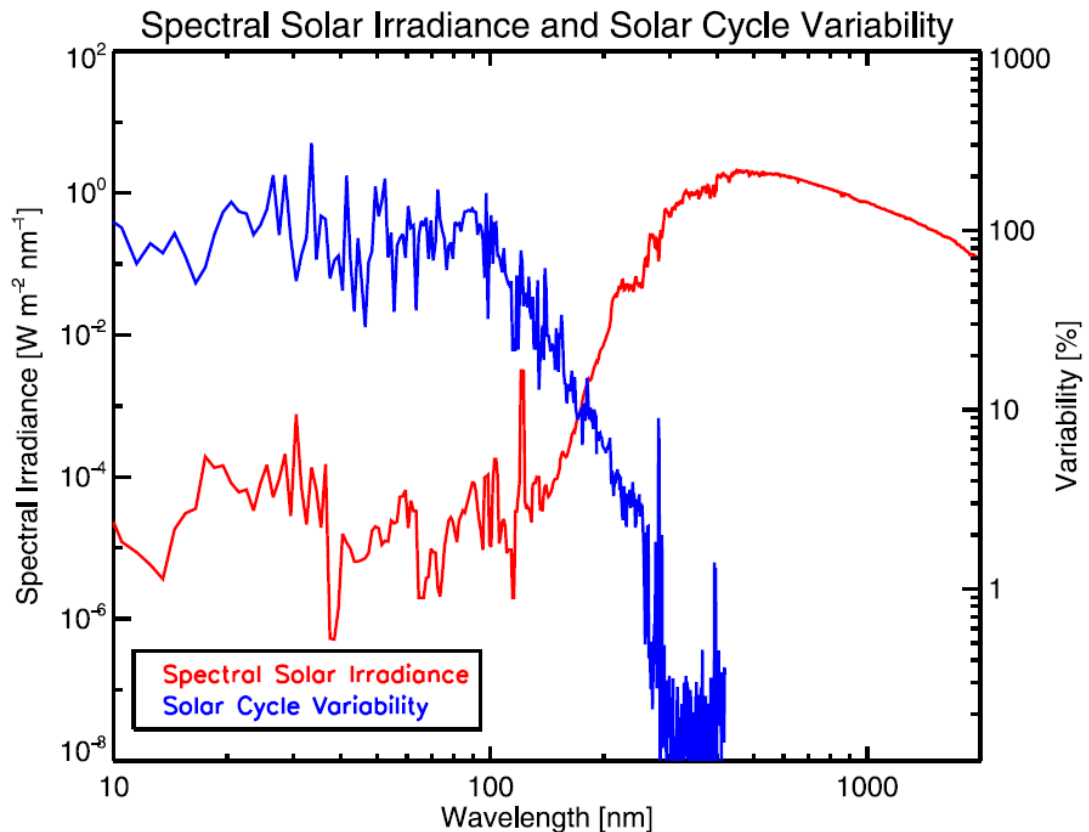


Figure 1.2 – Spectre solaire et variabilité de l'irradiance spectrale, figure 2 de V. Domingo, et al. (2009) Space Sci. Rev., 145 :337–380.

Il est possible de constater que dans l'ultraviolet, la variabilité passe de l'ordre de 1% à environ 100% pour les longueurs d'ondes plus courtes, ce qui est énorme en comparaison du 0.1% observé sur l'énergie intégrée sur le spectre total. Ces longueurs d'onde contribuent peu à l'intégrale spectrale, mais sont la source d'une grande partie de la variabilité.

D'autre part, les variations du niveau minimal d'irradiance totale visibles dans le composite PMOD mentionnées précédemment (Fröhlich (2009)) ne sont pas retrouvées dans les séquences temporelles d'irradiance ultraviolette. Cela suggère qu'un mé-

canisme régit les variations sur l'ordre d'un cycle, tandis qu'un second provoque une variation de luminosité du Soleil inactif et que ce dernier n'a pas d'influence dans la région spectrale de l'UV. La prochaine section détaille les mécanismes sous-jacents aux variations de l'irradiance et tente d'établir la distinction entre les variations cycliques et celles à plus long terme.

1.2 Les sources de variabilité

Sur de courtes échelles temporelles, soit de l'ordre d'une dizaine de secondes à une dizaine de minute, il est bien connu que les variations de l'irradiance proviennent des oscillations solaire (modes P) et de la granulation (Unruh et al. (2008)).

À plus long terme, il est logique de supposer que la présence de taches sombres à la surface du Soleil puisse influencer à la baisse la quantité d'énergie qu'il émet, ce qui a été démontré grâce aux observations du SMM (Willson et al. (1981)) sur des échelles temporelles correspondant à la période d'une rotation solaire.

La variabilité associée au cycle de 11 ans a été confirmée plus tard, alors que des données sur plus d'un cycle ont été disponibles. Il a été démontré que l'irradiance était maximale lors des maxima d'activité, c'est-à-dire lorsque le nombre de taches est à son apogée. Ce paradoxe s'explique par le fait que l'apparition des taches est accompagnée de celles de facules, qui sont d'aire inférieure, mais qui sont beaucoup plus brillantes que le Soleil inactif et qui apparaissent en nombre largement supérieur à celui des taches. Leur effet global, accompagné de celui du réseau, a pour effet d'augmenter la luminosité du Soleil (Foukal and Lean (1988)). Les figures 1.3 et 1.4 montrent respectivement une image du Soleil dans le visible et un magnétogramme prises toutes deux le 30 mars 2001, soit pendant le maximum du cycle 23, par le Michelson Doppler Imager sur le SOLar and Heliospheric Observatory (SOHO). Sur la première image, les taches sombres sont parfaitement visibles, tandis que les facules sont un peu plus discrètes, mais apparaissent de façon très distincte près des bords. La seconde illustre les champs magnétiques associés à ces structures qui s'étendent bien au-delà de leur partie visible.

Puisque des données d'irradiance sont maintenant disponibles sur trois cycles com-

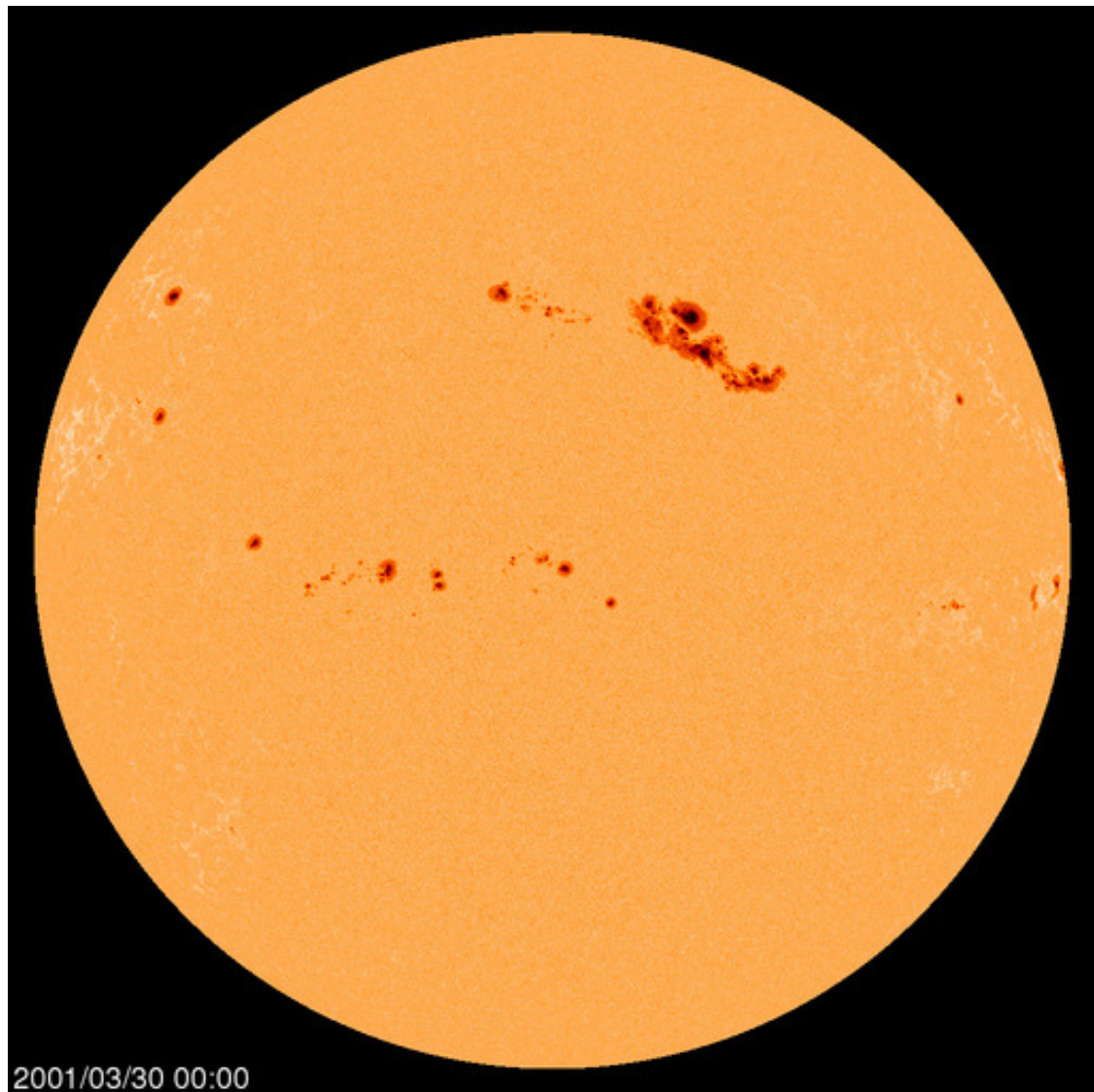


Figure 1.3 – Image en visible prise le 30 mars 2001 par le MDI sur SOHO.

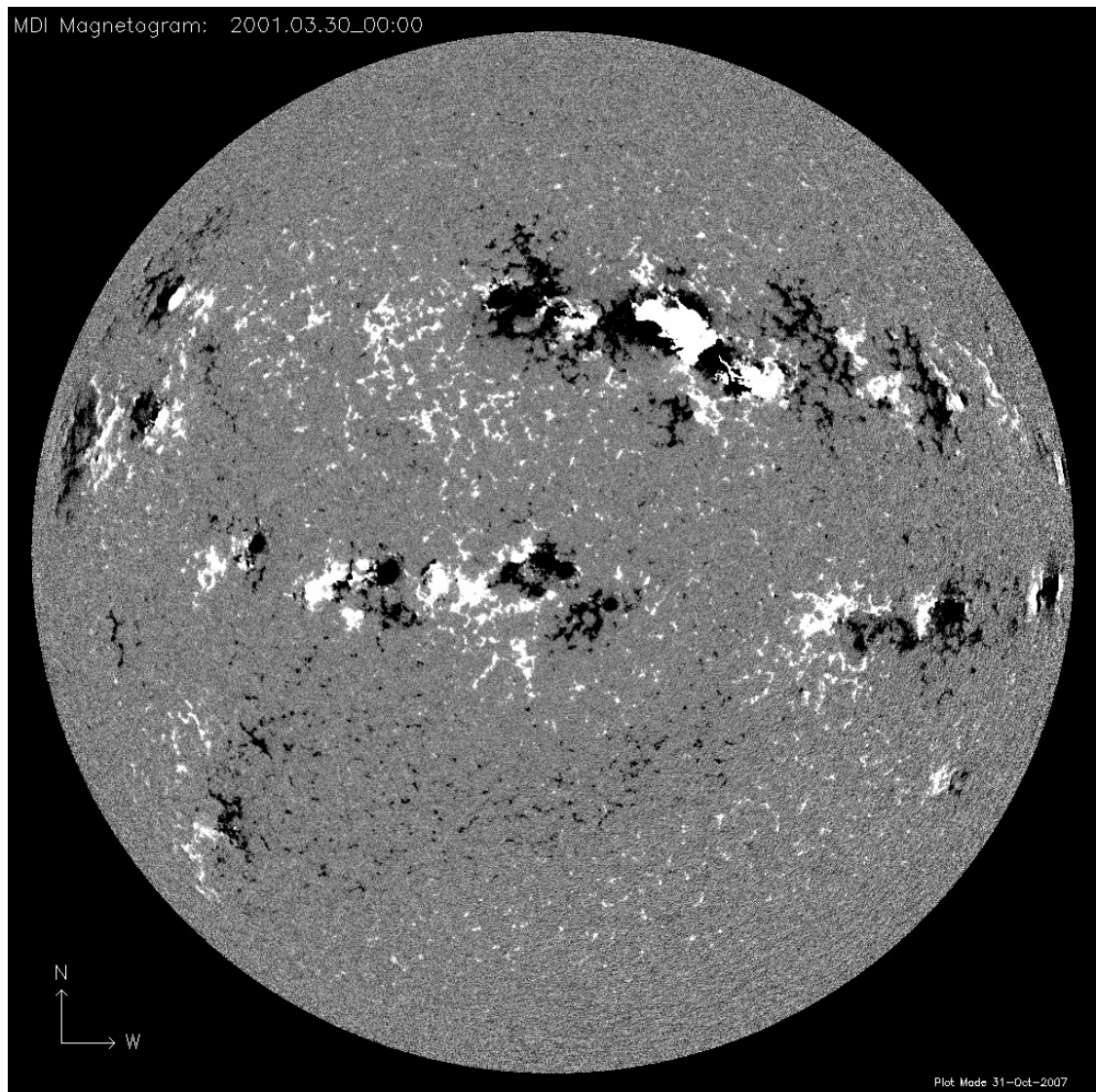


Figure 1.4 – Magétogramme pris le 30 mars 2001 par le MDI sur SOHO.

plets, la corrélation entre le cycle de l'irradiance totale et le cycle des taches est indéniable, comme le montre la figure 1.5, sur laquelle sont comparées la couverture surfacique des taches rendues disponibles par David Hathaway ¹, ainsi que l'irradiance solaire totale du composite PMOD d_41_61_1102 ².

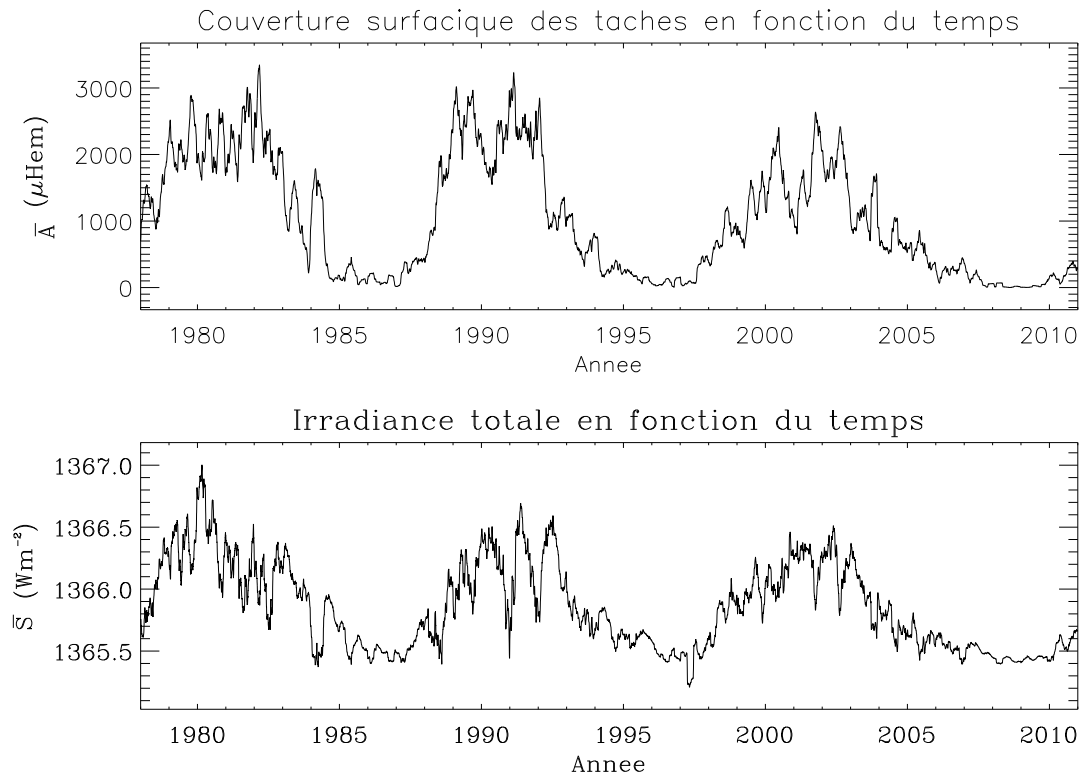


Figure 1.5 – Séquences temporelles de l'irradiance totale du composite PMOD d_41_61_1102 et de la couverture surfacique des taches lissées sur 81 jours compilées par David Hathaway.

C'est d'ailleurs à l'aide de ce principe que le modèle de Crouch et al. (2008) reproduit les séquences temporelles d'irradiance solaire totale. La figure 1.6 montre le contraste associé aux taches, aux facules et leur somme en fonction du temps pour les données du modèle en question. La plupart des méthodes de reconstruction de l'irradiance sont basées sur le calcul de ces quantités ; elles sont d'ailleurs détaillées dans la section suivante.

¹<http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>

²ftp://ftp.pmodwrc.ch/pub/data/irradiance/composite/DataPlots/composite_d41_62_1102.dat

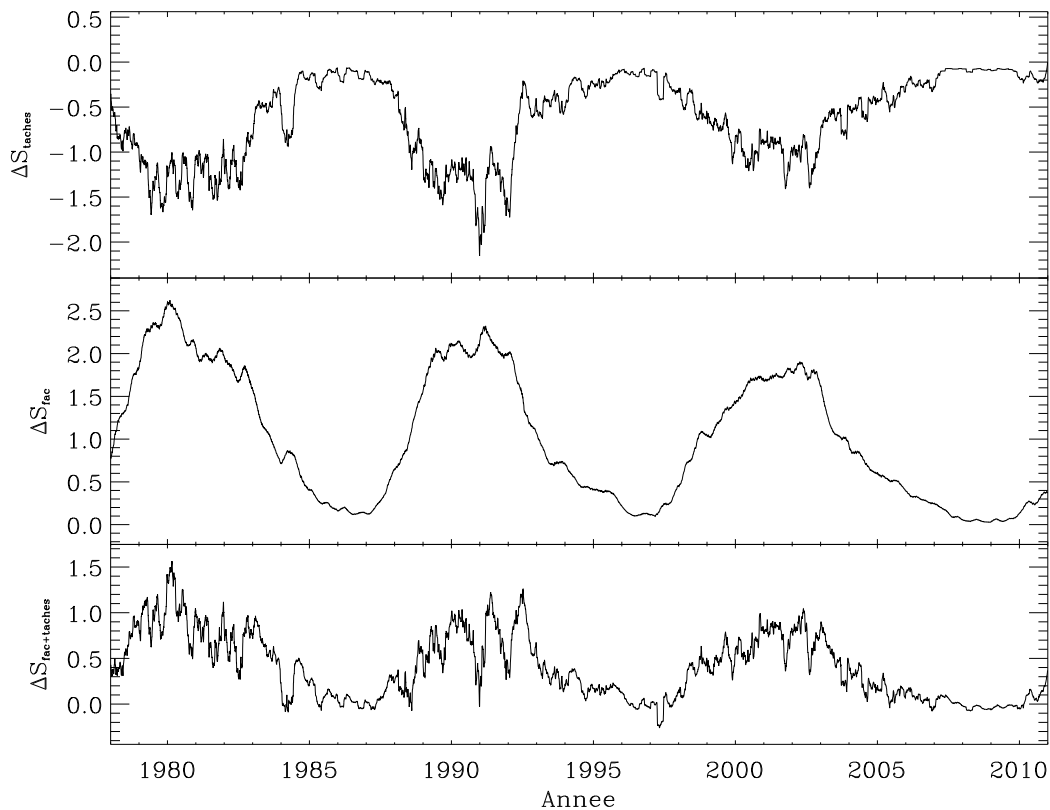


Figure 1.6 – Contribution à l’irradiance totale des taches, des facules et de leur somme en fonction du temps, selon le modèle de Crouch et al. (2008)

1.2.1 Modélisation de l’irradiance totale

Les modèles de l’irradiance totale, de même que de l’irradiance spectrale, sont généralement obtenues grâce à des observations détaillées de la surface du Soleil permettant de déterminer avec précision la position, l’aire et les caractéristiques des structures magnétiques comme les taches et les facules.

Différentes techniques sont utilisées pour quantifier la contribution de chaque type de structure à l’irradiance solaire. Par exemple, le déficit d’irradiance totale associé aux taches peut être exprimé par l’indice photométrique des taches tel que définit par Hudson et al. (1982). Cet indice est bâti en faisant plusieurs hypothèses, comme celle que les zones d’ombre ont toutes la même température, et qu’il en va de même pour les zones de pénombre. Le rapport des aires de ces zones est également estimé constant. L’assombrissement centre-bord est, quant à lui, évalué avec l’approximation d’Eddington pour

une atmosphère grise. Enfin, on considère que le nombre de taches observées n'est pas influencé par l'assombrissement centre-bord. Ces approximations permettent d'obtenir une formule simple qui permet de calculer le déficit d'irradiance pour une tache d'une aire donnée :

$$\frac{\Delta S_S}{S_Q} = \mu \frac{3\mu + 2}{2} A_S \alpha \quad (1.1)$$

où S_S représente l'irradiance totale d'une tache, S_Q est l'irradiance associée au Soleil inactif, μ est la position angulaire sur le disque, A_S est l'aire de la tache en millièmes d'hémisphère solaire, et α_S est le contraste d'intensité lumineuse de la tache par rapport à la photosphère non magnétique. Cette dernière constante a plus tard été explicitée comme une fonction de l'aire de la tache selon l'équation 1.2 (Brandt et al. (1994), Fröhlich et al. (1994)).

$$\alpha_S = -[0.2231 + 0.0244 \log(A_S \times 10^6)] \quad (1.2)$$

Un indice similaire est construit pour calculer l'apport des facules à l'irradiance totale (Chapman and Meyer (1986)). Encore une fois, l'approximation du contraste centre-bord est donnée par l'approximation d'Eddington et la dépendance sur la position angulaire de leur brillance est exprimée sous la forme de $(\mu^{-1} - 1)$, ce qui permet d'écrire l'indice photométrique des facules comme suit :

$$\frac{\Delta S_{fac}}{S_Q} = \frac{1}{2} \mu A_{fac} (3\mu + 2) (\mu^{-1} - 1) \alpha_{fac} \quad (1.3)$$

L'indice photométrique des taches et des facules permettent de calculer l'assombrissement associée aux premières et le surplus de luminosité associé aux secondes, connaissant leur aire et leur position à un moment donné. Il suffit de sommer leurs contributions à celle de la photosphère inactive pour reproduire assez fidèlement les mesures de l'irradiance solaire (Foukal and Lean (1988)).

Il est aussi possible d'utiliser des modèles d'atmosphères pour calculer l'assombrissement des taches et la brillance des facules. Par exemple, le modèle SATIRE (Solanki

et al. (2005)) utilisant le spectre ATLAS9 (Kurucz (1991)) est utilisé pour modéliser la contribution des structures magnétiques mentionnées et reconstruire l'irradiance totale (Wenzler et al. (2006)).

Enfin, certaines reconstructions se basent sur des corrélations entre différents indices de variabilité et l'irradiance totale. Ceux-ci incluent, entre autres, l'indice F10.7, basé sur le flux de la raie à 10.7 cm dans le radio ; l'indice basé sur le rapport du flux au centre de la raie et du flux des ailes de la raie de MgII à 280 nm ; ainsi que l'indice CaIIK, qui mesure le flux de la raie K du CaII à 393.4 nm. Ces indices globaux diffèrent de ceux mentionnés précédemment par le fait qu'ils représentent un état moyen sur toute la surface plutôt qu'une distribution discrète de structures (de Toma and White (2006)). Toutefois, ces indices ont l'avantage d'inclure toutes les structures à la surface du Soleil, de telle sorte que les pertes associées aux limites inférieures de détection des méthodes précédentes ne constituent pas une source d'erreur.

Le réseau semble aussi participer, quoique de façon moins importante, aux variations de l'irradiance totale. Ainsi, Foukal et al. (1991) établissent explicitement l'expression de la contribution du réseau à l'irradiance totale, soit :

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{f}{2} \int [C(\mu) - 1][3\mu + 2]\mu d\mu \quad (1.4)$$

où $C(\mu)$ est le rapport entre l'intensité d'un élément du réseau et l'intensité de la photosphère à une position angulaire sur le disque μ donnée, et peuvent comparer leurs résultats aux observations de ACRIM.

Les variations à plus long terme sont, quant à elles, indépendantes du cycle magnétique. On croit qu'elles sont plutôt causées par des changements de température globaux (Fröhlich (2009)). En effet, Tapping et al. (2007) expliquent qu'un réservoir de flux magnétique à la base de la photosphère aurait une influence sur l'équilibre de la pression à cette hauteur, modifiant ainsi légèrement la structure du Soleil, et par conséquent, la température de la photosphère.

1.2.2 Modélisation de l'irradiance spectrale

Les reconstructions de l'irradiance spectrale sont basées sur les mêmes principes, c'est-à-dire la compilation des structures magnétiques contribuant à l'irradiance et au calcul de leur contraste. Dans les cas des taches et des facules, cette quantité dépend fortement de la longueur d'onde considérée. En effet, les taches affichent un obscurcissement maximal dans l'infrarouge tandis que leur effet dans l'ultraviolet est pratiquement négligeable. En comparaison, les facules sont beaucoup plus brillantes dans cette région du spectre (Fröhlich and Lean (2004)).

Une méthode semblable à l'une de celles utilisées pour reconstruire les séquences temporelles d'irradiance totale est utilisée pour l'irradiance spectrale, soit la méthode basée sur l'analyse de magnétogrammes et l'utilisation de modèles d'atmosphère pour déterminer le contraste des taches, des facules et du réseau. Par exemple, Krinova et al. (2009) utilisent une extension du modèle SATIRE mentionné précédemment pour calculer l'irradiance entre 220 et 240 nm, mais le modèle perd sa fiabilité aux longueurs d'ondes plus courtes à cause des effets hors-ETL. Les auteurs établissent donc des relations empiriques entre l'émission dans un certain intervalle de longueurs d'onde, dans lequel leur modèle reproduit bien les observations, et l'irradiance observée dans un autre intervalle. Cette relation permet d'évaluer l'irradiance spectrale à des longueurs d'ondes pour lesquelles il est difficile d'utiliser les modèles d'atmosphère, en plus de faciliter les extrapolations. Certains auteurs, tels que Fontenla et al. (1999) et Haberreiter et al. (2005), utilisent plutôt des modèles d'atmosphère qui incluent les effets hors-ETL pour calculer la contribution des structures magnétiques. Par contre, ces modèles dits «unidimensionnels» utilisent l'approximation de l'atmosphère plan-parallèle, qui ne considère le transfert radiatif que dans la direction verticale. Or, les facules sont loin de répondre aux critères permettant de justifier l'utilisation d'une telle approximation. En effet, cette dernière exige que la dimension verticale de l'atmosphère soit négligeable par rapport à sa dimension horizontale, de sorte à pouvoir ignorer la sphéricité de l'étoile. Les facules ont plutôt la forme de tubes, ce qui rend l'approximation de l'atmosphère plan un peu douteuse et qui pose un certain doute sur la fiabilité des résultats qui en découlent.

Enfin, l'utilisation des indices globaux pour évaluer l'irradiance totale est aussi appropriée pour estimer les variations de l'irradiance spectrale, particulièrement grâce au rapport du flux du centre et des ailes de la raie de MgII à 280 nm et au flux de la raie CaIIK. Cette méthode est exploitée, entre autres, par Lean et al. (1998), qui se basent sur des images du Soleil à haute résolution en CaIIK. Comme il a été brièvement mentionné précédemment, les intensités des pixels de ces images sont comparées afin de déterminer lesquels font partie de la photosphère non magnétique et lesquels sont des taches ou des facules. Le contraste des facules revêt une importance particulière pour la modélisation de l'irradiance dans l'ultraviolet étant donné leur contribution dominante. Les auteurs parviennent donc à calculer ce contraste à la longueur d'onde précise de la raie de CaIIK, mais doivent déterminer empiriquement la relation entre le contraste à cette longueur d'onde et celui aux autres longueurs d'ondes d'intérêt. Ils utilisent une formule de conversion empirique dépendant linéairement de l'intensité en CaIIK, en plus d'y inclure une dépendance polynomiale sur la position angulaire sur le disque. Les paramètres de cette formule sont déterminés par corrélations statistiques entre la contribution des facules au flux CaIIK et les variations leur étant associée à une autre longueur d'onde, ou même pour l'irradiance solaire totale. Ces modèles reproduisent fidèlement les variations d'irradiance, autant sur de courts intervalles de temps que sur l'ordre d'un cycle ; ils sont donc couramment utilisés pour la modélisation de l'influence solaire sur le climat. En revanche, les corrélations obtenues empiriquement risquent d'être invalides si le modèle est appliqué en dehors de son intervalle de calibration, ce qui rend son utilisation pour des reconstructions historiques moins fiable.

1.3 Influences sur le climat terrestre

L'observation et la modélisation des variations de l'irradiance solaire totale et spectrale sont motivées, entre autres, par l'hypothèse qu'elles puissent influencer le climat terrestre. En effet, la température moyenne de la Terre est déterminée par l'équilibre entre la radiation reçue du Soleil et celle ré-émise par sa surface (Pilewski et al. (2005)). Il est donc logique d'explorer la possibilité que les variations de l'irradiance totale puissent

perturber cet équilibre. Or, les variations de 0,1% en l'espace d'un demi cycle magnétique sont trop faibles pour modifier de façon perceptible notre atmosphère, et particulièrement pour expliquer les changements climatiques actuels (Wigley and Raper (1990), Forster et al. (2007)).

Par contre, les variations spectrales sont quant à elles beaucoup plus susceptibles d'avoir un impact important sur la dynamique de l'atmosphère, sur sa composition chimique et sa température, ainsi que sur les océans. Par exemple, la radiation ultraviolette solaire est majoritairement absorbée par la haute atmosphère terrestre, modulant ainsi l'épaisseur et la dynamique de la couche d'ozone en photo-dissociant la molécule de dioxygène. Les variations de l'irradiance occasionnent donc des changements dans la couche d'ozone stratosphérique, qui peuvent se répercuter à d'autres couches de l'atmosphères par couplage dynamique ou chimique. De plus, puisque la couche d'ozone module l'énergie solaire qui parvient jusqu'à la surface de la Terre, ainsi que celle qui s'en échappe, le bilan énergétique terrestre peut être influencé indirectement par les fluctuations de l'irradiance dans l'ultraviolet. Enfin, ce phénomène peut également avoir des conséquences sur la dynamique de l'atmosphère et ses courants de circulations, ainsi que sur les gradients de températures en altitude et en longitude (Lean et al. (2005)). Cependant, malgré leur variation relative de l'ordre de 10 à 100%, les changements d'irradiance spectrale doivent être amplifiés par un ou plusieurs processus dans l'atmosphère pour avoir un effet notable sur celle-ci, comme il a été démontré par Haigh (2001). Par exemple, Meehl et al. (2009) montrent que deux processus résultant d'une augmentation du flux UV, soit une modification du gradient de température de la stratosphère et une modification des courants de circulation, ne parviennent pas à expliquer les anomalies en températures de surface et en précipitations observées lors des maxima d'activité, lorsque considérés séparément. Par contre, lorsque les deux phénomènes sont inclus dans l'atmosphère modélisée, ils interagissent de sorte à s'amplifier mutuellement pour reproduire les données climatiques de façon assez correcte.

Il est aussi avancé que l'activité solaire puisse influencer le climat sur des périodes de temps beaucoup plus longues que le cycle de 11 ans. Par exemple, Bond et al. (2001) ont établi une corrélation entre des indices d'activité solaire et des indices de dérive des

glaces polaires, qui montrent l'expansion vers le Sud des eaux froides transportant de la glace. Les auteurs ont étudié la corrélation entre les deux indices pour les derniers 10 000 ans et ont trouvé une expansion des eaux froides vers le Sud se reproduisant à chaque 1500 ans et étant associée à des minima d'activité solaire prononcés (Haigh (2001)). Il est particulièrement intéressant d'appliquer cette découverte pour tenter de comprendre le relativement récent minimum de Maunder, entre le milieu du 17^e et le début du 18^e, siècle, durant lequel presque aucune tache solaire n'a été observée (Eddy (1976)). Ce minimum d'activité coïncide avec une diminution de température hivernale marquée en Europe ainsi qu'avec la période la plus froide des 1000 dernières années en Amérique du Nord. Toutefois, il est encore impossible d'affirmer que cette corrélation ait une signification physique (Lang (2006)), d'où l'importance primordiale de détenir des reconstructions représentant l'activité solaire jusqu'à cette époque.

Enfin, une autre hypothèse présume que l'activité solaire influencerait le climat terrestre en modulant la quantité de rayons cosmiques parvenant à pénétrer l'atmosphère. En effet, le vent solaire et le champ magnétique solaire influencent directement le flux de particules chargées qui atteignent l'atmosphère terrestre grâce à leur variation cyclique (Scherer et al. (2006)). L'effet des rayons cosmiques sur l'atmosphère est toutefois incertain ; par contre, il a été suggéré qu'ils stimuleraient la formation de nuages. Cela entraînerait une augmentation de l'albédo, donc un apport énergétique plus faible à la surface de la Terre. Par conséquent, au cours des minima d'activité solaire, plus de rayons cosmiques atteindraient la Terre, entraînant indirectement une réduction de la température globale.

En conclusion, il est nécessaire d'étudier plus en détails l'effet des phénomènes solaires sur le climat terrestre afin de comprendre la relation entre les époques d'activité réduite et les particularités climatiques observées. Puisque les données d'irradiance totale et solaires ne remontent qu'à un passé très récent et ne couvrent que quelques cycles, il serait avantageux de détenir des modèles fiables permettant de reconstruire les données dans un passé lointain.

1.4 Modélisation de l'irradiance spectrale dans l'ultraviolet : présentation de l'article et de l'annexe

L'article suivant présente le modèle conçu pour reconstruire l'irradiance solaire spectrale dans l'ultraviolet rapproché (400-300 nm) et moyen (300-200 nm). Il est une extension d'un modèle pour l'irradiance solaire totale qui utilise, pour seul paramètre d'entrée, les données sur l'émergence de taches solaires pour une journée, qui sont compilées de façon fiable depuis 1874. Le modèle simule la désintégration de ces taches en facules, ce qui permet de calculer la couverture surfacique journalière de ces deux types de structures et d'ajouter leurs contributions globales à l'irradiance du Soleil inactif. Étant donnée la nature stochastique du modèle, ce dernier ne parvient pas à reproduire parfaitement les variations d'irradiance journalières, contrairement à la plupart des autres modèles d'irradiance basés sur des observations ultra-précises du disque solaire.

Par contre, il détient le net avantage de pouvoir être extrapolé dans le passé, aussi loin que des observations de taches sont disponibles. De plus, les paramètres physiques desquels dépend le processus de fragmentation des taches sont déterminés en comparant les résultats du modèle avec les observations disponibles. Comme ces paramètres risquent d'avoir peu changé au cours du temps, il est justifié d'extrapoler le modèle en dehors de son intervalle de calibration, contrairement aux modèles basés sur des corrélations statistiques empiriques.

Le modèle d'irradiance spectrale a pour seule différence la méthode de calcul du contraste des taches, des facules et du Soleil inactif, qui est une fonction de la longueur d'onde. Ces méthodes sont présentées en détail dans l'article du chapitre 2. Puisque les paramètres régissant la désintégration des taches sont les mêmes que ceux trouvés en optimisant le modèle d'irradiance totale de Crouch et al. (2008), il est également justifié d'extrapoler le modèle d'irradiance spectrale dans le passé. Cela permet d'obtenir des reconstructions sur de nombreux cycles, qui pourront être utilisées afin d'étudier l'impact des variations de l'irradiance sur le climat terrestre.

L'annexe I, quant à elle, présente la procédure utilisée pour déterminer les différents paramètres optimaux du modèle ainsi que certaines corrections apportées aux approxi-

mations incluses dans les calculs. Cette technique diffère des procédures d'optimisation habituellement utilisées, telle que la méthode des moindres carrés basées sur le calcul du gradient, par le fait qu'elle tolère de fortes variations stochastiques des fonctions à maximiser. De plus, il n'est pas nécessaire d'estimer la valeur des paramètres avec précision, et l'algorithme est particulièrement bien adapté pour éviter de converger sur les maximums locaux de l'espace des paramètres. Enfin, il permet de d'optimiser des paramètres dont l'interaction est fortement non-linéaire et multimodale.

Le modèle d'irradiance totale a été conçu par Ashley Crouch et Paul Charbonneau ; les versions préliminaires des fonctions permettant de calculer le flux des facules ont été écrites par Bénédicte Plante et Xavier Fabian au cours de leur cours PHY-3030. Pour ma part, j'ai amélioré et optimisé ces fonctions, en plus d'y ajouter le calcul du contraste des taches à l'aide d'une interpolation sur un spectre synthétique de Kurucz (1991). J'ai aussi calculé les corrections sur le niveau d'irradiance du Soleil inactif, sur le profil de température faculaire et fait des calculs d'essais pour divers types de corrections sur le contraste centre-bord des facules. J'ai également composé la version préliminaire de l'article présenté au chapitre 2.

CHAPITRE 2

A FAST MODEL FOR THE RECONSTRUCTION OF SPECTRAL SOLAR IRRADIANCE IN THE NEAR- AND MID-ULTRAVIOLET

C. Bolduc¹, P. Charbonneau¹, M. Bourqui², A. Crouch³

To be submitted to *Solar Physics*

April 2011

¹Département de Physique, Université de Montréal, C.P. 6128, Succ. Centre-Ville, Montréal, Québec, H3C 3J7, Canada

²Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, McGill University, 805 Sherbrooke West, Montreal, Quebec, H3A 2K6, Canada

³NorthWest Research Associates, Colorado Research Associates Division, 3380 Mitchell Lane, Boulder CO 80301-5410 USA

ABSTRACT

We present a model for the reconstruction of spectral solar irradiance between 200 and 400 nm. This model is an extension of the total solar irradiance (TSI) model of Crouch, et al. 2008, *ApJ*, 677 :723, itself based on a data-driven Monte Carlo simulation of sunspot emergence, fragmentation and erosion. The resulting time-evolving daily area distribution of magnetic structures of all sizes is used as input to a three-component irradiance model including contributions from the quiet sun, spots, and faculae. In extending the model to spectral irradiance in the near- and mid-ultraviolet, the quiet sun and sunspot emissivities are calculated from synthetic spectra at $T_{eff} = 5750\text{K}$ and 5250K respectively. Facular emissivities are calculated using the simple synthesis procedure proposed by Solanki & Unruh 1998, *A&A*, 329 :747. The resulting ultraviolet flux time series are compared to data from the SOLSTICE instrument on the Upper Atmospheric Research Satellite (UARS). Using a genetic algorithm, we compute quiet-sun corrections and the profile of facular temperature variations with height that yields the best fit to these data. The resulting best-fit timeseries reproduce quite well the solar-cycle timescale variations of UARS ultraviolet observations, but the amplitudes of variations on daily-timescales remain smaller than observed by factors ranging from 3 to 10, depending on wavelength. Finally, we use the model to reconstruct spectral irradiance time series starting in 1874, investigates temporal correlations between pairs of wavelengths in bands of interest for stratospheric chemistry and dynamics, and examine whether these correlations depend on the amplitude of the activity cycle.

2.1 Introduction

The successful detection of the sun's ultraviolet radiation shortward of 300nm marks the first astronomical observation carried out from space, during the 10 October 1946 flight of a reconstructed V2 rocket launched from White Sands Missile Range (Hufbauer (1991)). The necessity to carry out such observations above Earth's atmosphere had been already recognized almost a century before, and continuous measurement of the sun's radiative output have now been carried out from Earth orbiting instruments for

now over three decades. These measurements have shown that the total solar irradiance (TSI), defined as the flux of solar radiative energy integrated over the full electromagnetic spectrum incident on the Earth's upper atmosphere at one astronomical unit, varies by about 0.1% between the minimum and maximum phases of the solar activity cycle (Willson and Hudson (1988), Willson and Hudson (1991)). This is small, but radiative variability turns out to be strongly wavelength dependent. The ultraviolet portion of the spectrum (200—400 nm), even if it only contributes only 1% to the TSI, accounts for more than 14% of its variability (Solanki and Unruh (1998), Lean (1991)).

The variability of the sun's radiative output is the primary channel of solar influence on Earth's atmosphere, and possibly climate change. The TSI variations observed over the past three solar activity cycles are of too low amplitude to have had a significant impact on Earth's energy budget, and therefore cannot, in themselves, explain the recent changes in global climate (Forster et al. (2007)). However, variations in the UV part of the spectrum, even if insignificant from the point of view of the global energy budget, do have an important impact on Earth's upper atmosphere, with the associated atmospheric variability modulating the radiative energy reaching the surface of the Earth (Fröhlich and Lean (2004)). The mid- and near-ultraviolet, in particular, are absorbed primarily by the stratospheric ozone layer, where they modulate ozone production and destruction and govern the energy budget of the stratosphere. It has been suggested that UV variability influences the troposphere via stratospheric dynamics and chemistry (Cubasch and Voss (2000), Rind (2002), Lean and Rind (2002), Muncaster et al. (2011)), with the stratosphere acting as an amplifier of solar variability (Haigh (1994), Haigh (2001), Haigh et al. (2010)).

Continuous observations of spectral irradiance began with the Solar Backscatter Ultraviolet (SBUV) instrument on Nimbus-7 (DeLand and Cebula (2001)) in 1978. This was followed by a number of space-borne instruments with more or less temporal overlap, taking us currently to the Spectral Irradiance Monitor (SIM) on the Solar Radiation and Climate Experiment (SORCE) mission (Rottman et al. (2005), Harder et al. (2010)), and the PREcision MONitor Sensor (PREMOS) instrument on the PICARD mission (Thuillier et al. (2003b)). High quality spectra were also obtained taken during

different phases of solar activity with the SOLar SPEctrum (SOLSPEC) and the SOLar SPEctrum (SOSP) spectrometers aboard the rocket-borne Atmospheric Laboratory for Applications and Science (ATLAS) and the EUROpean RETRIEVAble CARrier (EURECA) missions (Thuillier et al. (2003a)). Figure 1 and 2 of DeLand and Cebula (2008) show timelines of UV solar irradiance measurements and time series.

These data jointly cover almost three cycles of spectral irradiance. However, from the perspective of modeling its effects on Earth's climate, this is quite short, and suffers from the fact the the most recent three activity cycles sample a relatively narrow range of past solar activity behavior, at least judging from observables with long temporal records, such as sunspots. This has led to a number of reconstruction models, calibrated on the recent past and extrapolated further back in time. One class of such reconstructions of solar total and/or spectral irradiance relies on statistical correlations established with various solar activity indices. For example, Chapman et al. (1996) have found a correlation between TSI data and a combination of the photometric sunspot index (PSI) as defined by Hudson et al. (1982), the MgII core-to-wing ratio, and the facular index. TSI is also closely correlated to the F10.7 radio flux data, as demonstrated by Oster (1983). Another class of reconstruction models uses spatially-resolved magnetogram and/or filtergram images to assign a "class" to each pixel (spot, faculae, etc), with model atmosphere-based spectra appropriate to each class convolved to produce a full-disk synthetic spectrum (see, e.g., Fontenla et al. (1999); Haberreiter et al. (2005); Krinova et al. (2009)). Most of these reconstruction model reproduce very well observed irradiance variations on timescales going from hours to years. Their success also suggests that on such timescales at least, variations in total and spectral irradiances can be properly accounted for in terms of the variations in the surface coverage of various types of magnetic structures (spots, pores, faculae, network elements, etc) having radiative emissivities different from the unmagnetized quiet-sun photosphere. However, extensions of such models in the more distant past faces an obvious problem, namely the lack of high resolution magnetograms and/or filtergrams. Reconstructions must once again rely on statistical correlations between the coverage of the various atmospheric structure classes defined in the models, and activity proxies with long temporal records.

The TSI reconstruction models developed by Crouch et al. (2008) attempts to circumvent this difficulty by basing its reconstructions on a simple, albeit physical model for the surface coverage and evolution of various types of magnetic structures, using active region emergences as the only data input. Although this semi-empirical model must again be calibrated on recent TSI observations, the basic physical mechanisms embodied in the model's parameters presumably reflect processes operating today as they did a century or even a millenium ago. Consequently, physically reliable reconstructions are, in principle, possible into the distant past. The Crouch et al. (2008) TSI model is briefly described in §1 below, together with the modifications introduced to extend it to spectral irradiance reconstruction. In §2 this extended model is calibrated using UARS/SOLSTICE observations, and validated against other datasets and reconstructions. We also discuss the modifications we had to make in the model and we present a reconstructed temperature profile resulting from fitting optimal temperatures for faculae. Finally, we discuss and conclude in section 3.

2.2 The reconstruction Model

2.2.1 TSI reconstruction with a model based on active region decay

The procedure we used to reconstruct spectral irradiance is an extension of the reconstruction model for total solar irradiance (TSI) described in detail in Crouch et al. (2008). This TSI model is built on a data-driven Monte Carlo simulation of the emergence and decay of solar active regions. Sunspots are “injected” on a synthetic spherical solar surface on a 1-day temporal cadence, with their solar latitude, longitude, time of emergence, and area as tabulated in the databased assembled by Hathaway (<http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>) on the basis of Royal Greenwich Observatory and USAF+NOAA photographic data. Only sunspots attaining peak area within 60° in longitude of the central meridian and within 50° from the equator are retained. The remainder of the solar surface is modelled statistically, with spots injected at the same rate as on the observed sector, with the time of emergence assigned randomly in the recent past or future, the latitude set equal to the emergence latitude of the most

recently emerged spot, the longitude chosen randomly in the unobserved sector, and the area drawn from a lognormal distribution.

The decay of sunspots is modeled through a stochastic fragmentation cascade and boundary erosion. Both these processes conserve total magnetic flux. Fragments are grouped into two size-based categories. What we consider “large-scale” fragments are magnetic flux concentrations with area greater than $A_f^* = \pi(r_f^*)^2$, where r_f is the cutoff length-scale below which elements are considered “small-scale”. Only large-scale fragments are subjected to fragmentation and boundary erosion, with the magnetic flux removed by the latter injected in the pool of small-scale fragments. The collective area of small-scale elements associated with a given group of large-scale fragments is assumed to decay exponentially in time; this is the process that ultimately removes from the simulation the magnetic flux injected in the form of spots at the upper-scale end of the cascade. Fragments of all sizes are also subjected to bulk displacements in heliographic longitude, due to surface differential rotation, and poleward drift, due to meridional circulation.

This injection/fragmentation/erosion/decay process results in a time-evolving distribution of fragments $N(A_k(\theta, \phi, t))$. Large-scale fragments are all considered “spots” (effectively including pores and other similar dark structures), and small-scale elements are assumed to collectively described faculae (implicitly including the active region network but not the quiet sun network). With this distinction so defined, we then use the distribution $N(A_k)$ as input for a simple three-component model of the total solar irradiance :

$$S(t) = S_Q + \sum_k \Delta S_{s,k} + \sum_j \Delta S_{f,j} \quad (2.1)$$

where S_Q is the quiet sun irradiance, $\Delta S_{s,k} (< 0)$ is the irradiance deficit associated with the k^{th} large-scale fragment, and $\Delta S_{f,j} (> 0)$ is the irradiance excess associated with the j^{th} group of facular small-scale elements. The former is calculated according to standard spot contrast formulae (e.g., Hudson et al. (1982), Fröhlich et al. (1994), Lean et al. (1998)) :

$$\frac{\Delta S_{s,k}}{S_Q} = \frac{1}{2} \mu A_k (3\mu + 2) \alpha_S \quad (2.2)$$

where $\mu = \cos \theta \cos \phi$ measures the center-to-limb angle, $A_{s,k}$ is the area of the spot in units of a millionth solar hemisphere, and α_s is the area-dependent sunspot intensity contrast. This latter quantity is well constrained by observations, and we use the empirical formula in Brandt et al. (1994) :

$$\alpha_s = -[0.2231 + 0.0244 \log(A_s \times 10^6)] \quad (2.3)$$

For the small-scale “facular” elements, we use the semi-empirical formula proposed by Chapman (1980) :

$$\frac{\Delta S_{f,j}}{S_Q} = \frac{1}{2} \mu A_{f,k} (3\mu + 2) \left(\frac{1}{\mu} - 1 \right) \alpha_f \quad (2.4)$$

where α_f is the (area-independent) facular contrast parameter.

This combined surface magnetic flux and TSI modelling procedure involves a number of physical parameters that are poorly constrained by observations (e.g., the fragmentation probability, demarcation radius r_f , facular intensity contrast α_j , etc). The final step in the reconstruction is therefore to adjust these parameters by simultaneously minimizing the difference between the reconstructed and observed TSI, and the reconstructed and observed time series of total sunspot area. This multi-objective minimization task is carried out using a genetic algorithm (see, Charbonneau and Knapp (1995) and references therein). Implementation details, as well as the properties and uncertainty estimates for the best-fit parameters, are discussed at length in Crouch et al. (2008), to which we refer the interested reader.

Figure 2.1A and B shows a representative TSI reconstruction (in gray) over the 1978-2006 time interval computed using the best-fit parameter values obtained in Crouch et al. (2008), together with the TSI PMOD composite d41_61_0702 used as TSI target for the minimization procedure (in black). While the two time series differ in some details, as expected given the stochastic nature of the backside emergence modelling procedure, the overall looks of the two time series are remarkably similar. This visual impression can be further quantified by calculating the distribution of TSI residuals about a 81-day running average (Fig 2.1B), as shown on Figure 1C again for a representative best-fit reconstruction in gray and PMOD composite in black. Both distributions show asymme-

tric tails that are quite similar in slope. However, their extent is not exactly the same, the residuals calculated with the model output being more extended than those coming from observations.

2.2.2 Adaptation for Spectral Irradiance in UV

The model for spectral irradiance in UV is based on the fragmentation and erosion model described above. Only the three components of the solar irradiance, being the quiet Sun, the dark spots and the bright faculae, are modified to account for their spectral dependance.

2.2.2.1 Quiet Sun Contribution

The flux from the quiet Sun is interpolated on a synthetic spectrum from Kurucz (1993) models with parameters $T_{eff} = 5750K$ and $\log g = 4.49$ that best represent solar properties. This spectrum being free of any magnetic field, it is expected to underestimate the observed quiet Sun flux at short wavelengths during minimum activity, because small-scale magnetic structures then still contribute significantly to short-wavelength flux. On Figure 2.2 the Kurucz quiet sun spectrum (in black) is compared to the to the ATLAS-3 low activity spectrum (Thuillier et al. (2003a)) in order to select a wavelength interval where the observations and Kurucz spectrum are in generally good agreement. On the basis of this comparison, in what follows we focus on the wavelength interval 200-400 nm.

2.2.2.2 Sunspots Contribution

Following Solanki and Unruh (1998), the sunspot spectrum is approximated with a Kurucz spectrum with $T_{eff} = 5250K$ (plotted in blue on Fig. 2.2). This temperature is based on the effective temperature of the umbra ($T_{eff} = 4500K$) and the penumbra ($T_{eff} = 5400 - 5500K$) and the ratio of umbral to penumbral area of about 1 :3. The spectral spot contrasts are calculated by the ratio of the monochromatic flux at 5250K and the flux at 5750K at a given wavelength. The two spectra are compared on figure

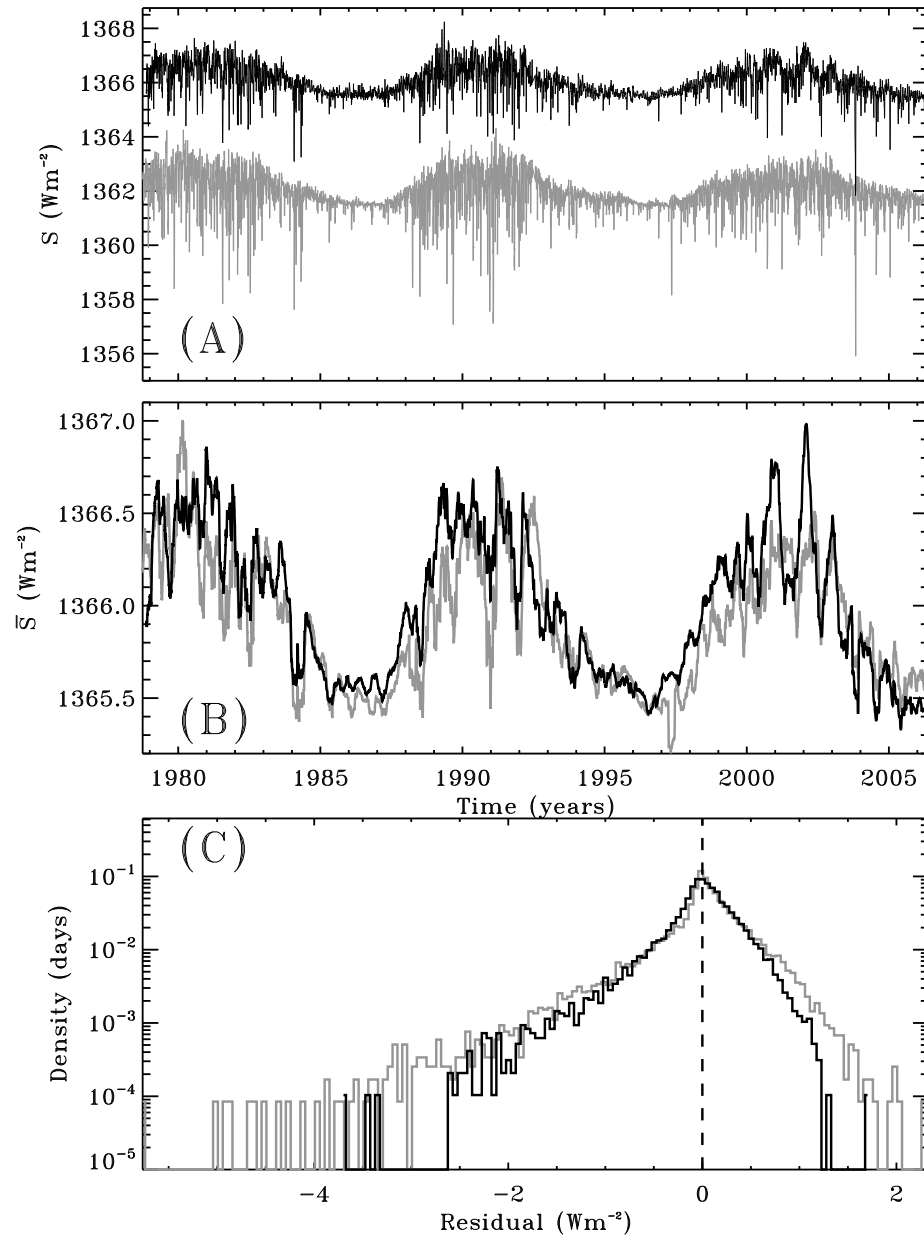


Figure 2.1 – Comparison between a representative best-fit TSI reconstruction from Crouch et al. (2008) (in gray) and the PMOD TSI composite d41_61_0702 over the 1978-2006 time period. Panel (A) shows time series of daily TSI values, with the reconstruction shifted downwards by 4 W m^{-2} for clarity. Panel (B) shows 81-day running averages of the two time series in (A). Panel (C) shows the distributions of the difference between the raw time series in (A) and the 81-day running averages in (B).

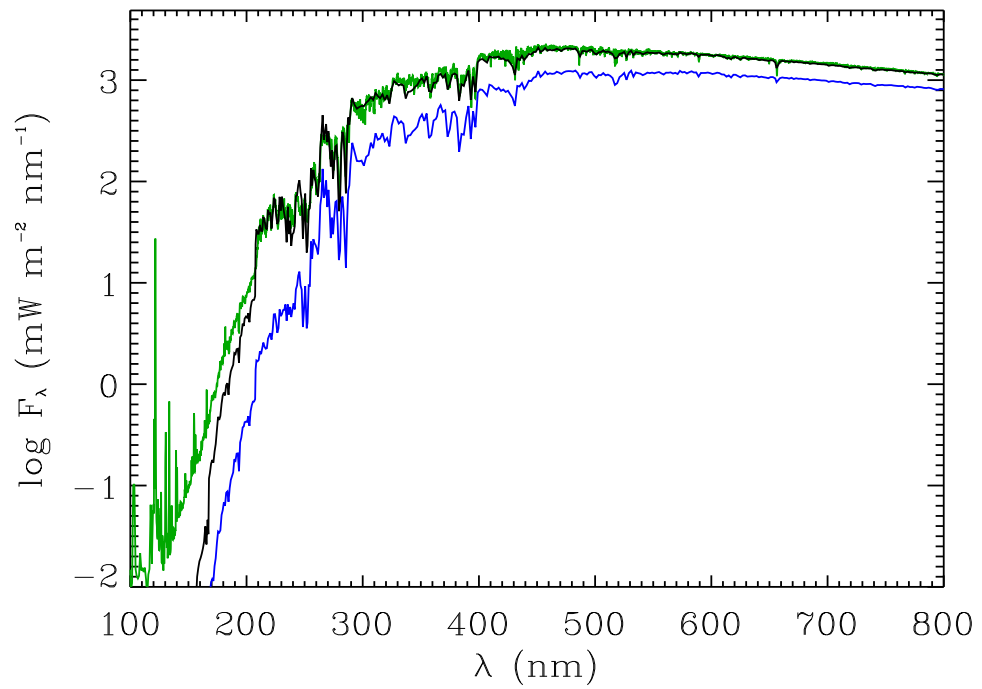


Figure 2.2 – Kurucz non-magnetic synthetic spectrum ($T_{eff} = 5750K, \log g = 4.49$) in black ; ATLAS-1 spectrum (low activity) in green ; Kurucz non-magnetic synthetic spectrum for spots ($T_{eff} = 5250K, \log g = 4.49$) in blue.

2.7, in the 200-400nm range of interest. The flux deficit is by about a factor of 10 at ~ 200 nm, dropping to 5 at 260nm and down to about 2 at 320nm.

2.2.2.3 Faculae Contribution

To calculate the contribution of facular elements to UV spectral irradiance, we use the simple and clever procedure described in Solanki and Unruh (1998). First, using the Kurucz non-magnetic spectrum for the quiet Sun introduced previously, the monochromatic flux F_λ is interpolated at the desired wavelength. The next step is to assume that this flux can be considered as arising from a black body of temperature T :

$$F_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (2.5)$$

This expression is readily inverted to yield the formation temperature associated with the interpolated flux :

$$T = \frac{hc}{\lambda k} \frac{1}{\ln\left(\frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 F_\lambda} + 1\right)} \quad (2.6)$$

This temperature is used to find the photon's formation height using the temperature profile from Fontenla et al. (2009). We use their B model (FAL-B), which corresponds to regions with intensities typical to the quiet Sun inter-network. Figure 2.3 shows the formation height as a function of wavelength for this “quiet Sun” atmosphere, together with its associated formation temperature (green line).

The monochromatic flux for facular elements is computed by assuming that at a given wavelength, the flux is produced at the same height as in the quiet sun atmosphere ; however, for these elements we now use a facular temperature profile, specifically model P of FAL 2009. This profile is associated with a higher temperature, at a given formation height, than the FAL-B quiet sun profile (compare the blue and green lines on Fig. 2.3). This higher temperature is then inserted in the black-body formula (2.5), which immediately yields the monochromatic flux of facular elements at this wavelength. Solanki & Unruh (1998) showed that with a slight modification to the FAL-P temperature profile,

this simple approach reproduces quite well the level of UV spectral variability between epochs of minimum and maximum solar activity, for wavelenghts longer than ~ 200 nm.

The Chapman (1986) facular contrast formula used by Crouch et al. (2008) for TSI reconstruction (eq. (2.4)) was established semi-empirically with the express purpose of reproducing observed TSI variations. As such, it cannot be blindly applied to UV flux reconstruction. Note in particular that the $(1/\mu - 1)$ factor appearing in eq. (2.4) would yield a zero UV facular contrast at limb-center. For the purposes of the foregoing reconstruction we opted to a facular contrast independent of limb angle, retaining only the geometrical projection factor on the emitting area of facular elements :

$$\frac{\Delta F_{f,j}}{F_Q} = \mu A_{f,k} \alpha_f(\lambda) , \quad (2.7)$$

with $\alpha_f(\lambda)$ the wavelength-dependent facular contrast produced by the Solanki & Unruh (1998) method described above.

2.3 Results

2.3.1 Spectral irradiance data : UARS/SOLSTICE

The UV flux time series produced by our solar spectral irradiance (SSI) reconstruction models are calibrated and validated through comparison with spectrally-resolved UV observations from the Upper Atmospheric Research Satellite (UARS). The mission was launched in 1991 and its instrument SOLSTICE measured solar spectral irradiance until 2001 in order to collect precise and accurate measurements of the solar ultra-violet spectral irradiance over the range 119 to 420 nm and to measure solar variability. The detector calibration and the instrument degradation follow-up were made with A and B stars observations. A full solar spectrum was taken everyday with a resolution of 1.0 nm and an uncertainty of 2% on the absolute flux levels (Rottman et al. (1993), Rottman et al. (2001)).

DeLand et al. (2004) discuss the spectral dependance of the detector degradation. They also mention the fact that the uncertainty on irradiance measurements between 250

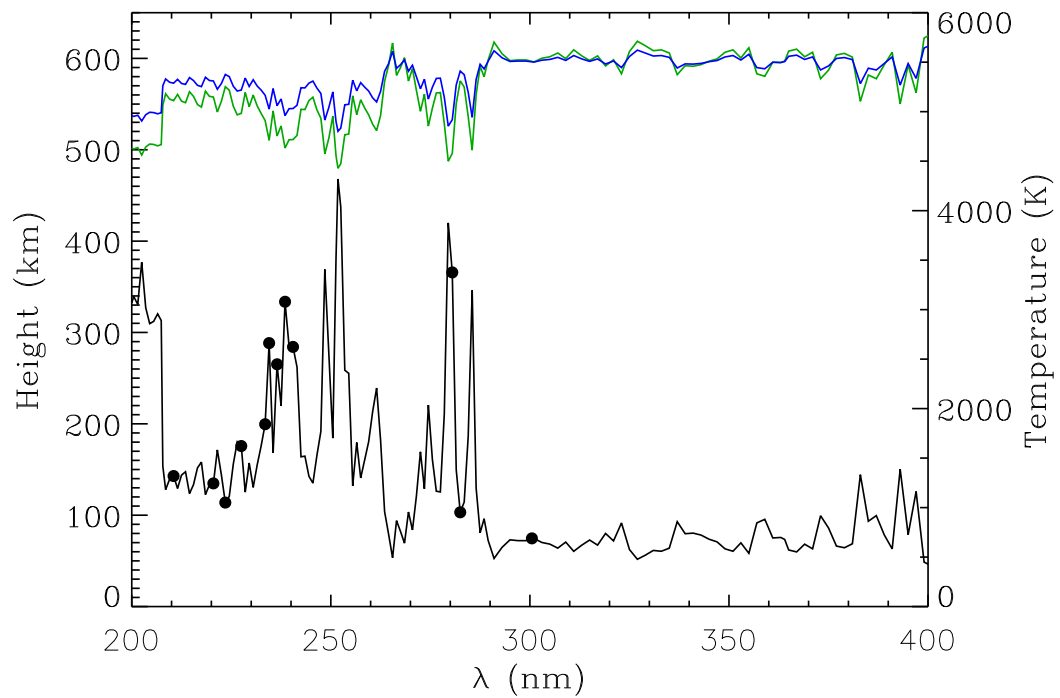


Figure 2.3 – Formation height in function of wavelength for the “quiet sun” FAL-B model (in black). The solid dots indicate the formation height of the twelve wavelengths used below to invert the facular temperature profile. The left scale measures the temperature associated with each wavelength’s formation height, for the FAL-B model (in green) and “facular” FAL-P model (in blue).

and 300 nm is comparable to the solar variability and that the cyclic variations cannot be seen above 300 nm. Consequently, we will restrict ourselves to the 200–300 nm range in *fitting* the model to UARS data, but once adjusted, the model will be used to carry out reconstructions up to 400 nm, keeping in mind that at these longer wavelengths the comparison with UARS data is not as meaningful as one would wish.

We opted to use the UARS data as made publicly available through the UARS data archival database (http://lasp.colorado.edu/uars_data/uarsplot.html). We carried out a baseline correction for possible instrumental drifts by fitting and removing linear trend in the data at each wavelength used. This correction turned insignificant at some wavelengths (e.g. 16744 Wm⁻³/year at 227 nm, -24853 Wm⁻³/year at 210 nm), but less so at others (e. g. -172011 Wm⁻³/year at 240 nm, -328889 Wm⁻³/year at 250 nm)

2.3.2 Modifications to the model

With the parameters controlling the evolution of surface magnetic elements held fixed at the best-fit value found by Crouch et al. (2008) through fit of the TSI, the spectral reconstruction model described above is parameter-free. Its direct application to reconstruction in the 200–400 nm interval soon reveals significant deviations from the UARS spectral time series. The source of these discrepancies is twofold.

First, the Kurucz spectrum does not exactly match the UARS spectrum taken during the minimum activity. This was to be expected, since the former is truly unmagnetized while the latter is not. Consequently we need to introduce a baseline correction on the quiet Sun UV flux. Second, the variations of monochromatic fluxes between minimum and maximum activity are underestimated by the model ; a similar behavior was observed by Solanki and Unruh (1998) working with data from the ACRIM and ERB experiments (Willson and Hudson (1991), Kyle et al. (1994)). These authors found it necessary to artificially increase the temperature of the FAL-P-1993 (Fontenla et al. (1993)) facular model they were using over the first two hundred kilometers in formation height. We follow their lead in introducing, at each formation height, a temperature correction to the FAL-P temperature profile.

We are thus facing the following optimization task : invert the “corrected” facular

temperature and quiet sun flux corrections that provide the optimal representation of UARS data. More specifically, we seek to find the corrections to the temperature profile and quiet sun flux that minimize the summed day-to-day squared residuals between the reconstructed and the observed UARS time series. We do so for twelve wavelengths in the range 200–300 nm, spanning in formation height from 70 to 360 km, as indicated by solid dots on Figure 2.3. The optimization task is carried out independently for each wavelength, using scheme described in Crouch et al. (2008), itself based on the genetic algorithm-based optimizer PIKAIA (Charbonneau and Knapp (1995), Charbonneau (2002)).

In a nutshell, genetic algorithm-based optimization consists in evolving a population of initially random trial solution over a number of generations, with only the better-fitting solutions contributing to the subsequent generation, through “recombinations” and “mutation” of parent solutions into offspring solutions. Recombination and mutation occur through genetically-inspired operators acting on a string-encoding of the numerical parameters defining each parent solution. PIKAIA is designed to maximize a fitness measure, which we define following Crouch et al. (2008) :

$$f_{\lambda} = \frac{\nu}{\chi_{fac,\lambda}^2} \quad (2.8)$$

where $\nu = N - n$ is the number of degrees of freedom, with N being the number of days over which the comparison is made and n the number of parameters. The normalized sum of the irradiance squared residuals is defined as

$$\chi_{fac,\lambda}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{S}^{\lambda} - \bar{S}_{obs}^{\lambda})^2}{\nu [\max(\bar{S}_{obs}^{\lambda}) - \min(\bar{S}_{obs}^{\lambda})]^2} \quad (2.9)$$

where \bar{S}_{obs} and \bar{S} are the boxcar averaged observed and modeled spectral irradiance. Some level of temporal averaging is required to reduce the impact of the stochastic back-side emergence algorithm on the fitness measure (for further discussion of this point see §2.1 in Crouch et al. (2008)). We experimented with different widths for boxcar filtering, and ended up retaining the value of 81 days used in Crouch et al. (2008), since tested

alternate values in the range 45–81 days did not yield significantly better fits, or faster convergence.

The fitting procedure is carried out by evolving of a population of 50 trial solutions over 300 generations. As in Crouch et al. (2008), we use the default settings of `PIKAIA 1.2` (Charbonneau (2002)), except for the dynamic control of the internal mutation rates for which the distance-based measure is used (`ctrl(5)=3` in the input control vector). The fitting procedure is repeated 3 times at each wavelength using a distinct random initialization of the genetic algorithm, in order to assess the robustness of the best-fit parameters. While each individual run traces a different path through parameter space in converging to the optimal solution, here both parameters are found to converge within 100–200 generations typically, as shown on figure 2.5 for $\lambda = 210.5$ nm. The best-fit solution is characterized by a rms residual of $1.716768 \times 10^{-2} \text{ Wm}^{-3}$.

With a given correction on the quiet Sun flux and a given facular temperature profile, reconstructions using different seeds for backside emergence random number generators will give different results because of the stochastic effect introduced by backside emergences and, less importantly, the sunspots fragmentation procedure. To quantify how these processes influence the spectral irradiance daily value, we produce ten different time series at 210.5 nm, using the best-fit parameters, but with different seeds for the backside emergence random number generator. Then, for every day, we plot the average of the calculated fluxes on figure 2.4, and we calculate the rms deviation with respect to the daily average flux.

As shown on figure 2.4, the error is of the same order as the daily fluctuation, which confirms that the backside emergence are the main source of error in the model.

Figure 2.6 shows four representative best-fit spectral irradiance time series, for $\lambda = 210.5, 220.5, 240.5$ and 300.5 nm. The model manages to reproduce the smoothed and detrended observed spectral irradiance tolerably well for the three shorter wavelengths, but is clearly much less successful at 300.5 nm. As mentioned earlier, the UARS data longward of 300 nm are deemed less reliable, so the poorer fit on Fig. 2.6D,H is not exceedingly alarming. Even there, and despite a strong yearly signal in the UARS data, the fitting procedure manages to extract a reasonable decadal trend. The reconstructions fail to catch

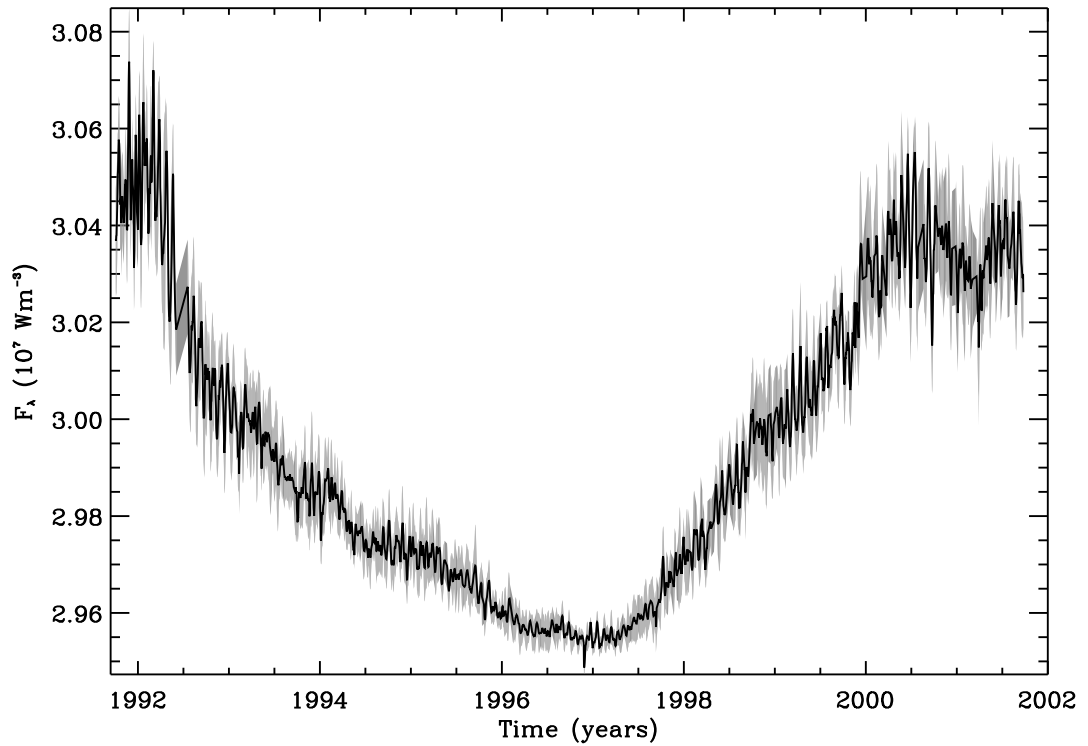


Figure 2.4 – Mean flux over the ten realizations of the model at 210.5 nm with different seeds for the random number generators used for synthetic emergences (in black), using the inverted facular temperature profile and the corrected quiet-Sun flux. The grey shaded region corresponds to the mean plus one standard deviation and the mean minus one standard deviation. This shows that the uncertainty on the daily value is of the same order as the daily fluctuation, which confirms that the backside emergences are the main source of error in the model.

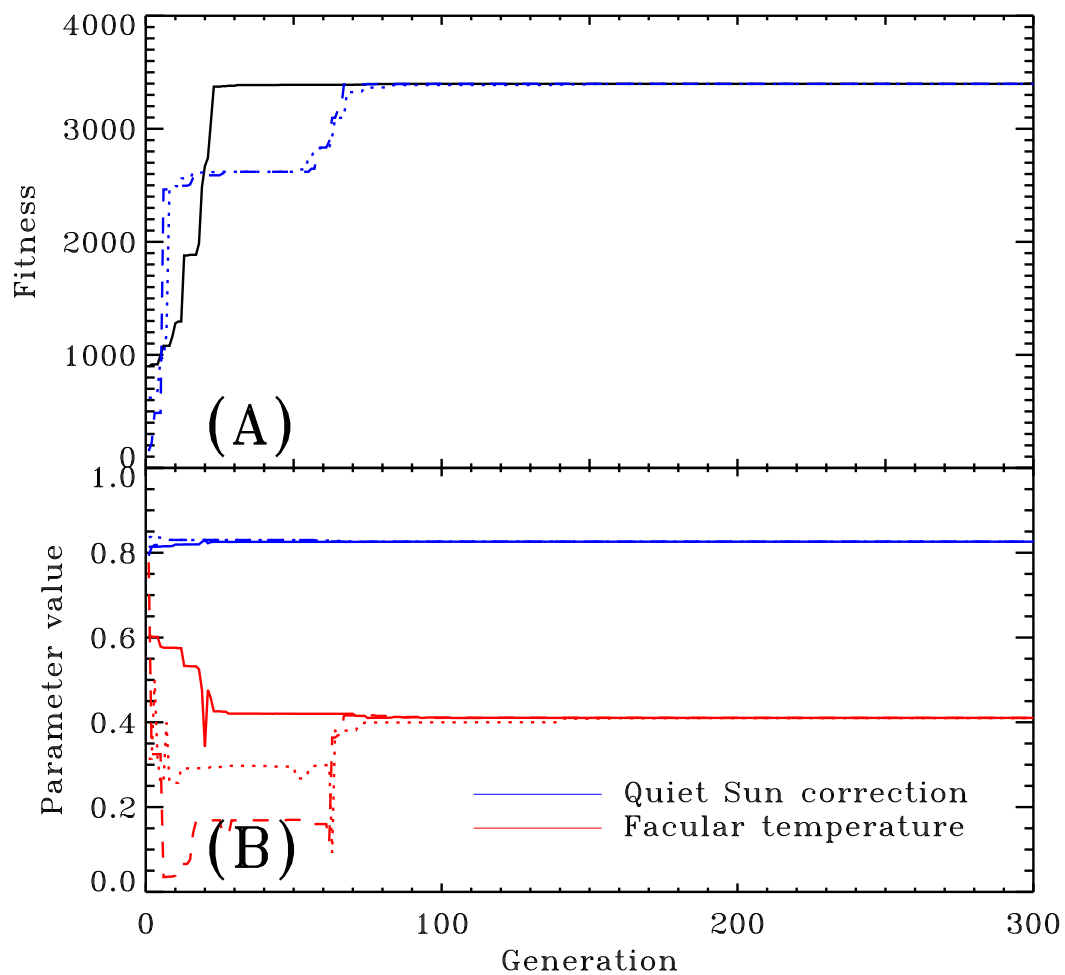


Figure 2.5 – Best-fitting model fitness and parameter values in function of generation for the 210.5 nm model. The fitness is calculated with equations 2.8 and 2.9. Internally, PIKAIA uses parameter values normalized between $[0.0,1.0]$, as plotted here; this is rescaled into physical units before the fitness calculation.

the elevated UV flux throughout 1993 present at most wavelengths, and begin the rise into cycle 23 a year too soon at the shorter wavelength. Interestingly, this is the opposite behavior to that observed by Crouch et al. (2008) in their TSI reconstruction, indicating that the discrepancy is not related to the surface magnetic flux evolution model, but rather to the “radiative” component of the TSI and UV reconstructions.

Another noteworthy discrepancy in between observed and reconstructed time series on Figure 2.6 (left column), present at all wavelengths, is the much smaller daily fluctuations of reconstructed UV spectral irradiance as compared to observations. This can be traced to a number of factors, starting with the fact that our reconstruction model includes no impulsive UV brightening associated with flares or other energy release mechanism driven by magnetic reconnection and operating intermittently at small spatial scales. However, even with the corresponding smoothed time series (Fig. 2.6, right column), the observed variations on monthly to yearly timescales are significantly larger in the UARS time series. In its current form, our UV reconstruction does lack the contribution of the magnetic network away from active regions. More importantly, “facules” in our model are represented by a “cloud” of small magnetic elements associated with each decaying active regions, evolving smoothly in time through injection from the fragmentation/erosion process, and effectively decaying exponentially in time once injection ceases. In other words, our model lacks the mid-scale, spatially structured aggregates of magnetic elements that are revealed by high resolution magnetographic observations of solar facular structures within and away from active regions.

In assessing the robustness of these reconstructed time series, together with possible sources of the various discrepancies, it is essential to examine the underlying quantities being fitted. This is carried out on Figures 2.7 and 2.8. The corrections on the quiet Sun level are represented on Figure 2.7 as red vertical line segments originating from the 5750 K Kurucz synthetic spectrum used model the quiet Sun flux (black). The UARS minimum activity spectrum (averaged over three days, being 1996/04/20, 1996/04/29, and 1996/06/03) is also plotted in gray, together with the low activity spectrum obtained by the ATLAS-1 sounding rocket (Thuillier et al. (2003a)). As hoped for, the quiet sun corrections do bring the reconstructed UV spectral fluxes to the observed minimum

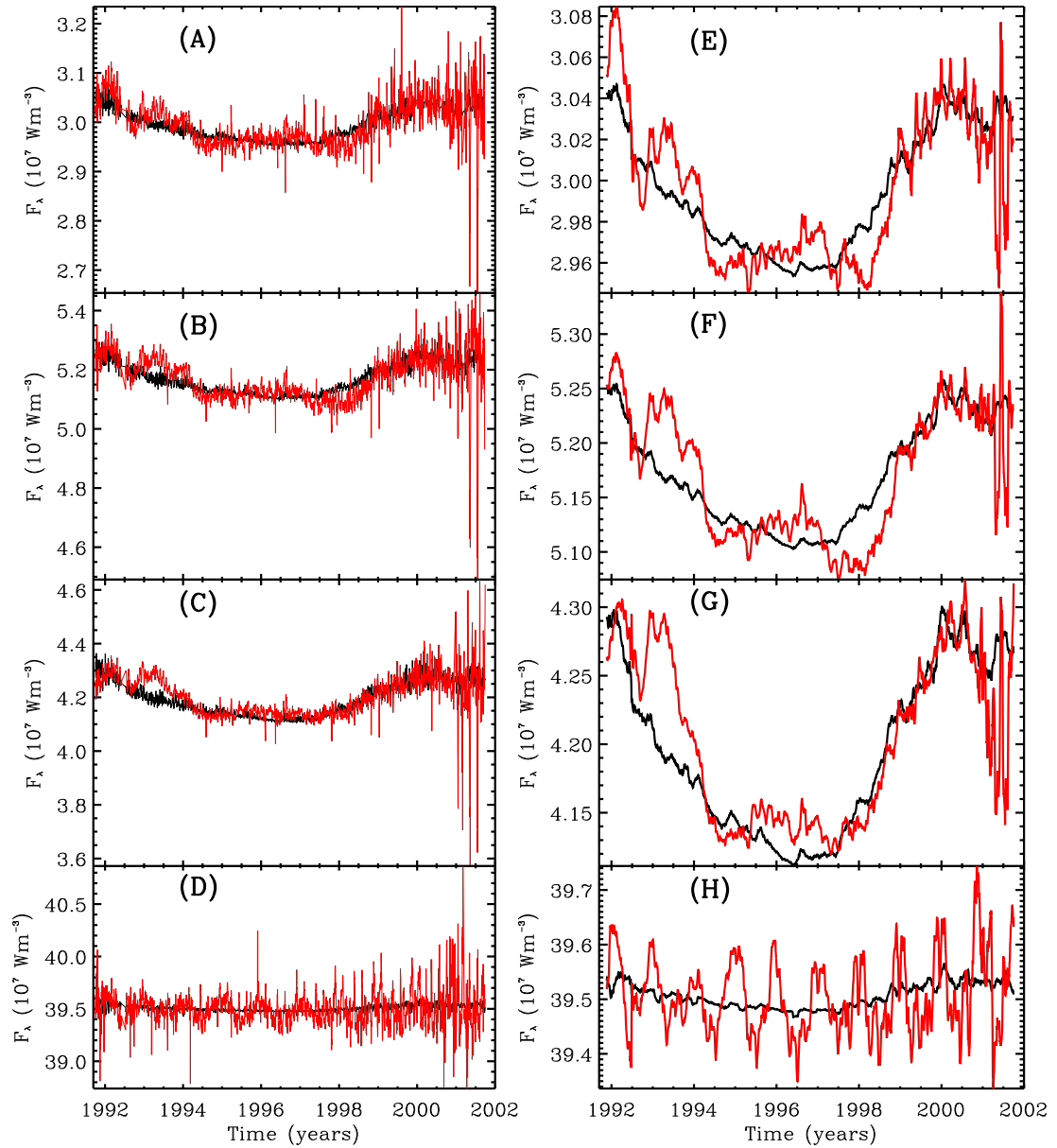


Figure 2.6 – Observed and reconstructed spectral irradiance time series for $\lambda = 210.5$, 220.5, 240.5 and 300.5 nm (from top to bottom). Left panels show daily model data in black and daily, linearly detrended, UARS data in red. Right panels show the same data after smoothing with a 81-day wide running boxcar averaging filter.

activity levels.

The fitting procedure also yields a temperature corrections associated with each wavelength's formation height, as calculated by the Solanki & Unruh (1998) procedure. The best-fit temperature corrections for the twelve chose wavelengths can then be used jointly to define an inversion of the "best-fit" facular temperature profile. This, is shown as solid dots on 2.8, together with the FAL-B (quiet Sun inter-network) model and the FAL-P (facular) model. The full reconstructed profile can be defined as the piecewise-linear interpolation of the best-fit temperatures. For each of the twelve wavelengths multiple PIKAIA returned essentially the same best-fit solutions, with the rms deviation about the mean much smaller than the size of the solid dots on the Figure. The best-fit parameter values found for each of the twelve wavelengths are listed in table 2.I, along with the original facular temperature from FAL-P model, the quiet Sun temperature from FAL-B model and their associated formation height. At most wavelengths, the optimal facular temperature is slightly higher than the FAL-P model, and is significantly higher at 220.5, 223.5 and 236.5 nm. On the contrary, the facular temperatures for 227.5, 233.5 and 234.5 nm are slightly below the FAL-P temperatures.

Figure 2.8 presents a number of interesting features. The adjusted facular temperature profile is found to decrease with height, in a manner closely resembling characterizing the FAL facular profile. This is reassuring, given that the latter was produced through an entirely different spectral synthesis procedure. Nonetheless, at a given height the best-fit temperatures end up slightly but systematically higher than those characterizing FAL, the difference reaching 100K at some heights. A similar situation was encountered by Solanki & Unruh (1998), but the temperature correction they had to introduce was much smaller than ours, and restricted to low heights (200km) above the nominal photosphere. Interestingly, this is also the height formation range where our inferred facular temperature profile departs the most from the reference FAL-P profile. Part of the difference likely also result from use of different datasets used here versus Solanki & Unruh (1998), as well as the fact that these authors adjusted their facular temperature profile by fitting peak-to-peak cyclic variability, rather than time series spanning intermediate activity regimes.

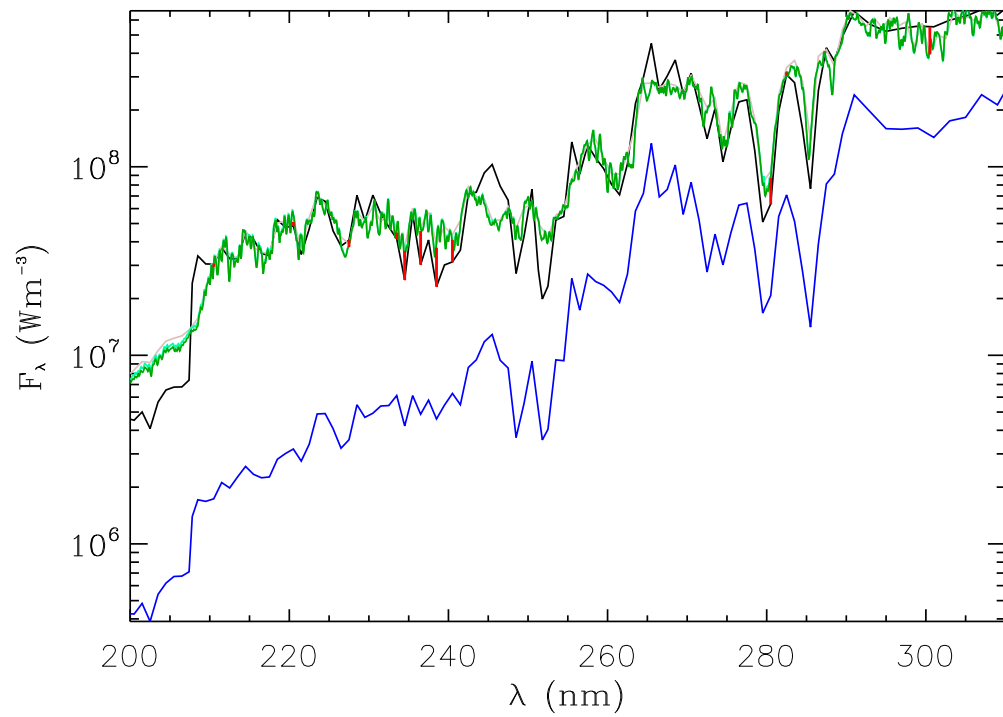


Figure 2.7 – Kurucz synthetic spectrum with $T_{eff} = 5750$ K in black, Kurucz synthetic spectrum with $T_{eff} = 5250$ K in blue, UARS minimum activity spectrum in light gray, Atlas 3 and Atlas 1 spectra in light green and dark green, respectively. Red lines show the difference between the original quiet Sun flux from Kurucz spectrum and the corrected value.

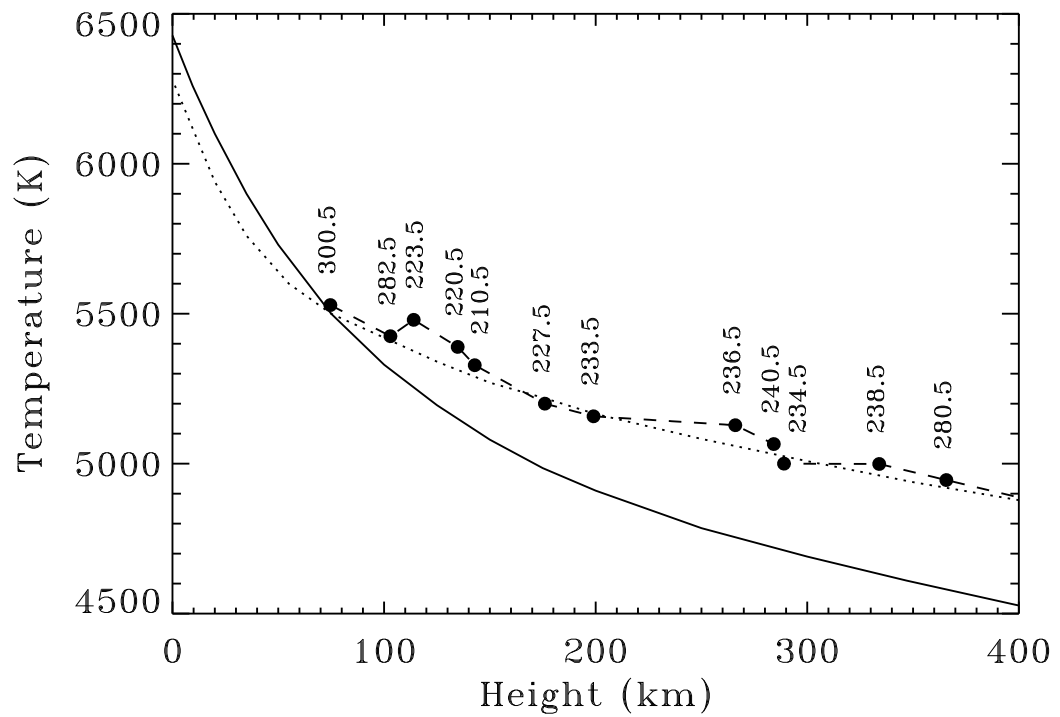


Figure 2.8 – FAL-B 2009 temperature profile for the quiet Sun inter-network (solid line), FAL-P 2009 facular temperature profile (dotted line) and piecewise linear fit to the optimized facular temperatures found with Pikaia for given wavelengths and their associated formation height (dashed line).

Tableau 2.I – Optimal temperature, original FAL-P model temperature, quiet-Sun temperature, quiet Sun flux and formation height for each wavelength.

λ nm	Inverted temperature K	FAL-P temperature K	Quiet Sun temperature K	$F_{Q,\lambda}$ Wm^{-3}	h km
210.5	5328.6	5287.6	5111.1	1.40922×10^{12}	142.8
220.5	5388.9	5310.1	5147.8	2.24495×10^{12}	134.8
223.5	5479.2	5376.1	5252.4	3.19079×10^{12}	113.8
227.5	5201.0	5218.6	4982.7	1.88749×10^{12}	175.7
233.5	5157.6	5166.4	4911.2	1.91786×10^{12}	199.6
234.5	5007.7	5025.5	4710.7	1.16377×10^{12}	288.4
236.5	5128.6	5060.0	4754.1	1.40107×10^{12}	265.2
238.5	4999.1	4960.1	4632.3	1.07122×10^{12}	333.6
240.5	5064.3	5031.7	4718.3	1.44870×10^{12}	284.2
280.5	4945.3	4918.8	4579.4	2.94416×10^{12}	365.7
282.5	5425.3	5410.3	5311.5	1.42462×10^{13}	103.2
300.5	5529.9	5501.5	5503.0	2.54198×10^{13}	74.6

It is certainly possible that the χ^2 minimization faces tradeoffs where the correction on the quiet Sun and the facular temperature can offset one another, in the sense that an elevated facular temperature may result from a reduced quiet flux level (negative correlation). In order to assess whether this is indeed the case, Figure 2.9 shows a correlation between the best-fit parameters, for all twelve wavelengths used for the facular temperature reconstruction of Fig. 2.8. One may infer at best a weak *positive* correlation, which all but disappears if the fits at $\lambda = 282\text{nm}$ and 300nm were to be omitted, on the grounds that UARS data at these wavelengths are deemed of poorer overall quality (viz. Fig. 2.6D,H). One can but conclude that the systematically elevated facular temperature profile —as compared to FAL-P— are not due to a tradeoff effect in the fitting procedure.

We are not claiming that the detail structure of the reconstructed temperature profile of Fig. 2.8 are to be interpreted as a physical model of the temperature structure of facular magnetic elements. Rather, Fig. 2.8 represents a facular temperature inversion of UARS data at selected wavelengths, based on the Solanki & Unruh (1998) spectral reconstruction procedure. In this context it does represent the temperature inversion

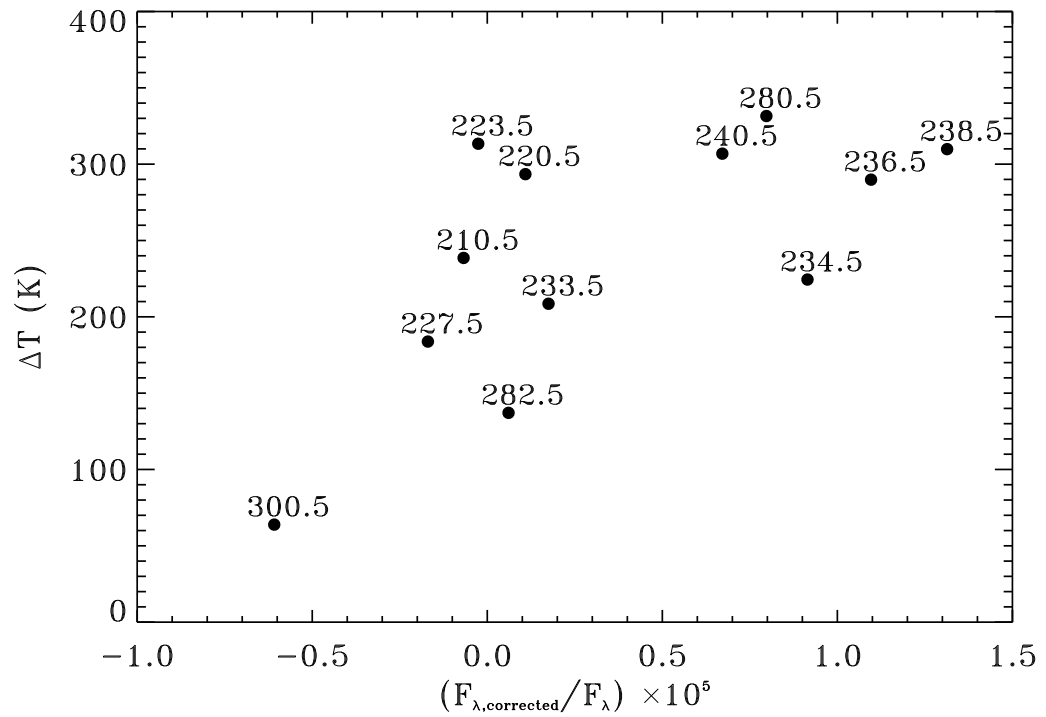


Figure 2.9 – Difference between optimal facular temperature profile and FAL-P temperatures at a given wavelength versus relative correction on the quiet Sun flux level. Any tradeoff between fitting parameters producing the elevated temperature on Fig. 2.8 between 100 and 300 km in formation height should result in an anticorrelation between the plotted quantities.

that yields the best fit to UARS data. Before moving on to reconstructions per se, it is therefore worth exploring the robustness of this empirical reconstruction by validating it against other data and reconstructions.

2.4 Validation, reconstructions and correlations

2.4.1 Validation

The first validation exercise consist in reconstructing spectral irradiance time series at wavelength not used for model calibration, and compare these reconstructions to available UARS/SOLTICE time series. For each of these new wavelengths a formation height is first calculated according to the procedure described previously, and an associated temperature by piecewise linear interpolation on the fitted profile of Fig. 2.8. For the purposes of this validation exercise, the data are again detrended linearly, and the quiet Sun levels are adjusted manually by subtracting the difference between the averaged data sets to the calculated time series.

Figure 2.10 shows four spectral irradiance time series, for $\lambda = 230.5, 250.5, 350.5$ and 370.5 nm, obtained with the interpolated temperature profile. Once again, the model succeeds in reproducing UARS/SOLSTICE data quite well below 300 nm, with similar rms residuals as with the time series of Fig. 2.6. The poorer reconstructions arise again at longer wavelengths, where the data is deemed of poorer quality.

A last validation exercise consist in reconstructing a spectrum between 200 and 400 nm and comparing it with the ATLAS 1 (Thuillier et al. (1997)) spectrum, observed on 1992/03/29. For consistency, we replace the quiet Sun spectrum used in the model by a spectrum taken during low activity, being the ATLAS 3 (Thuillier et al. (2003a)) spectrum, observed on 1994/11/11.

Using our simulated spots and faculae area distribution, we calculated spectral irradiance time series between 200 and 400 nm with a 1 nm resolution. We used the ATLAS 3 spectrum as a baseline and we used the inverted temperature profile to estimate the facular contrast. Both ATLAS 1 and our reconstructed spectra are compared on figure 2.11, along with their relative difference depending of wavelength. The two spectra agree wi-

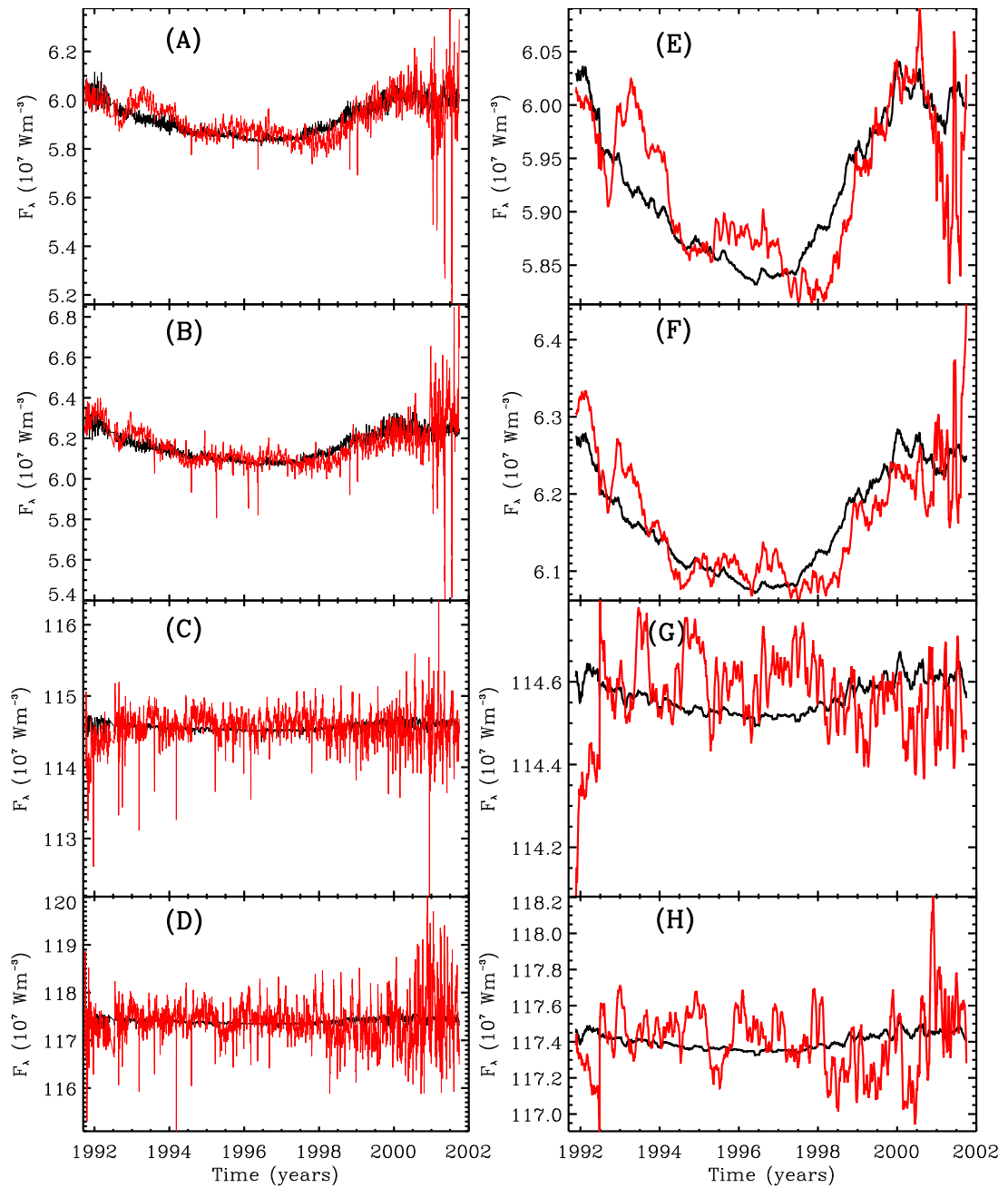


Figure 2.10 – Observed and reconstructed spectral irradiance time series for $\lambda = 230.5$, 250.5 , 350.5 and 370.5 nm (from top to bottom). Left panels show raw model data in black and raw, linearly corrected, UARS data in red. Right panels show the same data after smoothing. The reconstructed time series were calculated using the interpolated facular temperature profile.

thin less than five percent for most of the wavelength interval, except at 393.5 nm where it reaches 22 %. This corresponds to the CaII K line at 393.4 nm, which is formed in the chromosphere. The chromospheric lines are not supposed to be captured by the method developed by Solanki and Unruh (1998), so this discrepancy between the reconstructed and the observed spectra is perfectly normal.

2.4.2 Reconstruction

The availability of spots emergences data starting 1874⁴, permits the reconstruction of synthetic spectral irradiance time series going essentially as far back in time. Figure 2.12 show such reconstructions for $\lambda = 210.5, 240.5, 300.5$ and 370.5 nm. With the quiet sun UV fluxes being here time independent by design, these reconstructions cannot (and do not) show any long-timescale modulation superimposed on the 11-year sunspot cycle, any variation in flux levels from one activity minimum to another being due to the presence of residual magnetic structures from the previous cycle. The reconstructions nonetheless incorporate many features commonly observed in other such UV reconstructions, notably the increasing signature of sunspot darkening with increasing wavelength above 260nm, and the predominance of facular brightening below, with relative variability between maximum and minimum phases of activity in the 5—10% range.

2.4.3 Correlations

Spectral irradiance measurements carried out by the SIM instrument on the SORCE mission during the descending phase of cycle 23 have revealed UV spectral variations far more complex and wavelength-dependent than expected, and of far greater amplitude than predicted by extant UV reconstructions (see, e.g., Fig. 1 in Haigh et al. 2010). Strong wavelength dependencies in the near- and mid-UV spectral range have potentially important consequences for stratospheric heating and chemistry, because of the strong wavelength (and temperature) dependence of the contributing photochemical mechanism. Absorption of solar UV radiation below 320nm is the primary heating source

⁴<http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>

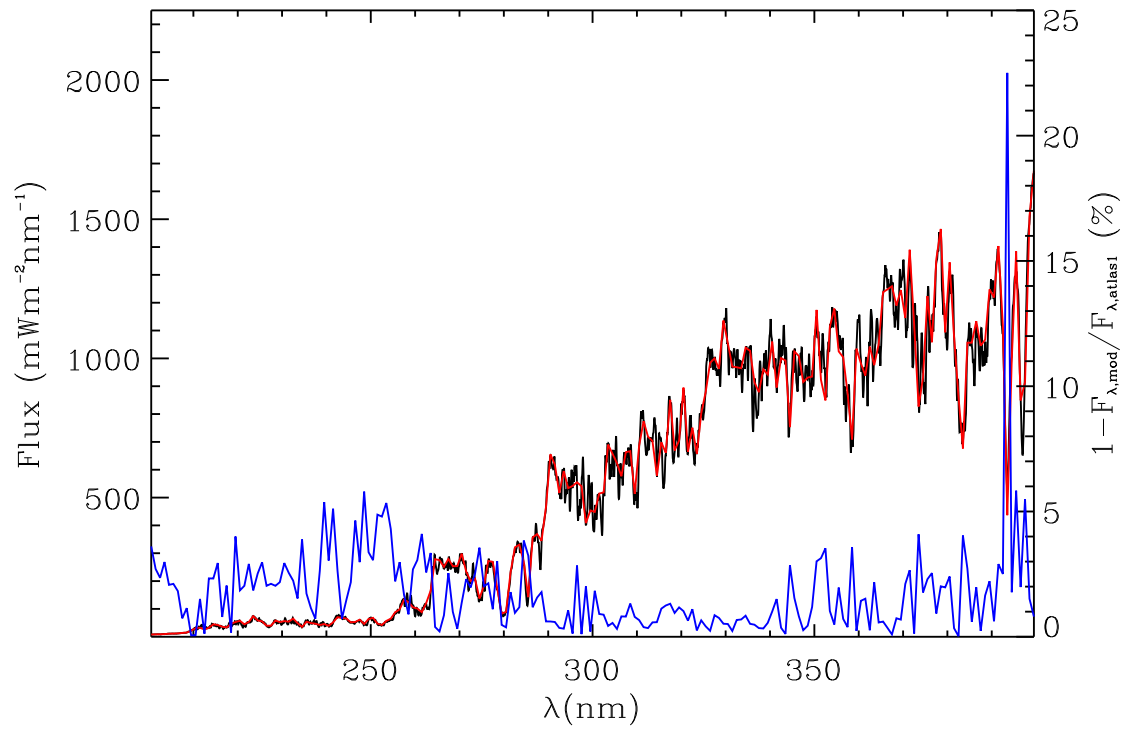


Figure 2.11 – ATLAS 1 spectrum, taken on 1992/03/2 (in red), reconstructed spectrum (in black) for the same day, and relative difference (in blue). The spectrum reconstruction is done by using our simulated spots and faculae area distribution, and the spectral irradiance is calculated with the ATLAS 3 spectrum (observed on 1994/11/11) used as a baseline and the inverted facular temperature profile for the black-body inversion procedure. The relative difference is less than five percent for most wavelengths, which corresponds to the uncertainty on ATLAS spectra. It reaches more than 22 % at 393.5 nm, at the center of the CaII K line. However, this is not alarming since our procedure is not supposed to be able to capture the chromospheric phenomena implied in the formation of this absorption line.

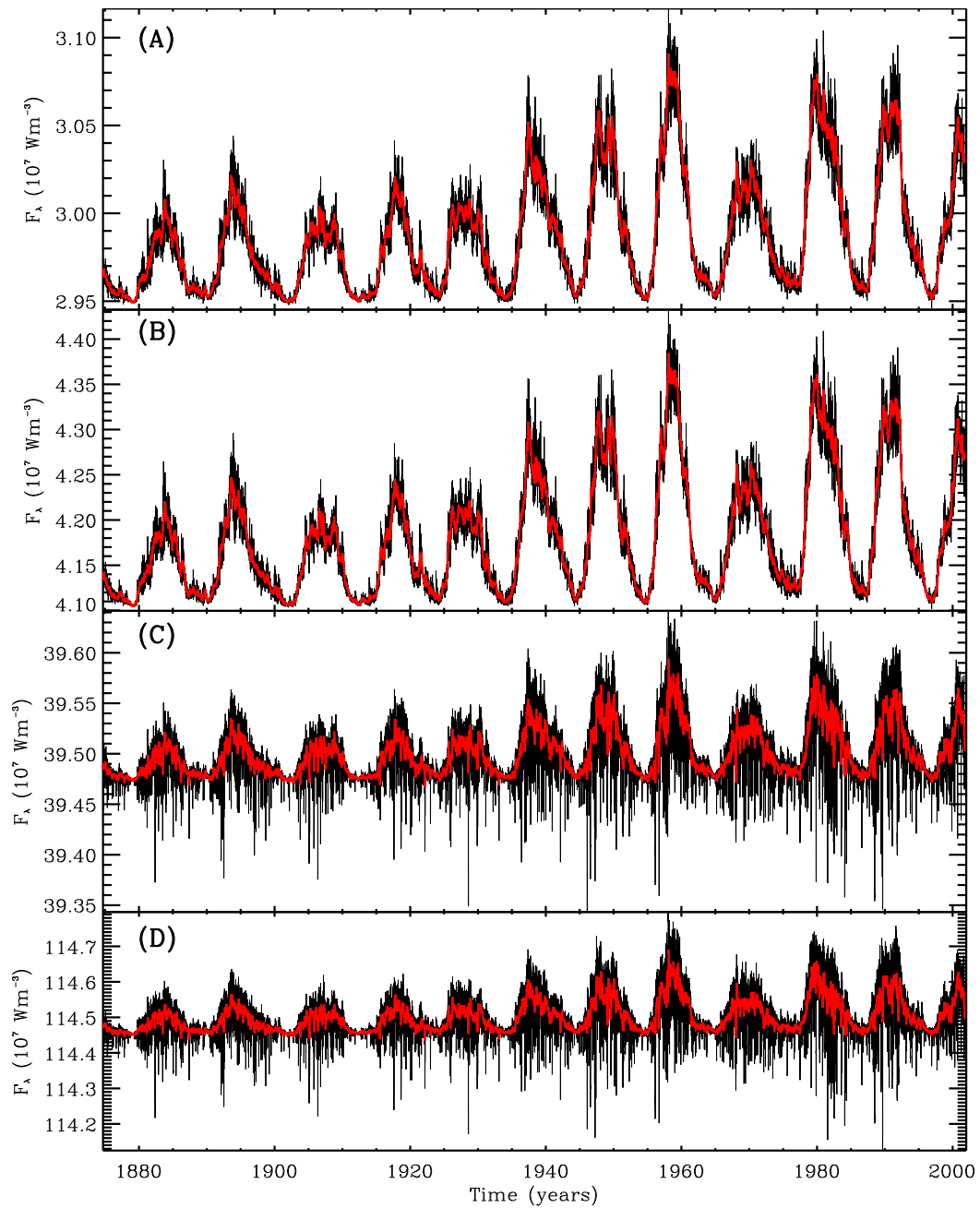


Figure 2.12 – Spectral irradiance time series from 1874 to 2002, for $\lambda = 210.5, 240.5, 300.5$ and 370.5 nm on panels A to D respectively. Time series for $\lambda > 300.5$ nm show a strong similarity with TSI time series, showing that the spots contrast become non-negligible compared to the facular brightening.

for the stratosphere (from about 10 to 50 kilometers in altitude), while the photolysis of molecular Oxygen (O_2) into Ozone (O_3) is driven by radiation of wavelength below 240nm. Modelling of the stratospheric response to UV spectral variation has shown it to be extremely nonlinear, strongly altitude-dependent, and sensitive to the wavelength-dependence of relative UV flux variations in the 200-320nm range.

Figure 2.13 shows the correlations between various pairs of reconstructed (black, left column) and observed (UARS/SOLSTICE, red) spectral time series corrected for linear trends, with the black squares indicating the range of the corresponding correlation plot in the left panels. The correlation plots typically span broader ranges for observations than for the reconstructions, consistent with the already noted lower levels of temporal variability characterizing the reconstructions. Nonetheless, in most cases (though not all, cf. panels C and G) the scatterplots show similar slopes.

2.5 Discussion and conclusions

In this paper we have described and discussed a novel spectral irradiance reconstruction model applicable to the near- and mid-ultraviolet range of the electromagnetic spectrum. The reconstruction is based on a Monte-Carlo-type simulation of surface magnetic flux evolution, which is driven by active region emergences and operates through erosion and fragmentation of magnetic structures (see Crouch et al. 2008). This surface magnetic flux evolution model is used to drive a three-component model of surface emissivity accounting for the contributions of the quiet sun photosphere, sunspots, and facular magnetic elements.

Crouch et al. (2008) have shown that despite its (relative) simplicity, this reconstruction framework could yield a very good reproduction of solar total irradiance variations over the three cycles for which reliable space-borne measurements of this quantity are available. Motivated by this success, here we extended the model to spectral irradiance reconstruction. Towards this purposes we retained the original three component model for surface emissivity, but turned to synthetic spectra to compute the spectrally resolved radiative fluxes of the quiet sun and sunspots, and to the simple procedure propo-

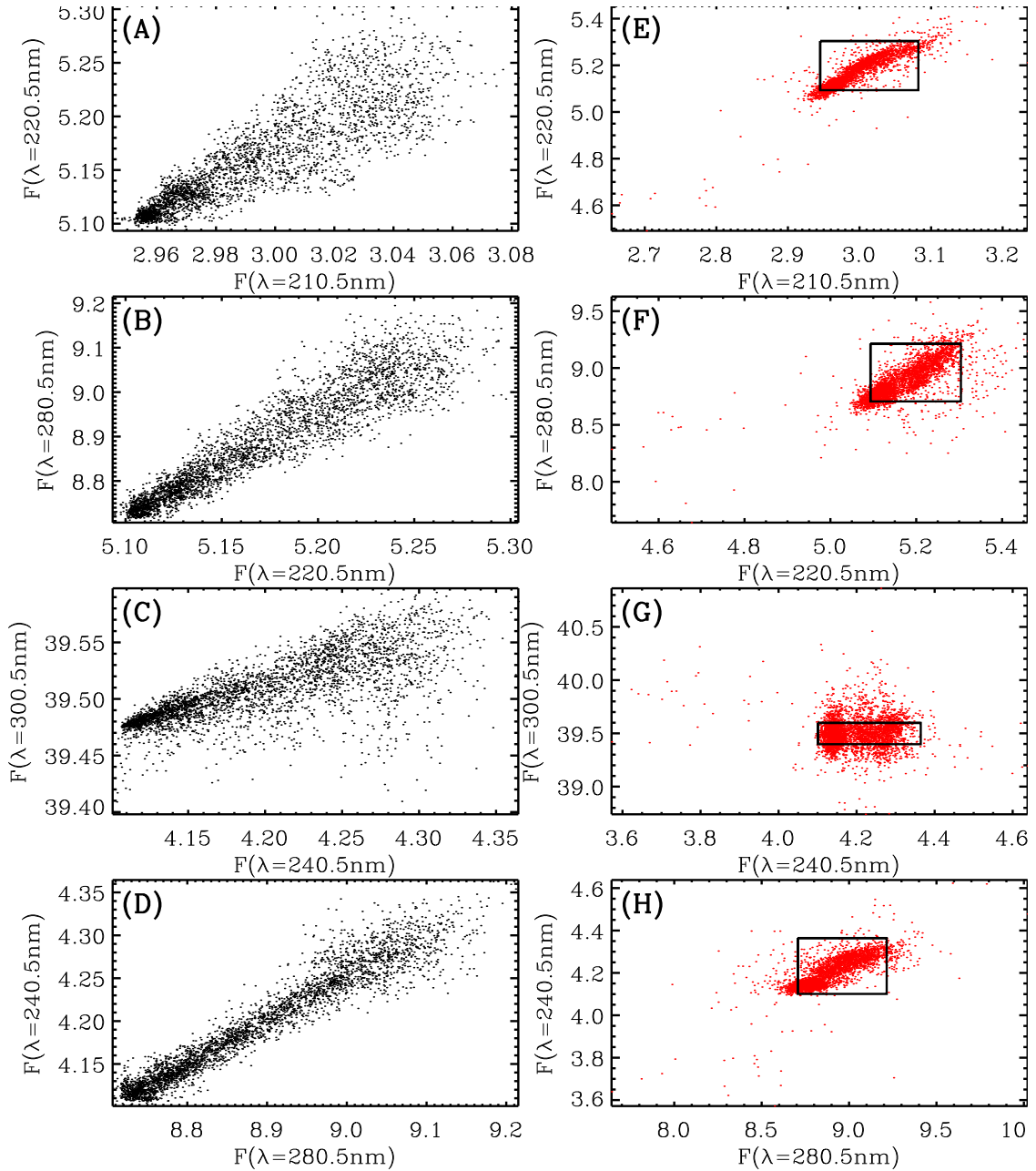


Figure 2.13 – Correlation between flux at $\lambda = 210.5 \text{ nm}$ and $\lambda = 220.5 \text{ nm}$, $\lambda = 220.5 \text{ nm}$ and $\lambda = 280.5 \text{ nm}$, $\lambda = 240.5 \text{ nm}$ and $\lambda = 300.5 \text{ nm}$ and $\lambda = 280.5 \text{ nm}$ and $\lambda = 240.5 \text{ nm}$, for the model (panel A to D) and for observations (panel E to H). The right panels axis ranges are replotted as black boxes on the corresponding left panels.

sed by Solanki and Unruh (1998) to compute the contribution of facular elements. The resulting reconstructions were calibrated and validated against UARS/SOLSTICE UV observations spanning the 1991-2001 time interval (Rottman et al. (2001)), and extended back to 1874 using the Greenwich database of active region emergences (<http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>). The overall fit between model and data is reasonably good, although significant discrepancies remain, notably with regards to the amplitude of short (i.e., daily) timescale variations. The good agreement between the “inverted” facular temperature profile obtained by fitting UARS/SOLSTICE UV data, and that obtained by Fontenla et al. (2009) through an entirely different procedure, lends further confidence to our modelling approach.

The reconstruction framework for total and spectral solar irradiance described here and in Crouch et al. (2008) remains quite simple in comparison to other extant reconstruction models of UV spectral irradiance based on spatially resolved solar images and magnetograms (e.g. Solanki et al. (2005), Unruh et al. (2008)). Yet this simplicity was explicitly sought. The overall aim of our model development effort is to produce an irradiance reconstruction framework that can be extended far back in time, i.e. without requiring spatially-resolved images or magnetograms, and computationally efficient enough to allow multiple reconstructions over timescales ranging up to millenia, as required for example by ensemble simulations of atmospheric response to varying levels of solar activity, as needed in the study of possible climatic effects. The results reported in this paper indicate that this is indeed feasible.

Various improvements to the reconstruction framework are already under development, notably the inclusion of a quiet sun magnetic network component, based on the diffusion-limited aggregation model of Crouch et al. (2007), recently generalized to the full solar surface and including the effects of active region emergences and decay (Thibault et al. 2011, in preparation). Through the aggregation process, this model also leads to the buildup of facular-like aggregates of small magnetic elements in the vicinity of decaying active regions, thus offering a geometrically more realistic representation of active region faculae than the “diffuse cloud” currently incorporated in our current reconstructions. With the statistical properties of active region emergences well documen-

ted, it will be straightforward to extend the Greenwich active region emergence database to the beginning of the sunspot number record. Because active region emergences are the only input required for the reconstruction, it would then be possible to produce reconstructions going back to the seventeenth century Maunder Minimum. Finally, the reconstruction model is readily amenable to the inclusion of a slow modulation of the quiet sun emissivity, as could be driven by modulation of convective energy transport by the solar cycle large-scale magnetic field (see, e.g., Tapping et al. (2007), and references therein). Global magnetohydrodynamical numerical simulation of solar convection have recently achieved the production of tolerably solar-like cycles (Ghizaru et al. (2010)), and do show a thermal signature through such a modulation. Such simulations could in principle be used to produce a parameterization of quiet sun variations over multi-decadal timescales.

2.6 Acknowledgements

We wish to thank Dr. Gerard Thuillier for kindly making available to us his full solar spectra from the Atlas-1 and Atlas-3 missions, as well as the UARS/SOLSTICE team for granting open access to their data. We also wish to acknowledge significant contributions by Benedict Plante and Xavier Fabian in the early stages of this project. This work was supported by Canada's Natural Sciences and Engineering Research Council, Research Chair Program, the Programme de Recherche en Équipe of the Fonds de Recherche sur la Nature et Technologie (Québec, Grant 119078), as well as by the Space Science Enhancement Program of the Canadian Space Agency (Grant 9SCIGRA-21).

BIBLIOGRAPHIE

- G. Bond, B. Kromer, J. Beer, R. Muscheler and M. N. Evans, W. Showers, S. Hoffmann, R. Lotti-Bond, I. Hajdas, and G. Bonani. Persistent solar influence on north atlantic climate during the holocene. *Science*, 294 :2130–2136, 2001.
- P. N. Brandt, M. Stix, and H. Weinhardt. Modeling solar irradiance variations with an area dependant photometric sunspot index. *Solar Physics*, 152 :119, 1994.
- R. P. Cebula, M. T. DeLand, and E. Hilsenrath. Noaa-11 sloar backscatter ultraviolet, model 2 (sbuv/2) instrument solar spectral irradiance measurements in 1989-1994. 1. observations and long-term calibration. *Journal of Geophysical Research*, 103 : 16235–16250, 1998.
- G. A. Chapman. Variations in the solar constant due to solar active regions. *Astrophysical Journal*, 242 :L45–L48, 1980.
- G. A. Chapman and A. D. Meyer. Solar irradiance variations from photometry of active regions. *Solar Physics*, 103 :21–31, 1986.
- G. A. Chapman, A. M. Cookson, and J. J. Dobias. Variations in total solar irradiance during cycle 22. *Journal of Geophysical Research*, 101 :13541–13548, 1996.
- P. Charbonneau. An introduction to genetic algorithms for numerical optimization. *NCAR Technical Note 450+IA*, pages 311–323, 2002.
- P. Charbonneau and B. Knapp. A user's guide to pikaia 1.0. *NCAR Technical Note 418+IA*, pages 311–323, 1995.
- A. D. Crouch, P. Charbonneau, G. Beaubien, and D. Paquin-Ricard. A model for the total solar irradiance based on active region decay. *Astrophysical Journal*, 677 :723–741, 2008.
- U. Cubasch and R. Voss. The influence of total solar irradiance on climate. *Space Sci. Rev.*, 94(1-2) :185–198, 2000.

- G. de Toma and O. R. White. Empirical modeling of tsi : a critical view. *Solar Physics*, 236 :1–24, 2006.
- M. T. DeLand and R. P. Cebula. Noaa-11 sloar backscatter ultraviolet, model 2 (sbuv/2) instrument solar spectral irradiance measurements in 1989-1994. 2. results, validation, and comparisons. *Journal of Geophysical Research*, 103 :16251–16274, 1998.
- M. T. DeLand and R. P. Cebula. Spectral solar uv irradiance data for cycle 21. *Journal of Geophysical Research*, 106 :21569–21584, 2001.
- M. T. DeLand and R. P. Cebula. Creation of a composite solar ultraviolet irradiance data set. *Journal of Geophysical Research*, 113 :A11103, 2008.
- M. T. DeLand, L. E. Floyd, G. J. Rottman, and J. M. Pap. Status of uars solar uv irradiance data. *Advances in space research*, 34 :243–250, 2004.
- V. Domingo, I. Ermolli, P. Fox, C. Fröhlich, M. Haberreiter, K. Krinova, G. Kopp, W. Schmutz, S. K. Solanki, H. C. Spruit, Y. Unruh, and A. Vögler. Solar surface magnetism and irradiance on time scales from days to the 11-year cycle. *Space Sci. Rev.*, 145 :337–380, 2009.
- J. A. Eddy. The maunder minimum. *Science*, 192(4245) :1189–1202, 1976.
- L. E. Floyd, D. K. Prinz, P. C. Crane, and L. C. Herring. Solar uv irradiance variation during cycle 22 and 23. *Advances in space research*, 29(12) :1957–1962, 2002.
- J. Fontenla, O. R. White, P. A. Fox, E. H. Avrett, and R. L. Kurucz. Calculation of solar irradiances. i. synthesis of the solar spectrum. *Astrophysical Journal*, 518 :480–499, 1999.
- J. M. Fontenla, E. H. Avrett, and R. Loeser. Energy balance in the solar transition region. iii. helium emission in hydrostatic, constant-abundance models with diffusion. *Astrophysical Journal*, 406 :319–345, 1993.

- J. M. Fontenla, W. Curdt, M. Haberreiter, J. Harder, and H. Tian. Semiempirical models of the solar atmosphere. iii. set of non-lte models for far-ultraviolet/extreme-ultraviolet irradiance computation. *Astrophysical Journal*, 707 :482–502, 2009.
- P. Forster, V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Bernsten, R. Betts, D. W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D. C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz, and R. Van Dorland. *Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing in Climate change 2007 : The physical Science basis. Contribution of working group I to the Fourth Assesment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.)]*. Cambridge University Press, 2007.
- P. Foukal and J. Lean. Magnetic modulation of solar luminosity by photospheric activity. *Astrophysical Journal*, 328 :347–357, 1988.
- P. Foukal, K. Harvey, and F. Hill. Do changes in the photopheric magnetic network cause the 11 year variation of total solar irradiance ? *Astrophysical Journal*, 383 :L89, 1991.
- C. Fröhlich. Evidence of a long-term trend in total solar irradiance. *Astronomy and Astrophysics*, 501 :L27–L30, 2009.
- C. Fröhlich and J. Lean. Solar irradiance variability and climate. *Astron. Nachr.*, 323 : 203–212, 2002.
- C. Fröhlich and J. Lean. Solar radiative output and its variability : evidence and mechanisms. *The Astron. Astrophys. Rev.*, 12 :273–320, 2004.
- C. Fröhlich, J. M. Pap, and H. Hudson. Improvement of the photometric sunspot index and changes of the disk-integrated sunspot contrast with time. *Solar Physics*, 152 : 111, 1994.
- C. Fröhlich, J. Romero, H. Roth, C. Wehrli, B. N. Andersen, T. Appourchaux, V. Domingo, U. Telljohann, G. Berthomieu, P. Delache, J. Provost, T. Toutain, D. A. Crommelynck, A. Chevalier, A. Fichot, W. Däppen, D. Gough, T. Hoeksema, A. Jiménez,

- M. F. Gomez, J. M. Herreros, T. R. Cortés, A. R. Jones, J. M. Pap, and R. C. Willson. Virgo : Experiment for helioseismology and solar irradiance monitoring. *Solar Physics*, 162 :101, 1995.
- M. Ghizaru, P. Charbonneau, and P. K. Smolarkiewicz. Magnetic cycles in global large-eddy simulations of solar convection. *Astrophysical Journal*, 715 :L133, 2010.
- M. Haberreiter, N. A. Krinova, W. Schmutz, and T. Wenzler. Reconstruction of the solar uv irradiance back to 1974. *Advances in space research*, 35 :365–359, 2005.
- J. Haigh. Climate variability and the influence of the sun. *Science*, 294 :2109–2111, 2001.
- J. D. Haigh. The role of stratospheric ozone in modulating the solar radiative forcing of climate. *Nature*, 370 :544, 1994.
- J. D. Haigh, A. R. Winning, R. Toumi, and J. W. Harder. An influence of solar spectral variations on radiative forcing of climate. *Nature*, 467 :696–699, 2010.
- J. W. Harder, G. Thuillier, E. C. Richard, S. W. Brown, K. R. Lykke, M. Snow, W. E. McClintock, J. M. Fontenla, T. N. Woods, and P. Pilewski. The solar simulator solar spectrum : Comparison with recent observations. *Solar Physics*, 263 :3–24, 2010.
- H. S. Hudson, S. Silva, M. Woodard, and R. C. Willson. The effect of sunspots on solar irradiance. *Solar Physics*, 76 :211–219, 1982.
- K. Hufbauer. *Exploring the Sun : Solar Science since Galileo*. Baltimore : The Johns Hopkins University Press, 1991.
- G. Kopp, G. Lawrence, and G. Rottman. The total solar irradiance monitor (tim) : Science results. *Solar Physics*, 230 :129–139, 2005.
- N. A. Krinova, S. K. Solanki, T. Wenzler, and B. Podlipnik. Reconstruction of solar uv irradiance since 1974. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 114 :1, 2009.

- R. L. Kurucz. New opacity calculations. In D. Reidel Publishing Co., editor, *Stellar atmospheres : Beyond classical models, Proceeding of the Advanced research workshop, Trieste, Italy, Dordrecht*, page p.441, 1991.
- R. L. Kurucz, 1993. URL <ftp://ftp.stsci.edu/cdbs/grid/k93models/kp00/>.
- H. L. Kyle, D. V. Hoyt, and J. R. Hickey. A review of the nimbus-7 erb solar dataset. *Solar Physics*, 152 :9, 1994.
- Kenneth R. Lang. *Sun, Earth and Sky*. Springer, second edition edition, 2006.
- J. Lean. Variations in the sun's radiative output. *Reviews of geophysics*, 29(4) :505–535, 1991.
- J. Lean. Evolution of the sun's spectral irradiance since the maunder minimum. *Geophysical Research Letters*, 27 :2425–2428, 2000.
- J. Lean and D. Rind. Earth's response to a variable sun. *Science*, 292(5515) :234–236, 2002.
- J. Lean, J. Cook, W. Marquette, and A. Johannesson. Magnetic sources of the solar irradiance cycle. *Astrophysical Journal*, 492 :390–401, 1998.
- J. Lean, G. Rottman, J. W. Harder, and G. Kopp. Sorce contribution to new understanding of global change and solar variability. *Solar Physics*, 230 :27–53, 2005.
- G. A. Meehl, J. M. Arblaster, K. Matthes, F. Sassi, and H. van Loon. Amplifying the pacific climate system response to a small 11-year solar cycle forcing. *Science*, 325 : 1114–1118, 2009.
- R. Muncaster, M.S. Bourqui, S. Chabrilat, S. Viscard, S. Melo, and P. Charbonneau. Modelling the effects of short-term solar variability on stratospheric chemistry. *Atmos. Chem. Phys.*, May 2011. submitted.

- L. Oster. Solar irradiance variations. ii. - analysis of the extreme ultraviolet measurements onboard the atmosphere explorer e satellite. *Journal of Geophysical Research*, 88 :9037–9052, 1983.
- P. Pilewski, G. Rottman, and E. Richard. An overview of the disposition of solar radiation in the lower atmosphere : connections to the sorce mission and climate change. *Solar Physics*, 230, 2005.
- D. Rind. The sun’s role in climate variations. *Science*, 296 :673, 2002.
- G. Rottman, T. Woods, M. Snow, and G. de Toma. The solar cycle variation in ultraviolet irradiance. *Advances in space research*, 27(12) :1927–1932, 2001.
- G. Rottman, J. W. Harder, J. Fontenla, T. Woods, O. R. White, and G. M. Lawrence. The spectral irradiance monitor (sim) : early observations. *Solar Physics*, 230 :205–224, 2005.
- G. J. Rottman. Observations of solar uv and euv variability. *Advances in space research*, 8(7) :53–66, 1988.
- G. J. Rottman, T. N. Woods, and T. P. Sparn. Solar stellar irradiance comparison experiment 1 : 1. instrument design and calibration. *Journal of Geophysical Research*, 98 : 10667–10678, 1993.
- K. Scherer, H. Fichtner, T. Borrmann, J. Beer, L. Desorgher, E. Flükiger, H.-J. Fahr, S. E. S. Ferreira, U. W. Langner, M. S. Potgieter, B. Heber, N. J. Masarik, J. ans Shaviv, and J. Veizer. Interstellar-terrestrial relations : Variable cosmic environments, the dynamic heliosphere, and their imprints on terrestrial achives and climate. *Space Sci. Rev.*, 127 :327–465, 2006.
- J. Skupin, S. Noël, Mé W. Wuttke, M. Gottwald, H. Bovensmann adn M. Weber, and J. P. Burrows. Sciamachy solar irradiance observation in the spectral range from 240 to 2380 nm. *Advances in space research*, 35 :370–375, 2005.

- S. K. Solanki, N. A. Krinova, and T. Wenzler. Irradiance models. *Advances in space research*, 35 :376, 2005.
- S.K. Solanki and Y.C. Unruh. A model of the wavelength dependance of solar irradiance variations. *Astronomy and Astrophysics*, 329 :747–753, 1998.
- K. Tapping, D. Boteler, P. Charbonneau, A. Crouch, A. Manson, and H. Paquette. Solar magnetic activity and total solar irradiance since the maunder minimum. *Solar Physics*, 246 :309–326, 2007.
- G. E. Thomas, C. A. Barth, E. R. Hansen, C. W. Hord, G. M. Lawrence, G. H. Mount, G. J. Rottman, D. W. Rusch, A. I. Stewart, and R. J. Thomas. Scientific objectives of the solar mesosphere explorer mission. *Pure and applied geophysics*, 118(1-2) : 591–615, 1980.
- G. Thuillier, M. Hersé, P. C. Simon, D. Labs, H. Mandel, and D. Gillotay. Observation of the uv solar spectral irradiance between 200 and 350 nm during the atlas 1 mission by the solspec spectrometer. *Solar Physics*, 171 :283–302, 1997.
- G. Thuillier, M. Hersé, P. C. Simon, D. Labs, H. Mandel, D. Gillotay, and T. Foujols. The visible solar spectral irradiance from 350 to 850 nm as measured by the solspec spectrometer during the atlas 1 mission. *Solar Physics*, 177 :41–61, 1998.
- G. Thuillier, M. Hersé, D. Labs, T. Foujols, W. Peetermans, D. Gillotay, P. C. Simon, and H. Mandel. The solar spectral irradiance from 200 to 2400 nm as measured by the solspec spectrometer from the atlas and eureca missions. *Solar Physics*, 214 :1–22, 2003a.
- G. Thuillier, A. Joukoff, and W. Schmutz. The picard mission. *International Solar Cycle Studies (ISCS) Symposium, 23 - 28 June 2003, Tatranská Lomnica, Slovak Republic. Ed. : A. Wilson. ESA SP-535, Noordwijk : ESA Publications Division*, pages 251–257, 2003b.

- Y. C. Unruh, N. A. Krinova, S. K. Solanki, J. W. Harder, and G. Kopp. Spectral irradiance variations : comparison between observations and the satire model on solar rotation time scales. *Astronomy and Astrophysics*, 486 :311–323, 2008.
- M. Weber, J. P. Burrows, and R. P. Cebula. Gome solar uv/vis irradiance measurements between 1995 and 1997 - first results on proxy solar activity study. *Solar Physics*, 177 :63–77, 1998.
- T. Wenzler, S. K. Solanki, N. A. Krinova, and C. Fröhlich. Reconstruction of solar uv irradiance variations in cycles 21-23 based on surface magnetic fields. *Astronomy and Astrophysics*, 460 :583–595, 2006.
- T. M. L. Wigley and S. C. B. Raper. Climatic change due to solar irradiance changes. *Geophysical Research Letters*, 17(12) :2169–2172, 1990.
- R. C. Willson and H. S. Hudson. Solar luminosity variations in solar cycle 21. *Nature*, 332 :810, 1988.
- R. C. Willson and H. S. Hudson. The sun’s luminosity over a complete solar cycle. *Nature*, 351 :42, 1991.
- R. C. Willson and A. V. Mordvinov. Secular total solar irradiance trend during solar cycles 21-23. *Geophysical Research Letters*, 30 :1199, 2003.
- R. C. Willson, S. Gulkis, M. Janssen, H. S. Hudson, and G. A. Chapman. Observations of solar irradiance variability. *Science*, 211 :700–702, 1981.
- Thomas N. Woods, Francis G. Eparvier, Scott M. Bailey, Phillip C. Chamberlin, Judith Lean, Gary J. Rottman, Stanley C. Solomon, W. Kent Tobiska, and Donald L. Wooldraska. Solar euv experiment (see) : Misson overview and first results. *Journal of Geophysical Research*, 110 :A01312, 2005.

CHAPITRE 3

CONCLUSION

La modélisation des variations de l'irradiance solaire spectrale dans le proche et moyen ultraviolet est essentielle car elle fournit un paramètre d'entrée pour les modèles de l'atmosphère terrestre, en particulier pour la chimie et la dynamique de la stratosphère. Puisque les observations aux longueurs d'ondes impliquées dans les réactions chimiques de l'ozone stratosphérique ne s'étendent que sur quelques cycles, il est nécessaire que les modèles d'irradiance solaire puissent être utilisés afin de produire des reconstructions s'étendant sur un intervalle temporel aussi long que possible. À cet effet, le modèle présenté ici détient l'avantage de répondre particulièrement bien à ce critère. Les paramètres reproduisant les processus physiques sous-jacents à la désintégration et à l'injection des taches solaires sont calibrés sur les observations d'irradiance totale sur l'espace de trois cycles d'activité. Puisque ces paramètres n'ont fort probablement pas subi de changement majeurs au cours de l'histoire récente du Soleil, ils demeurent fiables même s'ils sont utilisés en dehors de leur intervalle de calibration.

Ce modèle a été modifié de sorte à reproduire l'irradiance spectrale à une longueur d'onde arbitraire. Pour ce faire, la contribution du Soleil inactif est estimée grâce à un spectre synthétique non magnétique sur lequel est appliquée une correction, de sorte à reproduire le niveau de base des données de SOLSTICE sur UARS. Par la suite, l'assombrissement des taches est calculé de façon simple en comparant le flux d'un spectre solaire non magnétique d'une température correspondant à la température moyenne des taches, avec celui du spectre correspondant au Soleil inactif. Enfin, le contraste des facules est calculé grâce à la méthode d'inversion de corps noir développée par Solanki and Unruh (1998). Cette procédure ne reproduisant pas de façon satisfaisante l'amplitude des variations cycliques, de nombreuses modifications au profil de température des facules, utilisé dans la procédure d'inversion de corps noir, ont été expérimentées.

L'expérience la plus concluante s'est avérée être la reconstruction complète du dit profil de température en trouvant, à l'aide d'une optimisation par algorithme génétique,

la température associée à la hauteur de formation des photons d'une longueur d'onde précise. Un choix d'une douzaine de longueurs d'ondes échantillonnant un intervalle de hauteurs de 75 à 365 km a permis de reconstruire un profil de température en interpolant linéairement entre chaque valeurs trouvée. Des séquences temporelles d'irradiance ont été produites pour des longueurs d'ondes n'ayant pas été utilisées pour l'optimisation et leur niveau moyen a été ajusté en soustrayant la différence avec le niveau moyen des données de UARS. L'accord avec les observations est aussi bon que pour les longueurs d'ondes dont la température a été optimisée.

Le profil de température optimal a été déterminé en éliminant la contribution du contraste centre-bord présente dans la formule décrivant le contraste des facules par rapport à la photosphère non magnétique, et remplacé par sa valeur au centre du disque. Cette modification est justifiée par le fait que cette équation est basée sur le contraste bolométrique des facules, alors que leur contraste spectral est mal défini. De plus, le terme forçant le contraste des facules à être nul au centre du disque et maximal à sa périphérie a aussi été éliminé.

Le modèle optimal a été utilisé pour produire des séquences temporelles d'irradiance spectrale débutant en 1874, année à partir de laquelle les données sur les taches sont compilées de façon satisfaisante. Les données reconstruites sont comparées de sorte à voir la corrélation entre l'irradiance à deux longueurs d'ondes différentes pour une journée donnée, et ce afin de vérifier l'hypothèse de base de certains modèles de chimie stratosphérique, c'est-à-dire que l'irradiance spectrale varie de façon linéaire d'une longueur d'onde à l'autre.

Toutefois, le modèle, dans son état actuel, ne tient pas compte des variations à long terme qui ne dépendent pas directement de la couverture surfacique des structures magnétiques comme les taches et les facules. Il est toutefois possible d'y intégrer une variation temporelle de la contribution du Soleil inactif, ce qui sera utile afin de tenir compte des variations du niveau minimal d'irradiance observées au cours des derniers cycles. Puisque ces changements sont probablement occasionnés par des variations de température globale, on peut estimer l'effet sur la partie ultraviolette du spectre de corps noir. Par exemple, une température plus élevée d'un degré seulement augmente le flux de 0.1

à 0.2% entre 200 et 400 nm. Cette augmentation aurait donc un effet non négligeable sur le niveau minimal d'irradiance.

Enfin, des observations récentes de l'instrument SIM sur le satellite SORCE montrent que le niveau de variabilité entre avril 2004 et novembre 2007 diffère de celui dérivé des données de SOLSTICE sur UARS, ainsi que de celui résultant des modèles de reconstruction de Lean (2000) (Haigh et al. (2010)). La différence est particulièrement frappante en comparant les données au modèle de Lean, ce qui remet en question la façon de calculer l'irradiance en se basant uniquement sur les structures magnétiques. Les données du satellite PICARD permettront de valider ces observations et fourniront une nouvelle référence pour la calibration des modèles de reconstruction de l'irradiance spectrale.

REMERCIEMENTS

Je tiens avant tout à remercier Paul Charbonneau pour m'avoir offert une place dans son groupe de recherche et pour m'avoir proposé un projet qui ne pourrait rejoindre davantage mes intérêts. Merci de m'avoir poussée à me dépasser et de me faire confiance.

Je dois aussi remercier ceux grâce à qui j'ai pu parvenir jusqu'ici, soit mes parents Jean-Guy et Marie-Claude, qui m'ont appuyée et encouragée de toutes les façons possibles. Merci également à tous les membres ma famille pour leur présence et pour leur modèle de valeurs inspirantes.

Il me faut aussi souligner ma reconnaissance envers les filles d'astro qui m'ont acceptée dans leur bureau et leur cercle social. Elles m'ont permis autant de surmonter les problèmes de programmation et de physique que de trouver le plaisir de faire partie d'une «gang de filles».

Finalement, merci à celui qui m'accompagnait au quotidien avant même le début de cette aventure, Pierre-Luc. Merci d'avoir vécu avec moi les moments joyeux comme les plus difficiles, de m'avoir aidée dans plusieurs aspects de mon projet, de tes points de vue objectifs et de tes critiques constructives, mais surtout d'accepter de jouer au prince charmant avec une princesse astronaute.

BIBLIOGRAPHIE

- G. Bond, B. Kromer, J. Beer, R. Muscheler and M. N. Evans, W. Showers, S. Hoffmann, R. Lotti-Bond, I. Hajdas, and G. Bonani. Persistent solar influence on north atlantic climate during the holocene. *Science*, 294 :2130–2136, 2001.
- P. N. Brandt, M. Stix, and H. Weinhardt. Modeling solar irradiance variations with an area dependant photometric sunspot index. *Solar Physics*, 152 :119, 1994.
- R. P. Cebula, M. T. DeLand, and E. Hilsenrath. Noaa-11 sloar backscatter ultraviolet, model 2 (sbuv/2) instrument solar spectral irradiance measurements in 1989-1994. 1. observations and long-term calibration. *Journal of Geophysical Research*, 103 : 16235–16250, 1998.
- G. A. Chapman. Variations in the solar constant due to solar active regions. *Astrophysical Journal*, 242 :L45–L48, 1980.
- G. A. Chapman and A. D. Meyer. Solar irradiance variations from photometry of active regions. *Solar Physics*, 103 :21–31, 1986.
- G. A. Chapman, A. M. Cookson, and J. J. Dobias. Variations in total solar irradiance during cycle 22. *Journal of Geophysical Research*, 101 :13541–13548, 1996.
- P. Charbonneau. An introduction to genetic algorithms for numerical optimization. *NCAR Technical Note 450+IA*, pages 311–323, 2002.
- P. Charbonneau and B. Knapp. A user’s guide to pikaia 1.0. *NCAR Technical Note 418+IA*, pages 311–323, 1995.
- A. D. Crouch, P. Charbonneau, G. Beaubien, and D. Paquin-Ricard. A model for the total solar irradiance based on active region decay. *Astrophysical Journal*, 677 :723–741, 2008.
- U. Cubasch and R. Voss. The influence of total solar irradiance on climate. *Space Sci. Rev.*, 94(1-2) :185–198, 2000.

- G. de Toma and O. R. White. Empirical modeling of tsi : a critical view. *Solar Physics*, 236 :1–24, 2006.
- M. T. DeLand and R. P. Cebula. Noaa-11 sloar backscatter ultraviolet, model 2 (sbuv/2) instrument solar spectral irradiance measurements in 1989-1994. 2. results, validation, and comparisons. *Journal of Geophysical Research*, 103 :16251–16274, 1998.
- M. T. DeLand and R. P. Cebula. Spectral solar uv irradiance data for cycle 21. *Journal of Geophysical Research*, 106 :21569–21584, 2001.
- M. T. DeLand and R. P. Cebula. Creation of a composite solar ultraviolet irradiance data set. *Journal of Geophysical Research*, 113 :A11103, 2008.
- M. T. DeLand, L. E. Floyd, G. J. Rottman, and J. M. Pap. Status of uars solar uv irradiance data. *Advances in space research*, 34 :243–250, 2004.
- V. Domingo, I. Ermolli, P. Fox, C. Fröhlich, M. Haberreiter, K. Krinova, G. Kopp, W. Schmutz, S. K. Solanki, H. C. Spruit, Y. Unruh, and A. Vögler. Solar surface magnetism and irradiance on time scales from days to the 11-year cycle. *Space Sci. Rev.*, 145 :337–380, 2009.
- J. A. Eddy. The maunder minimum. *Science*, 192(4245) :1189–1202, 1976.
- L. E. Floyd, D. K. Prinz, P. C. Crane, and L. C. Herring. Solar uv irradiance variation during cycle 22 and 23. *Advances in space research*, 29(12) :1957–1962, 2002.
- J. Fontenla, O. R. White, P. A. Fox, E. H. Avrett, and R. L. Kurucz. Calculation of solar irradiances. i. synthesis of the solar spectrum. *Astrophysical Journal*, 518 :480–499, 1999.
- J. M. Fontenla, E. H. Avrett, and R. Loeser. Energy balance in the solar transition region. iii. helium emission in hydrostatic, constant-abundance models with diffusion. *Astrophysical Journal*, 406 :319–345, 1993.

- J. M. Fontenla, W. Curdt, M. Haberreiter, J. Harder, and H. Tian. Semiempirical models of the solar atmosphere. iii. set of non-lte models for far-ultraviolet/extreme-ultraviolet irradiance computation. *Astrophysical Journal*, 707 :482–502, 2009.
- P. Forster, V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Bernsten, R. Betts, D. W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D. C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz, and R. Van Dorland. *Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing in Climate change 2007 : The physical Science basis. Contribution of working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.)]*. Cambridge University Press, 2007.
- P. Foukal and J. Lean. Magnetic modulation of solar luminosity by photospheric activity. *Astrophysical Journal*, 328 :347–357, 1988.
- P. Foukal, K. Harvey, and F. Hill. Do changes in the photospheric magnetic network cause the 11 year variation of total solar irradiance? *Astrophysical Journal*, 383 :L89, 1991.
- C. Fröhlich. Evidence of a long-term trend in total solar irradiance. *Astronomy and Astrophysics*, 501 :L27–L30, 2009.
- C. Fröhlich and J. Lean. Solar irradiance variability and climate. *Astron. Nachr.*, 323 : 203–212, 2002.
- C. Fröhlich and J. Lean. Solar radiative output and its variability : evidence and mechanisms. *The Astron. Astrophys. Rev.*, 12 :273–320, 2004.
- C. Fröhlich, J. M. Pap, and H. Hudson. Improvement of the photometric sunspot index and changes of the disk-integrated sunspot contrast with time. *Solar Physics*, 152 : 111, 1994.
- C. Fröhlich, J. Romero, H. Roth, C. Wehrli, B. N. Andersen, T. Appourchaux, V. Domingo, U. Telljohann, G. Berthomieu, P. Delache, J. Provost, T. Toutain, D. A. Crommelynck, A. Chevalier, A. Fichot, W. Däppen, D. Gough, T. Hoeksema, A. Jiménez,

- M. F. Gomez, J. M. Herreros, T. R. Cortés, A. R. Jones, J. M. Pap, and R. C. Willson. Virgo : Experiment for helioseismology and solar irradiance monitoring. *Solar Physics*, 162 :101, 1995.
- M. Ghizaru, P. Charbonneau, and P. K. Smolarkiewicz. Magnetic cycles in global large-eddy simulations of solar convection. *Astrophysical Journal*, 715 :L133, 2010.
- M. Haberreiter, N. A. Krinova, W. Schmutz, and T. Wenzler. Reconstruction of the solar uv irradiance back to 1974. *Advances in space research*, 35 :365–359, 2005.
- J. Haigh. Climate variability and the influence of the sun. *Science*, 294 :2109–2111, 2001.
- J. D. Haigh. The role of stratospheric ozone in modulating the solar radiative forcing of climate. *Nature*, 370 :544, 1994.
- J. D. Haigh, A. R. Winning, R. Toumi, and J. W. Harder. An influence of solar spectral variations on radiative forcing of climate. *Nature*, 467 :696–699, 2010.
- J. W. Harder, G. Thuillier, E. C. Richard, S. W. Brown, K. R. Lykke, M. Snow, W. E. McClintock, J. M. Fontenla, T. N. Woods, and P. Pilewski. The solar simulator solar spectrum : Comparison with recent observations. *Solar Physics*, 263 :3–24, 2010.
- H. S. Hudson, S. Silva, M. Woodard, and R. C. Willson. The effect of sunspots on solar irradiance. *Solar Physics*, 76 :211–219, 1982.
- K. Hufbauer. *Exploring the Sun : Solar Science since Galileo*. Baltimore : The Johns Hopkins University Press, 1991.
- G. Kopp, G. Lawrence, and G. Rottman. The total solar irradiance monitor (tim) : Science results. *Solar Physics*, 230 :129–139, 2005.
- N. A. Krinova, S. K. Solanki, T. Wenzler, and B. Podlipnik. Reconstruction of solar uv irradiance since 1974. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 114 :1, 2009.

- R. L. Kurucz. New opacity calculations. In D. Reidel Publishing Co., editor, *Stellar atmospheres : Beyond classical models, Proceeding of the Advanced research workshop, Trieste, Italy, Dordrecht*, page p.441, 1991.
- R. L. Kurucz, 1993. URL <ftp://ftp.stsci.edu/cdbs/grid/k93models/kp00/>.
- H. L. Kyle, D. V. Hoyt, and J. R. Hickey. A review of the nimbus-7 erb solar dataset. *Solar Physics*, 152 :9, 1994.
- Kenneth R. Lang. *Sun, Earth and Sky*. Springer, second edition edition, 2006.
- J. Lean. Variations in the sun's radiative output. *Reviews of geophysics*, 29(4) :505–535, 1991.
- J. Lean. Evolution of the sun's spectral irradiance since the maunder minimum. *Geophysical Research Letters*, 27 :2425–2428, 2000.
- J. Lean and D. Rind. Earth's response to a variable sun. *Science*, 292(5515) :234–236, 2002.
- J. Lean, J. Cook, W. Marquette, and A. Johannesson. Magnetic sources of the solar irradiance cycle. *Astrophysical Journal*, 492 :390–401, 1998.
- J. Lean, G. Rottman, J. W. Harder, and G. Kopp. Sorce contribution to new understanding of global change and solar variability. *Solar Physics*, 230 :27–53, 2005.
- G. A. Meehl, J. M. Arblaster, K. Matthes, F. Sassi, and H. van Loon. Amplifying the pacific climate system response to a small 11-year solar cycle forcing. *Science*, 325 : 1114–1118, 2009.
- R. Muncaster, M.S. Bourqui, S. Chabrilat, S. Viscard, S. Melo, and P. Charbonneau. Modelling the effects of short-term solar variability on stratospheric chemistry. *Atmos. Chem. Phys.*, May 2011. submitted.

- L. Oster. Solar irradiance variations. ii. - analysis of the extreme ultraviolet measurements onboard the atmosphere explorer e satellite. *Journal of Geophysical Research*, 88 :9037–9052, 1983.
- P. Pilewski, G. Rottman, and E. Richard. An overview of the disposition of solar radiation in the lower atmosphere : connections to the sorce mission and climate change. *Solar Physics*, 230, 2005.
- D. Rind. The sun’s role in climate variations. *Science*, 296 :673, 2002.
- G. Rottman, T. Woods, M. Snow, and G. de Toma. The solar cycle variation in ultraviolet irradiance. *Advances in space research*, 27(12) :1927–1932, 2001.
- G. Rottman, J. W. Harder, J. Fontenla, T. Woods, O. R. White, and G. M. Lawrence. The spectral irradiance monitor (sim) : early observations. *Solar Physics*, 230 :205–224, 2005.
- G. J. Rottman. Observations of solar uv and euv variability. *Advances in space research*, 8(7) :53–66, 1988.
- G. J. Rottman, T. N. Woods, and T. P. Sparn. Solar stellar irradiance comparison experiment 1 : 1. instrument design and calibration. *Journal of Geophysical Research*, 98 : 10667–10678, 1993.
- K. Scherer, H. Fichtner, T. Borrmann, J. Beer, L. Desorgher, E. Flükiger, H.-J. Fahr, S. E. S. Ferreira, U. W. Langner, M. S. Potgieter, B. Heber, N. J. Masarik, J. ans Shaviv, and J. Veizer. Interstellar-terrestrial relations : Variable cosmic environments, the dynamic heliosphere, and their imprints on terrestrial achives and climate. *Space Sci. Rev.*, 127 :327–465, 2006.
- J. Skupin, S. Noël, Mé W. Wuttke, M. Gottwald, H. Bovensmann adn M. Weber, and J. P. Burrows. Sciamachy solar irradiance observation in the spectral range from 240 to 2380 nm. *Advances in space research*, 35 :370–375, 2005.

- S. K. Solanki, N. A. Krinova, and T. Wenzler. Irradiance models. *Advances in space research*, 35 :376, 2005.
- S.K. Solanki and Y.C. Unruh. A model of the wavelength dependance of solar irradiance variations. *Astronomy and Astrophysics*, 329 :747–753, 1998.
- K. Tapping, D. Boteler, P. Charbonneau, A. Crouch, A. Manson, and H. Paquette. Solar magnetic activity and total solar irradiance since the maunder minimum. *Solar Physics*, 246 :309–326, 2007.
- G. E. Thomas, C. A. Barth, E. R. Hansen, C. W. Hord, G. M. Lawrence, G. H. Mount, G. J. Rottman, D. W. Rusch, A. I. Stewart, and R. J. Thomas. Scientific objectives of the solar mesosphere explorer mission. *Pure and applied geophysics*, 118(1-2) : 591–615, 1980.
- G. Thuillier, M. Hersé, P. C. Simon, D. Labs, H. Mandel, and D. Gillotay. Observation of the uv solar spectral irradiance between 200 and 350 nm during the atlas 1 mission by the solspec spectrometer. *Solar Physics*, 171 :283–302, 1997.
- G. Thuillier, M. Hersé, P. C. Simon, D. Labs, H. Mandel, D. Gillotay, and T. Foujols. The visible solar spectral irradiance from 350 to 850 nm as measured by the solspec spectrometer during the atlas 1 mission. *Solar Physics*, 177 :41–61, 1998.
- G. Thuillier, M. Hersé, D. Labs, T. Foujols, W. Peetermans, D. Gillotay, P. C. Simon, and H. Mandel. The solar spectral irradiance from 200 to 2400 nm as measured by the solspec spectrometer from the atlas and eureca missions. *Solar Physics*, 214 :1–22, 2003a.
- G. Thuillier, A. Joukoff, and W. Schmutz. The picard mission. *International Solar Cycle Studies (ISCS) Symposium, 23 - 28 June 2003, Tatranská Lomnica, Slovak Republic. Ed. : A. Wilson. ESA SP-535, Noordwijk : ESA Publications Division*, pages 251–257, 2003b.

- Y. C. Unruh, N. A. Krinova, S. K. Solanki, J. W. Harder, and G. Kopp. Spectral irradiance variations : comparison between observations and the satire model on solar rotation time scales. *Astronomy and Astrophysics*, 486 :311–323, 2008.
- M. Weber, J. P. Burrows, and R. P. Cebula. Gome solar uv/vis irradiance measurements between 1995 and 1997 - first results on proxy solar activity study. *Solar Physics*, 177 :63–77, 1998.
- T. Wenzler, S. K. Solanki, N. A. Krinova, and C. Fröhlich. Reconstruction of solar uv irradiance variations in cycles 21-23 based on surface magnetic fields. *Astronomy and Astrophysics*, 460 :583–595, 2006.
- T. M. L. Wigley and S. C. B. Raper. Climatic change due to solar irradiance changes. *Geophysical Research Letters*, 17(12) :2169–2172, 1990.
- R. C. Willson and H. S. Hudson. Solar luminosity variations in solar cycle 21. *Nature*, 332 :810, 1988.
- R. C. Willson and H. S. Hudson. The sun’s luminosity over a complete solar cycle. *Nature*, 351 :42, 1991.
- R. C. Willson and A. V. Mordvinov. Secular total solar irradiance trend during solar cycles 21-23. *Geophysical Research Letters*, 30 :1199, 2003.
- R. C. Willson, S. Gulkis, M. Janssen, H. S. Hudson, and G. A. Chapman. Observations of solar irradiance variability. *Science*, 211 :700–702, 1981.
- Thomas N. Woods, Francis G. Eparvier, Scott M. Bailey, Phillip C. Chamberlin, Judith Lean, Gary J. Rottman, Stanley C. Solomon, W. Kent Tobiska, and Donald L. Wooldraska. Solar euv experiment (see) : Misson overview and first results. *Journal of Geophysical Research*, 110 :A01312, 2005.

Annexe I

Optimisation des paramètres à l'aide d'un algorithme génétique

I.1 Fonctionnement de l'algorithme génétique

Les algorithmes génétiques offrent une solution aux problèmes d'optimisation multimodaux étant trop complexes pour les algorithmes classiques de moindres carrés par méthode du gradient. En effet, en utilisant une méthode analogue à la sélection naturelle, ils permettent d'«évoluer» un certain nombre de paramètres à l'intérieur d'un intervalle de valeurs réalistes en maximisant une mesure de correspondance entre les données modélisées et les données à reproduire. La présente section décrit plus en détail le fonctionnement de l'algorithme PIKAIA tel que présenté par Charbonneau (2002) et Charbonneau and Knapp (1995).

L'algorithme peut accepter un maximum de 32 paramètres libres à optimiser. Dans le cas présent, entre 2 et 8 paramètres ont été optimisés simultanément. Ces derniers sont des nombres entre 0 et 1 ; la conversion en unités appropriées au problème se fait dans une fonction externe qui calcule également la quantité qui mesure la qualité de l'ajustement, appelée f , qui sera définie plus loin.

Une population de modèles dont les valeurs des paramètres sont définis aléatoirement par l'algorithme doit avoir un nombre d'individus préalablement spécifié par l'utilisateur ; cette quantité est fixée à 50 dans tous les cas explorés pour le modèle d'irradiance spectrale.

La première étape de l'exécution consiste à calculer les résultats de chaque modèle de la population dont les paramètres à optimiser ont été déterminés aléatoirement. La majeure partie du temps de calcul associé à l'exécution de l'algorithme est consacrée à cette opération. Pour chaque séquence temporelle produite avec les paramètres aléatoires, on calcule la somme des carrés des différences journalières lissées sur un nombre ajustable de jours comme l'indique l'équation I.1 qui est décrite plus en détail aux chapitres 1 et

2.

$$\chi_S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{S} - \bar{S}_{obs})^2}{v[\max(\bar{S}_{obs}) - \min(\bar{S}_{obs})]^2} \quad (\text{I.1})$$

Cette quantité est précisément celle qui doit être minimisée pour que le modèle reproduise le plus fidèlement possible les valeurs observées. Toutefois, l'algorithme est conçu pour maximiser une quantité ; il est donc nécessaire de définir une variable qui est dépendante de χ_S^2 qui sera maximale quand χ_S^2 sera minimale. Dans le cas présent, on choisit

$$f = \frac{v}{\chi_S^2} \quad (\text{I.2})$$

où $v = N - n$ est le nombre de degrés de liberté, N étant le nombre de jours sur lequel s'étend la comparaison et n étant le nombre de paramètres.

L'étape subséquente consiste à générer un nouveau bassin d'ensembles de paramètres. L'analogie génétique s'applique particulièrement à ce processus, qui consiste à encoder les paramètres sous forme d'une chaîne de caractères, qui est l'équivalent de l'ADN dans l'analogie génétique. Chaque groupe de paramètres associé à un modèle donné sera encodé comme une unique chaîne de caractères, qui contiendra donc toute l'information utile sur le modèle. Par la suite, ces chaînes sont utilisées pour produire de nouveaux individus qui remplaceront leurs parents dans la population. Pour ce faire, deux chaînes sont sélectionnées au hasard, mais selon une probabilité d'autant plus grande que la mesure χ_S^2 leur étant associée est faible. Donc, plus un modèle a des paramètres lui permettant de bien reproduire les observations, plus il a de chance d'être sélectionné pour se «reproduire». Par la suite, les deux chaînes contenant les informations sur les paramètres subissent des opérations visant à générer deux nouveaux ensembles de paramètres. Plus précisément, certains segments sont échangés d'une chaîne à l'autre et certains caractères subissent une mutation aléatoire. Ce processus se répète jusqu'à ce qu'un nombre d'individus formant une nouvelle population ait été généré. Puisque les ensembles de paramètres correspondant le mieux aux données observées ont plus de chances de transmettre leurs gènes, les paramètres optimaux sont évolués continuellement jusqu'à ce que l'accord avec les observations soit optimal. Il est toutefois nécessaire de fixer préalablement un nombre de générations durant lequel l'algorithme

sera exécuté, qui doit être suffisamment grand pour permettre la convergence vers des valeurs de paramètres optimales.

I.2 Corrections sur le modèle de l'irradiance spectrale

Le défaut principal des reconstructions produites avec le modèle sous sa forme originale, mis à part leur niveau moyen décalé par rapport à celui des observations, est son incapacité à produire un niveau de variabilité aussi élevé que celui observé entre les maxima des cycles 22 et 23. Cette amplitude trop faible provient vraisemblablement d'une sous-estimation du contraste des facules, donc, indirectement, d'une sous-estimation de leur température.

En effet, le contraste des facules est extrêmement difficile à contraindre par des observations, leur taille très faible exigeant des images à très haute résolution. De plus, les approximations utilisées dans les modèles d'atmosphère de facules sont difficiles à justifier et la luminosité théorique qui en découle est, par conséquent, plutôt incertaine.

Puisque le contraste des facules constitue le paramètre le moins bien contraint du modèle, il est justifié de lui appliquer une correction de sorte à maximiser l'accord avec les observations. À cet effet, l'algorithme PIKAIA a été utilisé afin d'effectuer plusieurs expériences visant à déterminer le profil de température des facules permettant de reproduire le plus fidèlement possible l'amplitude des variations cycliques de l'irradiance spectrale.

Dans le même ordre d'idées, la dépendance sur la position angulaire sur le disque des facules a aussi été modifiée. La formule utilisée dans la version originale se base sur des étalonnages en lumière visible et sa contrepartie ultraviolette est très mal connue.

Enfin, des ajustements sur le niveau du Soleil inactif nécessaires pour égaler le niveau minimal des données de UARS ont également été appliqués. Cette correction vise simplement à compenser pour l'écart entre le spectre théorique utilisé et le spectre réel du Soleil au minimum d'activité.

La procédure a été utilisée sous diverses configurations. En premier lieu, cinq longueurs d'ondes différentes ont été sélectionnées afin d'optimiser à la fois les cinq cor-

rections sur l'irradiance du Soleil inactif ainsi que les paramètres décrivant un profil de température et une équation de contraste centre-bord faculaires corrigés. La correction sur le niveau du Soleil inactif consiste simplement à y ajouter une constante permettant une translation uniforme des valeurs journalières afin d'obtenir un niveau correspondant à celui des données. Le profil de température corrigé a tout d'abord été obtenu en appliquant une correction dépendant linéairement de la hauteur sur le profil P de Fontenla et al. (2009), à partir d'une hauteur de 0 km, les paramètres libres étant les deux coefficients du polynôme de premier degré. D'autres tentatives ont été effectuées en appliquant des corrections suivant des polynômes de degrés plus élevés, les paramètres libres étant encore une fois les coefficients polynomiaux. Simultanément, divers essais ont été effectués afin d'introduire une correction dépendant linéairement ou de façon quadratique de la longueur d'onde sur l'équation décrivant le contraste centre-bord des facules. Certaines tentatives ont aussi été effectuées indépendamment de la longueur d'onde dans le but de produire un contraste plus élevé au centre du disque tout en conservant la forme du profil près des bords. Les résultats de ces diverses expériences ont montré que la correction sur le Soleil inactif convergait vers les mêmes valeurs, sans exception, tandis que les paramètres décrivant le profil de température faculaire ou le contraste centre-bord étaient plus instables.

Il a finalement été plus avantageux d'appliquer la procédure d'optimisation à une seule longueur d'onde à la fois et à simplement déterminer deux paramètres, soit la correction sur le flux du Soleil inactif et une température associée à la hauteur de formation des facules, et ce de façon totalement indépendante du modèle de Fontenla et al. (2009). La dépendance sur la position angulaire sur le disque des facules a été modifiée de plusieurs façon afin de rendre compte de leur contraste non nul au centre du disque. Le facteur $(\mu^{-1} - 1)$ a tout d'abord été éliminé puisqu'il tend vers zéro au centre du disque, puis le facteur représentant le noircissement centre-bord bolométrique, soit $(3\mu + 2)$, a été remplacé par sa valeur maximale de 5.

La forme optimale est donc donnée par :

$$\frac{\Delta S_{fac}}{S_Q} = \frac{5}{2} \mu A_{fac} \alpha_{fac} \quad (\text{I.3})$$

Les corrections appliquées sur le niveau de luminosité de la photosphère non magnétique ont, quant à elles, convergé vers les mêmes valeurs que pour tous les tests précédents.

Enfin, le profil de température obtenu reproduit assez fidèlement celui de Fontenla et al. (2009), bien que quelques différences s'y trouvent, en particulier une augmentation de température entre des hauteurs de 110 à 140 km, qui est visible peu importe la forme de la dépendance sur μ adoptée. Ce profil optimal est présenté au chapitre 2.