

N° d'ordre 3070

Université des Sciences et Technologies de Lille

## Thèse de doctorat

*Présentée par*

**Dominique Masserot**

*Pour obtenir le titre de*

Docteur de l'université

*Spécialité*

Instrumentation et Analyses Avancées

# **Spectroradiométrie du rayonnement solaire UV : Mesures et Analyses**

Soutenue le 19 décembre 2001 devant le jury composé de

Mr J.L. Bocquet	Professeur à l'EUDIL, USTL	Directeur de thèse
Mme C. Brogniez	Professeur au LOA, USTL	Codirecteur de thèse
Mr A. Chiron de la Casinière	Maître de conférence à l'UJF, Grenoble	Codirecteur de thèse
Mme J. Lenoble	Professeur au LOA, USTL	Codirecteur de thèse
Mme Cachorro Victoria	Professeur au GOA, Université de Valladolid, Espagne.	Rapporteur
Mr. R. Philipona	Directeur de recherche au PMOD/WRC, Davos, Suisse	Rapporteur

Laboratoire de Métrologie des UV

EUDIL – USTL

Université des Sciences et Technologies de Lille

Fr-59655 Villeneuve d'Ascq Cedex

## Table des matières

<b>Table des matières .....</b>	<b>1</b>
<b>Table des figures et tableaux .....</b>	<b>3</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>6</b>
<b>Instruments de mesures et modélisation de l'éclairement solaire UV au sol.....</b>	<b>9</b>
<b>1.1 Les spectroradiomètres SPUV.....</b>	<b>11</b>
1.1.1 Dispersion du rayonnement par le monochromateur HD10.....	14
1.1.2 La détection du rayonnement par le photomultiplicateur.....	22
1.1.3 La réception de l'éclairement incident par le diffuseur.....	32
1.1.4 Stabilisation en température .....	35
1.1.5 La configuration d'acquisition .....	35
1.1.6 L'automatisation des acquisitions .....	36
1.1.7 Conclusion.....	38
<b>1.2 Les mesures radiométriques.....</b>	<b>41</b>
1.2.1 Le radiomètre YES-UVB-1.....	42
1.2.2 Le radiomètre SCINTEC UV S AE T.....	45
1.2.3 Influence des paramètres atmosphériques sur les mesures radiométriques. ....	46
<b>1.3 Modélisation du spectre solaire UV .....</b>	<b>50</b>
<b>La Qualité des mesures spectroradiométriques .....</b>	<b>53</b>
<b>2.1 L'étalonnage.....</b>	<b>55</b>
2.1.1 Incertitudes d'étalonnage. Utilisation des lampes d'étalonnage. ....	55
2.1.2 Erreur systématique lors de l'étalonnage. Mesures lors de l'étalonnage. ....	61
2.1.3 Conclusion. La sensibilité spectrale et son évolution. ....	63

<b>2.2 Le contrôle quotidien des mesures et les interventions .....</b>	<b>66</b>
<b>2.3 Les corrections des imperfections instrumentales.....</b>	<b>71</b>
2.3.1 Correction du bruit de fond et de la lumière parasite.....	71
2.3.2 Correction des erreurs de linéarité .....	73
2.3.3 Correction de la réponse angulaire.....	73
2.3.4 Correction des décalages en longueur d'onde. ....	77
<b>2.4 Contrôle final des données.....</b>	<b>80</b>
2.4.1 La validité des spectres acquis. ....	80
2.4.2 Contrôle de la stabilité du spectroradiomètre.....	81
2.4.3 Contrôle de la cohérence des mesures.....	84
<b>2.5 Conclusion .....</b>	<b>91</b>
 <b>Mesures et Analyses .....</b>	 <b>92</b>
<b>3.1 Introduction. Les sites de mesures .....</b>	<b>93</b>
<b>3.2 Détermination d'un albédo effectif de sol. ....</b>	<b>97</b>
3.2.1 Influence de l'albédo sur les éclairements spectriques UV et albédo effectif .....	97
3.2.2 Briançon 1998 : Albédo effectif à partir des éclairements érythémaux .....	99
3.2.3 CUVRA 1999 : albédo effectif par comparaison mesures / modèles .....	107
<b>3.3 Détermination de la colonne totale d'ozone. ....</b>	<b>112</b>
 <b>Conclusion .....</b>	 <b>118</b>
 <b>Références bibliographiques.....</b>	 <b>122</b>
 <b>Annexes.....</b>	 <b>126</b>

# **Introduction**

Le rayonnement solaire atteignant le sol a un impact important sur le monde du vivant (animal et végétal) ; ses effets sont d'autant plus importants que les photons incidents sont plus énergétiques (courtes longueurs d'onde). Le rayonnement UV solaire atteignant le sol ne représente environ que 5% du rayonnement solaire total mais à ces courtes longueurs d'onde, son efficacité biologique est importante. L'ozone, situé pour 90% dans la stratosphère entre 15 et 40 km d'altitude, constitue une véritable barrière du rayonnement UV ; ce composant de l'atmosphère absorbe totalement les UV C (longueurs d'ondes inférieures à 280 nm), filtre les UV B (de 280 à 320 nm), et laisse passer totalement les UV A (de 320 à 400 nm). Cet élément nous protège des rayonnements solaires fortement énergétiques. Depuis la découverte au niveau du pôle sud, d'un trou d'ozone lors du printemps austral par Farman et al [8], et dans une moindre mesure un second au-dessus de l'Arctique (Bojkov et al. [6]), une diminution de la quantité d'ozone stratosphérique est observée aux latitudes moyennes induisant une augmentation du rayonnement UV B (Madronich et al.[16]).

Plusieurs stations de mesures du rayonnement UV solaire se sont développées et se sont organisées en réseaux de surveillance de l'évolution de ce rayonnement. En parallèle, la modélisation s'est ajoutée aux mesures avec pour principaux objectifs d'étudier la sensibilité du rayonnement UV aux paramètres atmosphériques et anticiper l'évolution de l'intensité de ce rayonnement. Le LOA a ainsi apporté sa contribution à la modélisation dès le début des années 1990. Puis, en collaboration avec le Laboratoire de Métrologie des UV, un spectroradiomètre a été développé et présenté par Wang [32], puis par Pachart [23]. C'est dans la continuité de leurs travaux qu'il m'a été proposé de pérenniser le spectroradiomètre et de développer l'automatisation des acquisitions afin de contribuer à la banque de spectres UV du programme européen SUVDAMA (Scientific UV Data Management). Par ailleurs, dans le cadre du projet européen CUVRA (Characterization of UV Radiation field in the Alps), nous avons développé un second spectroradiomètre UV avec le financement du CEMBREU pour une installation en milieu alpin. Nous désignons par SPUV02 ce nouveau spectroradiomètre.

Afin de s'assurer de la validité des mesures spectroradiométriques, des instruments auxiliaires tels que des radiomètres sont placés à côté de chaque spectroradiomètre ; l'ensemble de ces instruments sur un même site de mesure constitue

une station de mesure. Nous utilisons également des modèles d'éclairements UV pour évaluer la cohérence des mesures ainsi que pour analyser les paramètres qui modulent ces éclairements. Nous désignons par « outils » l'ensemble des instruments et de la modélisation qui nous sont utiles à notre étude. Nous consacrons notre premier chapitre à la présentation de ces outils.

L'intervention la plus sensible sur les spectroradiomètres est l'étalonnage puisqu'il constitue la base de nos mesures en définissant la sensibilité de l'instrument. Il faut alors apporter un soin très particulier et de qualité à cette opération. Nous avons alors établi des procédures pour garantir la reproductibilité de cette opération ainsi que pour permettre un meilleur suivi de l'évolution de la sensibilité.

L'automatisation des acquisitions a engendré un flux de données qu'il nous faut gérer et contrôler pour garantir la qualité des nos mesures. Nous avons alors structuré nos acquisitions et développé des procédures et des moyens de contrôles de ces données. La qualité des mesures étant primordiale, nous avons également mis en place des techniques de correction des imperfections instrumentales. Tous ces points ayant pour objectif la qualité des mesures, nous les avons regroupés dans le second chapitre de ce mémoire.

Enfin, dans notre troisième chapitre, étant en possession de mesures fiables, nous présentons les sites de mesures et débutons l'exploitation des mesures.

# Conclusion

Au cours de cette thèse, nous sommes parvenus à mettre en place des acquisitions automatisées des éclairiments spectriques UV à Villeneuve d'Ascq dans le nord de la France, et Villard Saint Pancrace dans les Alpes françaises du sud. Ces stations, pouvant initier un réseau français, vont ainsi permettre d'étudier l'évolution du rayonnement solaire UV au sol et leurs paramètres influents.

Le spectroradiomètre SPUV01, développé le premier par l'USTL et présenté par Wang [32] et Pachart [23], nous a servi de base au développement de ces stations et de modèle pour le second spectroradiomètre SPUV02. Ces deux instruments mesurent périodiquement toutes les  $\frac{1}{2}$  heures les éclairiments solaires sur l'intervalle de longueur d'onde [275 nm ; 450 nm] au pas de 0.5 nm ; la largeur à mi-hauteur de la fonction fente (FWHM) est égale à 0.6 nm et 0.75 nm respectivement pour les instruments SPUV01 et SPUV02. De part leur nature compacte, ces deux spectroradiomètres ne satisfont pas intrinsèquement au cahier des charges défini par le NDSC (Cf. tableau 1.1b) ; la justesse en longueur est trop incertaine et la fonction fente est trop intense sur ses « ailes » (à 6 fois la FWHM du centre). De plus la réponse angulaire des diffuseurs n'est pas suffisamment cosinusoïdale. Ceci est particulièrement incontestable pour le diffuseur en téflon du spectroradiomètre SPUV02 ; malheureusement, nous n'avons pas réussi à nous procurer de l'opaline de quartz, le matériau du diffuseur du spectroradiomètre SPUV01.

Nous avons cependant atténué ces imperfections instrumentales grâce à des corrections adaptées. En modélisant les éclairiments spectriques pour un ciel sans nuages et dans des conditions standard du site et pour différents angles zénithaux solaires, nous avons établi une correction systématique et facile de la réponse angulaire. Basé sur une corrélation des raies du spectre solaire, le programme ShicRivm, développé par H. Slaper et al. [27], nous permet de corriger les décalages en longueur d'onde et d'améliorer la justesse en longueur d'onde afin de satisfaire le cahier des charges du NDSC.

La qualité des mesures spectroradiométriques ne dépend pas uniquement de l'instrument. La justesse des éclairiments spectriques est avant tout liée à la qualité de l'étalonnage. Nous avons développé une procédure d'étalonnage de nos spectroradiomètres et décrit les protocoles d'utilisation afin de veiller à la reproductibilité de cette opération, sa traçabilité et de faciliter le suivi de la sensibilité spectrale.



Suite à des dysfonctionnements instrumentaux, nous avons aussi amélioré la qualité de nos mesures en créant un contrôle périodique des points sensibles (Température de fonctionnement, calibrage en longueur d'onde, décalage temporel). En ayant développé des outils pour faciliter ces contrôles, nous avons à assurer un bon fonctionnement des instruments sur les sites de mesures. Il nous a fallu aussi développer des outils de traitement automatisé et de contrôle du flux de données générées par l'acquisition automatisée des deux stations de mesures et c'est un énorme travail de programmation informatique qui a été fourni. Cette opération de traitement des données, de leur contrôle et leur validation s'effectue à posteriori, au laboratoire. Afin de ne pas constater trop tard des dérives, nous recommandons de traiter les données issues de la station au minimum hebdomadairement.

De l'ensemble des mesures que nous possédons, nous nous sommes intéressées uniquement à deux analyses ponctuelles de campagnes de mesures, et à la colonne totale d'ozone au cours de l'année 2000. Nous avons ainsi déterminé un albédo effectif de sol variant au cours de la campagne de mesures réalisée à Briançon en février 1998. A partir des éclaircissements érythémaux, nous avons évalué l'albédo effectif à une valeur voisine de 0.35 en début de campagne. Puis, le fort ensoleillement faisant fondre la neige, l'albédo effectif diminue pour atteindre 0.20. L'événement le plus remarquable de cette campagne est la légère chute de neige ; nous constatons alors que l'albédo effectif du sol recroît rapidement à une valeur voisine de 0.45

En mars 1999, le spectroradiomètre SPUV02 présentant des imperfections aux courtes longueurs d'onde, nous avons essayé de déterminer l'albédo effectif du sol dans les environs de Garmisch-Partenkirchen, par une méthode différente utilisant la pente du rapport mesure / modèle. A cause des oscillations importantes dans ce rapport, nos résultats ne sont pas encourageants.

Par une méthode similaire à celle décrite par Stamnes et al. [28], nous avons évalué la colonne totale d'ozone sur les sites de mesures à partir des éclaircissements spectraux du rayonnement global. En comparant ces mesures à celle de l'instrument satellitaire TOMS, nous avons un accord à  $12 \pm 12$  DU des moyennes quotidiennes. Il serait intéressant d'approfondir cette comparaison avec des mesures TOMS pour le site de mesure (interpolation sur les pixels) et au moment du passage du satellite.

Les stations sont maintenant intégrées au réseau de surveillance des changements stratosphériques du NDSC et continuent à fournir des spectres à la banque de données européennes (EDUCE). L'ensemble des données recueillies depuis près de deux ans, et

celle à venir permettront de prolonger cette étude et de poursuivre l'analyse des différents paramètres modulant l'UV. Elles sont également disponibles pour des applications biologiques et médicales.

## Références bibliographiques

- [1] Bass A.M., Paur R.J., *The Ultraviolet Cross-sections of Ozone : I. The measurements*, Proceedings of the quadriennial Ozone Symposium, Atmospheric Ozone, pp 606-610, Halkidiki, Greece, 3-7 Sept 1984, ISBN 90 277 1942 X, 1985
- [2] Berger D.S., *The sunburning ultraviolet meter : Design and performance*, Photochemistry Photobiology, Vol 24, pp 587-593, 1976.
- [3] Bernhard G., Seckmeyer G., *Uncertainty of measurements of spectral solar UV irradiance*, Journal of Geophysical Research, Vol 104, No D12, pp 14,321-14,345, June 27, 1999
- [4] Blumthaler M., Ambach W., *Solar UVB - albedo of various surfaces*, Photochem. Photobiol., Vol. 48, pp 85-88, 1988
- [5] Bodhaine B.A., Dutton E.G., McKenzie R.L., Johnston V., *Calibrating Broadband UV Instruments : Ozone and Solar Zenith Angle dependence*, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 15, pp 916-926, August 1998.
- [6] Bojkov R.D., Zerefos C.S., Balis D.S., Ziomas I.C., Bais A.F., *Record low total ozone during northern winters of 1992 and 1993*, Geophys. Res. Lett., Vol. 20, pp 1651-1654 , 1993.
- [7] Bukowski I., *Modélisation de l'énergie ultraviolette solaire*, Rapport de DEA Laser, Molécules et Rayonnement Atmosphérique, USTL, 1997.
- [8] Farman J.C., Gardiner B.G., Shanklin J.D., *Large losses of ozone in Antartica reveal seasonal ClO<sub>x</sub>/NO<sub>x</sub> interaction*, Nature, 315, pp 207-210, 1985.
- [9] Gardiner B.G., Kirsch P.J., *Intercomparison of Ultraviolet Spectroradiometers, Nea Michaniona, 4-5 July 1997*, Report to the Commission of the European Communities, ENV4-CT95-0056, Environnement and Climate Programme.

- [10] Gröbner J., Albold A., Blumthaler M., Cabot T., De la Casinière A., Lenoble J., Martin T., Masserot D., Müller M., Phillipona R., Pichler T., Pougatch E., Rengarajan G., Schmucki D., Seckmeyer G., Sergent C., Touré M.L., Weihs P., Variability of spectral solar ultraviolet irradiance in a Alpine environment, *Journal of Geophysical Research*, Vol.105, No D22, pp 26 991-27 003, November 27, 2000.
- [11] Hamamatsu, *Photomultiplier tubes*, Cat. No TPMO 0002E4, 1995.
- [12] Huber M., Blumthaler M., Ambach W., *A method for determining the wavelength shift for measurments of solar UV-radiation*, SPIE, Vol. 2049 Atmospheric Radiation, 1993.
- [13] Kostkowski H.J., *Reliable spectroradiometry*, 609 pp, spectroradiometry Consult., La Plata, MD, 1997.
- [14] Lenoble J., *Modelling the influence of snow reflectance on Ultraviolet irradiance for cloudless sky*, *Applied Optics*, Vol 37, No 12, pp 2441-2447, April 20, 1998
- [15] Lesczynski K., Jokela K., Yliqnttila L., Visuri R., Blumthaler M., *Report of the WMO/STUK intercomparison of erythemally-weighted solar UV radiometers* (Spring/summer 1995,Helsinki,Finland), 112, WMO-TD No. 781
- [16] Madronich S., McKenzie R.L., Björn L.O., Caldwell M.M., *Changes in biologically active ultraviolet radiation reaching the Earth's surface*. Environmental effects of Ozone depletion : 1998. UNEP, Nairobi.
- [17] Masserot D., *Spectroradiométrie du rayonnement Ultraviolet*, Rapport de DEA Instrumentation et Analyses Avancées, USTL, 1996.
- [18] Mc Clatchey, R.A., R.W. Fenn, J.E.A. Selby, F.E. Volz, J.S. Garing, *Optical properties of the Atmosphere (revised)*. AFCRL-71-0279, Environmental research papers, No 354, 85pp, 1971.
- [19] Mc Kinley A.F., Diffey B.L., A reference actio spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin, *Journal CIE*, J6.1, pp 17-22, 1987.
- [20] Mc Peters R.D., Bhartia P.K., Krueger A.J., Herman J.R., Wellmeyer C.G., Seftor C.J., Jaross G., Torres O., Moy L., Labow G., Byerly W., Taylor S.L., Swissler T., Cebula R., *Earth Probe Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User's Guide*, NASA Technical Publication, 1998-2006895, 64pp., 1998.

- [21] Pachart E., Lenoble J., Brogniez C., Masserot D., Bocquet J.-L., *Ultraviolet spectral irradiances in the French Alps : Results of two campaigns*, Journal of Geophysical Research, Vol.104, No D14, pp 16777-16784, July 27, 1999.
- [22] Pachart E., Lenoble J., Brogniez C., Masserot D., Bocquet J.-L., *Consistency tests on UV spectral irradiance measurements using modeling and a broadband instrument*, Journal of Geophysical Research, Vol.105, No D4, pp 4851-4856, February 27, 2000.
- [23] Pachart E., *Mesures et modélisations du rayonnement ultraviolet solaire au sol*, Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France. 1997
- [24] Paur R.J., Bass A.M., *The Ultraviolet Cross-sections of Ozone : II. Results and temperature dependence*, Proceedings of the quadriennial Ozone Symposium, Atmospheric Ozone, pp 611-616, Halkidiki, Greece, 3-7 Sept 1984, ISBN 90 277 1942 X, 1985
- [25] Scintec, *UV Standard Series : Dual-band sensors*, Notice technique.
- [26] Seckmeyer G., Final Report of SUVDAMA, European contract No. ENV4-CT95-0177, 20 september 1999.
- [27] Slaper H., Reinen H.A.J.M., Blumthaler M., Huber M., Kuik F., *Comparing ground-level spectrally resolved solar UV measurements using various instruments : A technique resolving effects of wavelength shift and slit width*, Geophysical Research Letter, Vol. 22, No. 20, pages 2721-2724, October 15, 1995.
- [28] Stamnes K., Slusser J., Bowen M., *Derivation of total abundance and clouds effect from spectral irradiance measurements*, Applied Optics, Vol. 30, No 30, pp 4418-4426, 20 October 1991.
- [29] UVB-1 Ultraviolet pyranometer, Installation and User Guide, version 2.0, Yankee Environmental Systems, Inc., 1995.
- [30] Van Weele M., Martin T.J., Blumthaler M., Brogniez C., Den Outer P.N., Engelsen O., Lenoble J., Mayer B., Pfister G., Ruggaber A., Walravens B., Weihs P., Gardiner B.G., Gillotay D., Haferl D., Kylling A., Seckmeyer G., Wauben W.M.F., *From model intercomparison toward benchmark UV spectra for six real atmospheric cases*, Journal of Geophysical Research, Vol.105, No D4, pp 4915-4925, February 27, 2000.
- [31] Walker J.H., Saunders R.D., Jackson J.K., Mc Sparron D.A., *Spectral irradiance calibration*, NBS Special publication 250-20, 102 pp, Gaithersburg, MD, 1987.

- [32] Wang P., *Modélisation et mesure du rayonnement solaire ultraviolet*, Thèse de Doctorat, No. 1484, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France. 1995.
- [33] Weihs P., Lenoble J., Blumthaler M., Martin T., Seckmeyer G., Philipona R., De la Casiniere A., Sergent C., Gröbner J., Cabot T., Masserot D., Pichler T., Pougatch E., Rengarajan G., Schmucki D., Simic S., *Modeling the effect of an inhomogeneous surface albedo on incident UV radiation in mountainous terrain: determination of an effective surface albedo*, *Geophys. Res. Lett.* Vol. 28, No. 16, p. 3111, 16 August 2001.
- [34] YES, Yankee Environmental Systems, *UVB-1 Ultraviolet Pyranometer, Installation and User Guide*, Version 2.0, 1995.