

Ozone stratosphérique, rayonnement ultraviolet et changement climatique

Olivier Boucher

Met Office Hadley Centre FitzRoy Road
Met Office EX1 3PB - Royaume-Uni

Résumé

Il est bien connu qu'une surexposition au rayonnement ultraviolet comporte un certain nombre de risques pour la santé humaine, tels qu'un risque accru de cataractes et de cancers de la peau. À l'heure où le changement climatique est parfois pris comme le bouc émissaire de tous nos problèmes environnementaux, qu'en est-il de la couche d'ozone stratosphérique et des autres facteurs qui contrôlent le rayonnement ultraviolet à la surface de la planète ? Les changements attendus de la composition chimique de l'atmosphère et du climat vont-ils augmenter ou au contraire diminuer le risque de cancer de la peau ? Cet article passe en revue les différents facteurs qui influencent le rayonnement ultraviolet et présente l'état de nos connaissances sur le sujet.

Abstract

Stratospheric ozone, ultraviolet radiation and climate change

It is well known that an overexposure to ultraviolet radiation is associated with a number of health risks such as an increased risk of cataracts and skin cancers. At a time when climate change is often blamed for all our environmental problems, what is the latest news about the stratospheric ozone layer and other factors controlling ultraviolet radiation at the surface of the Earth? Will the expected changes in the chemical composition of the atmosphere and changes in our climate increase or decrease the risk for skin cancer? This article investigates the role of the various factors influencing ultraviolet radiation and presents the latest knowledge on the subject.

Une surexposition au rayonnement ultraviolet peut entraîner des maladies de l'oeil et des cancers de la peau (Afsse, 2005 ; Who, 2006 ; Norval et al., 2007). Parmi ceux-ci, on distingue :
– le mélanome malin, le plus dangereux mais le moins courant des cancers de la peau ;
– le carcinome cutané spino-cellulaire, qui peut se développer rapidement et profondément dans la peau ;
– et le carcinome cutané baso-cellulaire, moins dangereux mais de loin le plus courant.

Les kératoses actiniques sont des lésions précancéreuses et ont aussi été associées au rayonnement ultraviolet. Bien que souvent bénignes, elles peuvent évoluer vers un carcinome cutané spino-cellulaire invasif. Le taux de prévalence des kératoses actiniques est relativement élevé dans la population blanche. Ce taux est estimé à 15 % chez les hommes et 6 % chez les femmes au Royaume-Uni (Memon et al., 2000) et des taux plus élevés ont été relevés aux États-Unis et en Australie. Il est difficile de quantifier exactement l'évolution du nombre de cas de carcinomes dans le monde, mais il semble que celui-ci augmente dans de nombreux endroits (de Gruijl et al., 2003). Les causes sont multiples et il est difficile pour les épidémiologistes de faire la part des choses. Comme on le verra plus loin, il est plus que probable que le rayonnement ultraviolet à la surface ait augmenté dans les dernières décennies. Mais il est clair aussi que les comportements humains ont fortement évolué, avec une augmentation des vacances au soleil, une augmentation des loisirs en plein air, des changements dans les habitudes vestimentaires, la démocratisation du bronzage en cabine,

mais aussi une prise de conscience des risques qui a entraîné une plus grande utilisation des mesures de protection (crème solaire, vêtements). Pour la Norvège, Bentham et Aase (1996) ont ainsi pu mettre en évidence une association entre incidence de cancers de la peau et niveau de revenus pour les années 1960, puis entre incidence de cancers de la peau et le nombre de vacances prises à l'étranger dans les années 1980. Par ailleurs, l'augmentation significative et continue de l'espérance de vie contribue à augmenter les doses de rayonnement ultraviolet reçu au cours de la vie et le risque de développer un cancer de la peau. De plus, les méthodes de surveillance et de détection des cancers ont évolué et les cas sont sans doute mieux recensés qu'ils ne l'étaient auparavant. Tous ces facteurs compliquent énormément la tâche des épidémiologistes qui cherchent à établir un lien entre climat et cancer de la peau. C'est pourquoi nous nous concentrons ici sur le premier maillon de cette chaîne, à savoir celui qui relie climat et composition chimique de l'atmosphère au rayonnement ultraviolet à la surface.

Le rayonnement ultraviolet

Compte tenu de la température des couches externes du soleil, l'énergie solaire est essentiellement rayonnée dans les domaines ultraviolet, visible et proche infrarouge. On se référera à l'article de Bessemoulin et Olivieri (2000) pour une description complète du rayonnement solaire, de sa propagation dans l'atmosphère et de sa mesure à la surface de la Terre. Le rayonnement électromagnétique est avant tout caractérisé par sa longueur d'onde (figure 1).

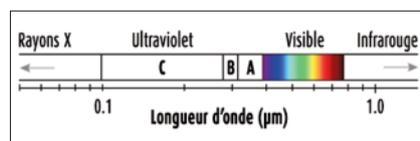


Figure 1 - Domaines spectraux en fonction de la longueur d'onde (mm).

Bien qu'il ne représente qu'une petite fraction de l'énergie totale, le rayonnement ultraviolet (UV) est celui qui nous intéresse plus particulièrement ici. On distingue :

- les UV-C de longueur d'onde de 100 à 280 nm ; ils sont très énergétiques, mais sont absorbés très haut dans l'atmosphère et n'arrivent pas à la surface terrestre ;
- les UV-B de longueur d'onde de 280 à 315 nm ; la quantité reçue à la surface de la Terre dépend de la quantité d'ozone stratosphérique mais peut-être modulée par la nébulosité, l'ozone troposphérique, les aérosols troposphériques et stratosphériques ;
- les UV-A de longueur d'onde de 315 à 400 nm ; ceux-ci sont peu absorbés par l'ozone et la quantité reçue dépend essentiellement de la nébulosité et de la concentrations en aérosols (troposphériques et stratosphériques).

La quantité d'UV-A et d'UV-B à la surface dépend également de l'altitude (il y a plus de rayonnement ultraviolet à la montagne qu'à un niveau de la mer), de la position du soleil dans le ciel (qui elle-même dépend de la saison et de l'heure dans la journée), et de la réflectivité de surface (les surfaces réfléchissantes comme la neige, certaines sortes de sable ou une mer agitée peuvent augmenter le rayonnement UV à la surface). La quantité d'UV reçue par une surface dépend aussi de son orientation. Selon la position du soleil dans le ciel, une surface horizontale (comme une tête dénudée ou une personne allongée au soleil sur une plage) peut recevoir plus ou moins de rayonnement qu'une surface verticale (comme un ouvrier travaillant dehors ou un randonneur).

Plus la longueur d'onde du rayonnement est courte, plus ce rayonnement est énergétique et donc dangereux pour la santé humaine. La figure 2 montre le **spectre d'action** du rayonnement UV-B et UV-

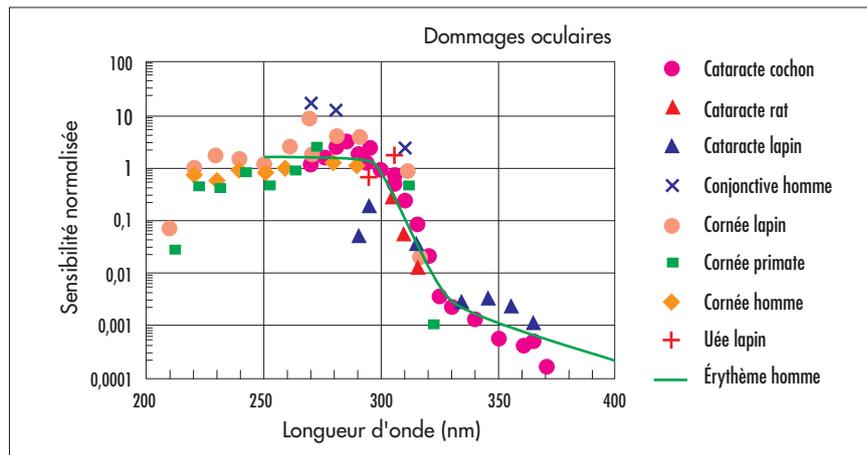
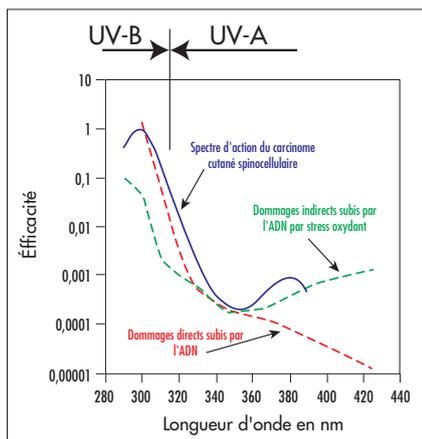


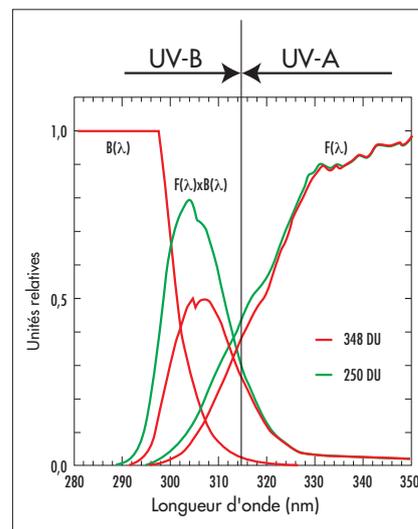
Figure 3 - Spectre d'action du rayonnement ultraviolet sur diverses maladies oculaires chez les mammifères et chez l'homme. Le spectre d'action érythémale est indiqué par un trait fin. D'après de Gruijl et al. (2003). Reproduit avec la permission de la Royal Society of Chemistry (RSC) au nom de l'European Society for Photobiology and the European Photochemistry Association.

A pour les carcinomes selon de Gruijl et al. (2003). En première approximation, le spectre d'action résulte de la superposition de deux spectres d'action du rayonnement UV sur l'ADN de la peau. L'efficacité du rayonnement est maximale entre 280 et 300 nm et décroît de manière exponentielle entre 300 et 340 nm. Une dose d'une unité d'UV à la longueur d'onde 300 nm a le même effet qu'une dose de 5 000 unités à la longueur d'onde 340 nm. On observe une variation similaire pour le spectre d'action du rayonnement UV sur les dommages oculaires (figure 3). Il convient donc de pondérer le spectre de rayonnement UV à la surface avec un spectre d'action pour prendre en compte de manière différenciée les différentes longueurs d'onde. On utilise généralement pour cela un spectre d'action typique pour la peau, appelé spectre d'action érythémale. Cela est illustré sur la figure 4 qui montre deux spectres de rayonnement UV, $F(\lambda)$, correspondant à deux valeurs différentes de la colonne d'ozone (348 et 250 unités Dobson), pondérés par ce spectre d'action érythémale, $B(\lambda)$. Bien que les deux spectres de rayonnement diffèrent peu sur le graphique, ils conduisent à des spectres de rayonnement pondérés très différents entre 290 et 320 nm, en raison de la

Figure 2 - Spectre d'action du rayonnement ultraviolet sur l'ADN (effet direct et indirect) et sur le carcinome cutané spinocellulaire (*squamous cell carcinoma, SCC*). Les trois courbes ont été normalisées pour coïncider autour de 350 nm. On peut remarquer que le spectre d'action sur le carcinome de la peau correspond plus ou moins au spectre d'action total sur l'ADN (enveloppe supérieure des courbes verte et rouge). D'après de Gruijl et al. (2003). Reproduit avec la permission de la Royal Society of Chemistry (RSC) au nom de l'European Society for Photobiology and the European Photochemistry Association.

forte dépendance spectrale du spectre d'action. On remarque le rôle prépondérant des UV-B, mais il est clair aussi que les UV-A ne peuvent pas être négligés pour autant. On définit la **fonction érythémale** comme l'intégrale sur le spectre ultraviolet du rayonnement à la surface pondéré par ce spectre d'action érythémale (Bessemoulin et Olivieri, 2000). Multipliée par un facteur arbitraire de 40, cette fonction érythémale fournit un **indice UV**, qui est facile d'utilisation, puisqu'il varie sur une échelle allant typiquement de 0 à 16, même si des valeurs encore plus élevées sont possibles. On peut associer une durée maximale d'exposition avant que ne survienne un coup de soleil pour chaque indice UV et chaque type de peau (Bessemoulin et Olivieri, 2000).

Figure 4 - Variation spectrale du rayonnement ultraviolet à la surface, $F(\lambda)$, du spectre d'action érythémale, $B(\lambda)$, et du produit de ces deux quantités pour deux colonnes d'ozone différentes (250 et 348 DU). D'après Madronich et al. (1998). (© Elsevier)



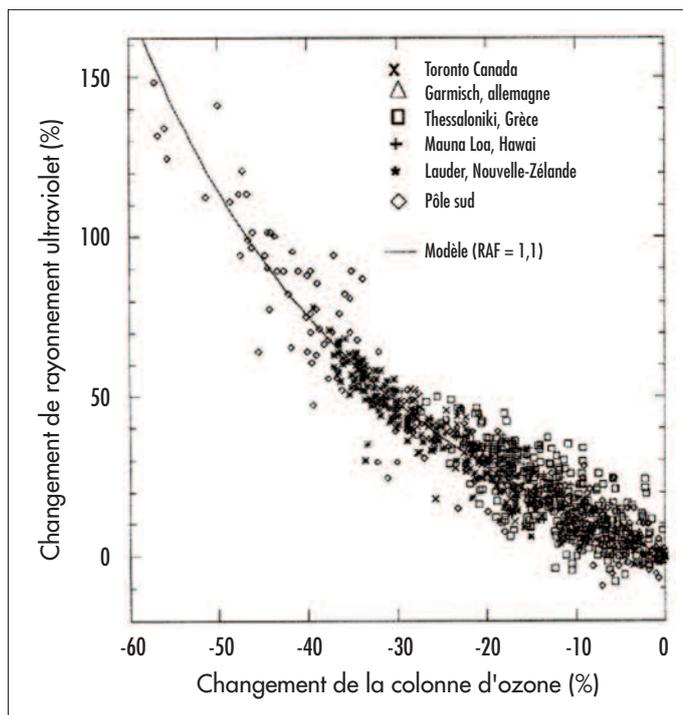
Unité Dobson

L'unité Dobson (Dobson Unit ou DU) est une unité utilisée en science de l'atmosphère pour mesurer la quantité d'un gaz trace intégrée sur la verticale. Une unité Dobson correspond à une hauteur de 0,01 mm de gaz aux conditions normales de température et de pression. Ramenée à la surface de la Terre, une couche d'ozone atmosphérique de 300 DU occuperait une épaisseur de 3 mm.

Évolution passée du rayonnement ultraviolet

La variation très rapide du spectre d'action érythémale avec la longueur d'onde fait qu'il est crucial de pouvoir effectuer une mesure précise du rayonnement UV et de sa variation avec la longueur d'onde. Il s'agit là d'une mesure difficile. Certains radiomètres, ayant une réponse spectrale proche de la courbe du spectre d'action érythémale, peuvent mesurer directement la fonction érythémale (Bessemoulin et Oliiviéri, 2000). D'autres instruments, connus sous le nom de spectroradiomètres, peuvent mesurer la distribution spectrale du rayonnement UV

Figure 5 - Augmentation relative (en %) du rayonnement ultraviolet (pondéré par le spectre érythémale) à la surface en fonction de la diminution de la colonne d'ozone (en %) pour plusieurs stations de mesure. Le trait fin représente un ajustement aux données selon l'équation : $UV = (ozone)^{-1.1}$. D'après Madronich et al. (1998). (© Elsevier)



(Brogniez et al., 2008). L'étalonnage de ces instruments est notoirement difficile (Houët, 2003). Il y a peu d'enregistrements fiables qui couvrent des périodes suffisamment longues (plusieurs décennies) pour étudier d'éventuelles tendances du rayonnement UV à la surface. Par exemple, il s'est avéré que les radiomètres à large bande spectrale utilisés aux États-Unis depuis les années 1970 n'avaient pas la stabilité nécessaire pour détecter des tendances (Tarasick et al., 2003). Un réseau mondial de surveillance, connu sous le nom de Network for the Detection of Atmospheric Composition Change, est désormais en place et est déjà très utile pour étudier l'évolution future à long terme du rayonnement UV à la surface.

Le rayonnement UV peut néanmoins être reconstruit à partir des observations de la composition atmosphérique, ce qui permet d'étudier son évolution passée de manière indirecte. Cela est possible car la théorie du transfert radiatif est bien établie et l'on peut utiliser des modèles pour calculer le rayonnement ultraviolet à la surface. On connaît relativement bien la manière dont varie le rayonnement ultraviolet à la surface en fonction de l'ozone stratosphérique qui est le principal modulateur du rayonnement ultraviolet en l'absence de nuages. La figure 5 montre, par exemple, que chaque réduction de 1% de la couche d'ozone stratosphérique résulte en une augmentation de 1,1% du rayonnement ultraviolet à la surface en conditions de ciel clair (Madronich et al.,

1998). C'est ainsi que l'amincissement de la couche d'ozone stratosphérique observé le 10 octobre 2006 au-dessus de l'Antarctique et au large de la pointe de l'Amérique du Sud entraîne une augmentation significative de l'indice UV en ciel clair avec des valeurs au-delà de 10 au large de la Patagonie (figure 6). On peut noter sur cet exemple que seule la partie nord de la langue du trou d'ozone est associée à une

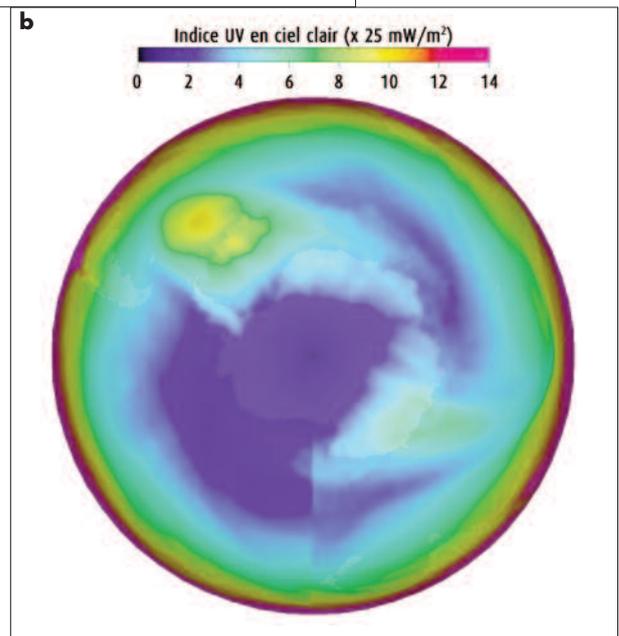
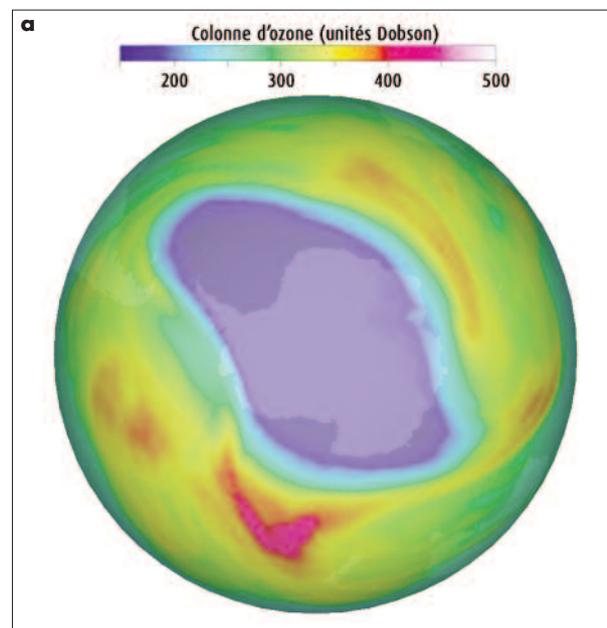


Figure 6 - a) Colonne d'ozone (unités Dobson) et b) indice UV dans l'hémisphère sud pour la situation météorologique du 10 octobre 2006. D'après <http://www.temis.nl/protocols/o3hole/> (© KNMI/ESA)

augmentation du rayonnement UV car le pôle sort tout juste de la nuit polaire et reçoit encore peu de rayonnement solaire.

Madronich et al. (1998) se sont livrés à cet exercice de reconstruction du rayonnement UV en ciel clair pour différentes bandes de latitude des deux hémisphères sur la période 1978 à 1994. La diminution de la couche d'ozone laisse apparaître une augmentation du rayonnement UV à partir des années 1980 aux hautes et moyennes latitudes qui est particulièrement visible dans l'hémisphère sud (figure 7). Cependant ces reconstructions prennent mal en compte l'effet des particules atmosphériques et tendent à surestimer le rayonnement ultraviolet à la surface dans les régions polluées (Bais et al., 2007).

Il est un peu plus compliqué de reconstituer le rayonnement ultraviolet en présence de nuages ou de particules dans l'atmosphère. Cependant, diverses mesures permettent d'étalonner ou de valider les modèles existants. D'autres travaux de reconstruction ont ainsi été effectués à partir de mesures ponctuelles sur des sites spécifiques. Kaurola et al. (2000) ont reconstruit le rayonnement UV à la surface pour les sites de Belsk en Biélorussie, Norrköping en Suède et Jakloinen en Finlande. Lindfors et al. (2003) ont estimé le rayonnement UV à partir des mesures d'ozone, de la durée d'ensoleillement et du manteau neigeux pour le site de Sodankylä en Finlande. La même méthode a été appliquée aux observations de Davos en Suisse par Lindfors et Vuilleumier (2005). En règle générale, il y a une augmentation nette du rayonnement UV sur les deux dernières décennies du xx^e siècle en Europe du Nord, qui est aussi perceptible en Europe centrale. Sur la plupart des sites, l'augmentation a lieu uniquement au printemps, quand la destruction d'ozone est importante dans le vortex polaire. Sur certains sites, on observe aussi une augmentation du rayonnement UV en été, comme à Belsk, ou en hiver, comme à Davos. Il est probable que ces augmentations soient dues à d'autres causes, comme un changement de la nébulosité, plutôt qu'à l'amincissement de la couche d'ozone.

Néanmoins, il y a quelques mesures directes fiables disponibles qui confirment les tendances obtenues à partir des reconstructions comme à Belsk et à Norrköping (Kaurola et al., 2000). La Nouvelle-Zélande dispose aussi d'un jeu de données de qualité suffisante

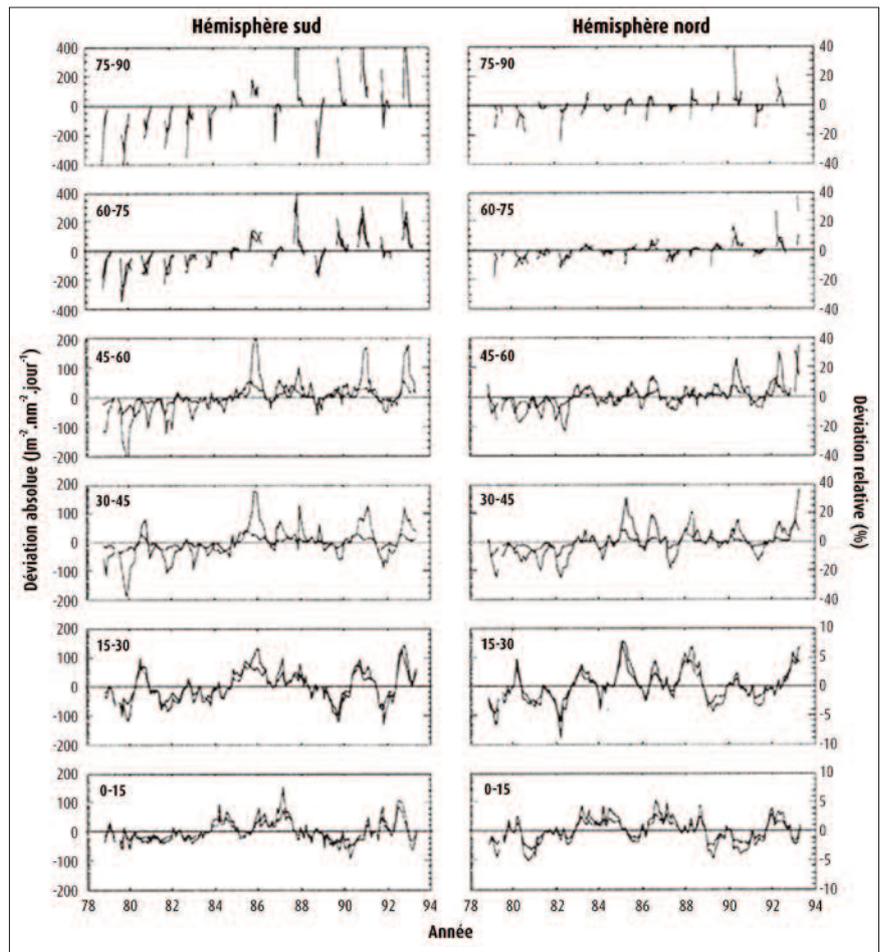
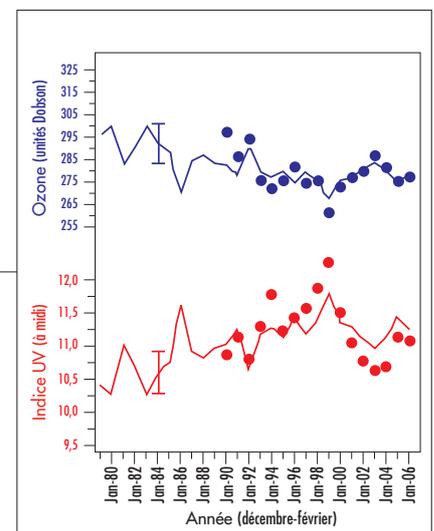


Figure 7 - Évolution du rayonnement ultraviolet (à 310 nm et en ciel clair) entre 1978 et 1994, par bandes de latitude de l'hémisphère sud (à gauche) et de l'hémisphère nord (à droite). Le rayonnement ultraviolet a été reconstruit à partir d'observations satellitaires de la colonne d'ozone réalisées par l'instrument TOMS. D'après Madronich et al. (1998). (© Elsevier)

pour mettre en évidence une augmentation du rayonnement ultraviolet à la surface à partir d'observations directes, [figure 8] (McKenzie et al., 1999 ; Bais et al., 2007). A ce propos, il est intéressant de noter que les indices UV en ciel clair sont généralement plus élevés aux moyennes et hautes latitudes de l'hémisphère sud qu'aux mêmes latitudes de l'hémisphère nord. Dans les régions polaires, les niveaux d'ozone stratosphérique sont plus faibles dans l'hémisphère sud en raison du vortex polaire plus intense qui refroidit la stratosphère et déplace l'équilibre de la couche d'ozone vers des concentrations plus faibles. En particulier la formation de nuages stratosphériques polaires

induit l'activation des composés chlorés et des cycles catalytiques de destruction de l'ozone très rapides. Dans les moyennes latitudes, les niveaux d'ozone sont plutôt influencés par le transport depuis les Tropiques qui est moins intense dans l'hémisphère sud, ce qui entraîne des valeurs d'ozone moins élevées dans cet hémisphère. De plus, la troposphère y est généralement plus

Figure 8 - Évolution temporelle de la couche d'ozone (unité Dobson) et de l'indice UV en ciel clair au-dessus de la Nouvelle-Zélande en été pour la période 1978/1979 à 2005/2006. Le trait fin représente l'évolution de la couche d'ozone en été (en haut) et une estimation de l'indice UV correspondant au midi solaire (en bas). Les ronds noirs représentent des mesures d'UV et d'ozone dans la ville de Lauder réalisées à partir d'un spectroradiomètre. D'après McKenzie et al. (1999), mis à jour par Bais et al. (2007). (© OMM)



pure si bien qu'il y a moins de diffusion et d'absorption par les aérosols et les gaz traces (O_3 , SO_2 , NO_2). Enfin, la Terre est un peu plus près du soleil pendant l'été austral qu'elle ne l'est pendant l'été boréal. C'est pourquoi la diminution de la couche d'ozone, plus prononcée dans l'hémisphère sud, a augmenté les indices UV en ciel clair de 10 en 1980, une valeur déjà élevée en soi, à 12 à la fin du siècle dernier (McKenzie et al., 1999).

Et quel risque pour le futur ?

Il est clair que l'augmentation du rayonnement UV observée en Europe ne suffit pas à expliquer l'augmentation des cas de cancer de la peau qui a été constatée au cours des dernières décennies. Il faut invoquer des changements comportementaux en particulier liés aux vacances et à la recherche de soleil. Mais qu'en est-il du futur ? Pour répondre à cette question, nous allons passer en revue les différents paramètres susceptibles d'influencer les niveaux de rayonnement ultraviolet en Europe dans le futur. Avec l'entrée en vigueur du protocole de Montréal et ses amendements successifs, le « trou » d'ozone stratosphérique va finir par se résorber (figure 9). Ce retour aux conditions d'avant les années 1980 dépend de la région que l'on considère. Il sera plus rapide dans l'hémisphère nord, où il est prévu dès 2050, que dans l'hémisphère sud où l'Antarctique devra attendre la fin du XXI^e siècle (Bodeker et al., 2007). Ozone stratosphérique et changement climatique interagissent fortement (Baldwin et al., 2007). Le refroidissement de la basse stratosphère dû à l'effet de serre anthropique favorise la formation de nuages stratosphériques polaires. Cela entraîne une prolongation des mécanismes de destruction de l'ozone, qui sont très efficaces en présence de composés chlorés, et contribue à y diminuer les concentrations d'ozone. Cet effet persistera plus longtemps dans le vortex polaire de l'hémisphère sud que dans celui de l'hémisphère nord. Pourtant, au final,

le changement climatique pourrait paradoxalement contribuer à augmenter la quantité d'ozone stratosphérique dans certaines régions. Les constantes de réaction chimique dépendent en effet de la température. Le refroidissement de la haute stratosphère diminue ainsi le taux de destruction de l'ozone par photochimie, ce qui contribue à augmenter les concentrations d'ozone dans cette région. Certains modèles prédisent des niveaux d'ozone aux moyennes latitudes plus élevés en 2050 que dans les années 1980. Au-delà d'un simple effet de la température sur le taux de destruction d'ozone, cela serait dû à une accélération de la circulation de Brewer-Dobson. On désigne par là une circulation méridionale lente, avec une branche ascendante dans les Tropiques et des branches descendantes dans les moyennes et hautes latitudes des deux hémisphères. Le transport par la circulation de Brewer-Dobson de l'ozone produit en abondance dans les Tropiques vers les moyennes et hautes latitudes pourrait ainsi augmenter avec le changement climatique (Bodeker et al., 2007).

L'ozone stratosphérique est le paramètre le plus important qui contrôle le rayonnement ultraviolet à la surface car c'est le seul filtre qui reste quand le ciel est sans nuage et que l'atmosphère est pure. Mais il ne faut pas oublier qu'une grande partie de la variabilité du rayonnement ultraviolet s'explique par la variabilité des nuages, de la réflectivité de la surface et des aérosols atmosphériques (Arola et al., 2003 ; Bais et al., 2007). Au-delà de la couche d'ozone, d'autres paramètres vont donc contribuer à modifier le rayonnement ultraviolet dans le futur. Il est probable que les politiques d'amélioration de la qualité de l'air vont continuer à se durcir et que les concentrations en ozone et en aérosols troposphériques diminuent dans les décennies à venir. L'amélioration espérée de la qualité de l'air pourrait donc contribuer à augmenter légèrement les niveaux de rayonnement ultraviolet. Dans certaines régions, la couverture neigeuse risque de diminuer, ce qui contribuera au contraire à diminuer légèrement le rayonnement ultraviolet, en particulier au printemps. Au final, le plus gros

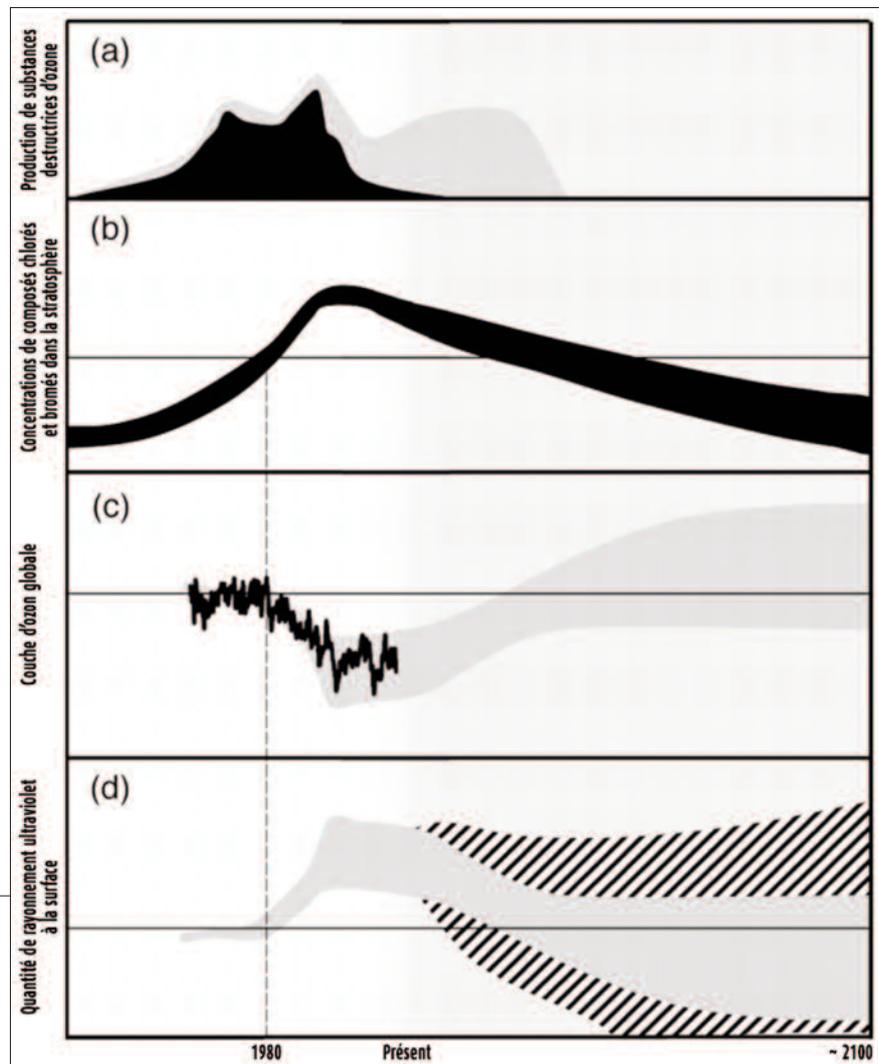
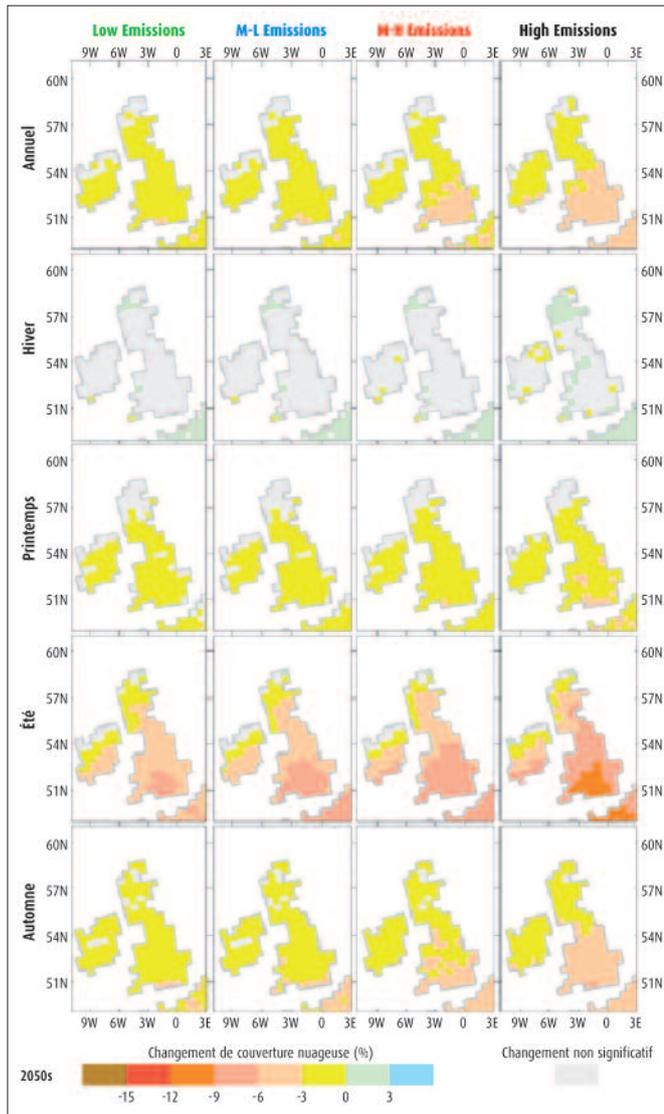


Figure 9 - Évolution passée et future de a) la production de substances destructrices de la couche d'ozone, b) la concentration de composés chlorés et bromés dans la stratosphère, c) la couche d'ozone, et d) la quantité de rayonnement ultraviolet à la surface. D'après WMO (2007). (© OMM)

Figure 10 -
 Changement
 de nébulosité
 (en % de couverture)
 au-dessus des îles
 britanniques en
 moyennes annuelle
 et saisonnière pour
 la décennie 2050
 et pour 4 scénarios
 de changement
 climatique différents
 (bas, bas-moyen,
 moyen-haut et haut).
 D'après UKCIP (2002).
 (© UKCIP, financé
 par Defra,
 produit par le Hadley
 Centre et le Tyndall
 Centre).

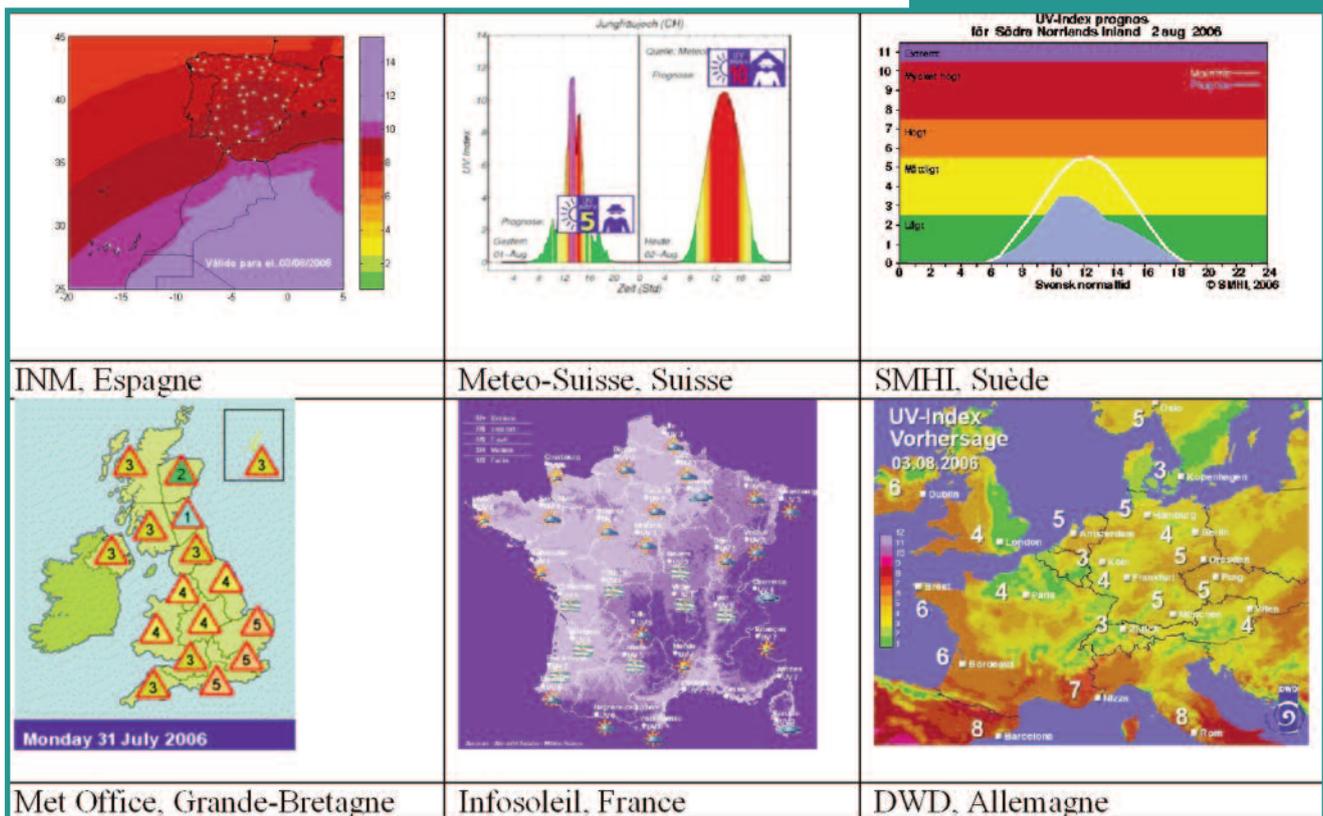


effet pourrait provenir de la réponse du cycle de l'eau et des nuages au changement climatique. Cette réponse est très incertaine. Certains modèles prédisent une diminution très marquée de la précipitation et de la couverture nuageuse au-dessus d'une partie de l'Europe en été [figure 10] (UKCIP, 2002 ; Christensen et al., 2007). Cette diminution de la couverture nuageuse conduirait automatiquement à une augmentation du rayonnement ultraviolet. Des étés plus longs et une augmentation des journées ensoleillées pourraient alors conduire à des changements comportementaux qui auront sans doute plus de conséquence sur l'exposition aux UV que tous les autres facteurs en jeu (Bentham, 2008) !

Les estimations sur l'avenir de la couche d'ozone stratosphérique et du rayonnement ultraviolet à la surface peuvent être traduites en terme de morbidité et de mortalité mais de telles prévisions sont nécessairement très incertaines dans la mesure où les aspects médicaux et sociologiques

Prévision des indices UV par les services météorologiques nationaux

Les services météorologiques nationaux produisent tous des prévisions de l'indice UV qu'ils présentent de manière différente.



restent mal compris. L'information et l'éducation du public restent, pour longtemps encore, les seuls moyens de limiter les risques sanitaires liés à une surexposition au soleil.

Remerciements

Le Met Office Hadley Centre est financé par le Defra (contrat GA01101) et le MoD (CBC/2B/0417_Annex C5) dans le cadre du « Integrated Climate Pro-gramme ». L'auteur remercie Jean-Pierre Javelle et un rapporteur anonyme pour leurs commentaires sur le manuscrit.

Pour en savoir plus

Site du Centre mondial des données sur l'ozone et le rayonnement ultraviolet : http://www.woudc.org/index_f.html

Site de l'association Sécurité solaire : <http://www.soleil.info/uv-meteo/>

Site du Network for the Detection of Atmospheric Composition Change : <http://www.ndsc.ncep.noaa.gov/>

Site de l'Organisation mondiale de la santé :

<http://www.who.int/uv/fr>

<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs271/fr/index.html>

<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs305/fr/index.html>

Site du Secrétariat de l'ozone du Programme des Nations unies pour l'environnement :

<http://ozone.unep.org/french>

http://ozone.unep.org/french/Assessment_Panels/SAP

http://ozone.unep.org/Assessment_Panels/SAP/Scientific_Assessment_2006/index.shtml

http://ozone.unep.org/Assessment_Panels/EEAP/index.shtml

Bibliographie

- **AFSSE**, 2005 : *Rayonnements ultraviolets. État des connaissances sur l'exposition et les risques sanitaires*. 177 pp. Disponible sur le site de l'Agence française de sécurité sanitaire environnementale, <http://www.afsse.fr/>.
- **Arola A., K. Lakkala, A. Bais, J. Kaurola, C. Meleti et P. Taalas**, 2003: Factors affecting short- and long-term changes of spectral UV irradiance at two European stations. *J. Geophys. Res.*, 108 (D17), 4549, DOI:10.1029/2003JD003447.
- **Bais A.F., D. Lubin, A. Arola, G. Bernhard, M. Blumthaler, N. Chubarova, C. Erlick, H. P. Gies, N. Krotkov, K. Lantz, B. Mayer, R. L. McKenzie, R. D. Pia-centini, G. Seckmeyer, J. R. Slusser et C. S. Zerefos**, 2007: Surface ultraviolet radiation: Past, Present, and Future, Chapter 7. *WMO Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006*, Global Ozone Research and Monitoring Project - Report No. 50, 572 pp., Geneva, Switzerland.
- **Baldwin M., M. Dameris, J. Austin, S. Bekki, B. Bregman, N. Butchart, E. Cordero, N. Gillett, H.-F. Graf, C. Granier, D. Kinnison, S. Lal, T. Peter, W. Randel, J. Scinocca, D. Shindell, H. Struthers, M. Takahashi et D. Thompson**, 2007: Climate-ozone connections, Chapter 5. *WMO Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006*, Global Ozone Research and Monitoring Project - Report No. 50, 572 pp., Geneva, Switzerland.
- **Bentham G.**, 2008: Climate change, ground level ultraviolet radiation and health. Dans : *Health Effects of Climate Change in the UK 2008: An update of the Department of Health Report 2001/2002*. Édité par Sari Kovats, Health Protection Agency.
- **Bentham G. et A. Aase**, 1996: Incidence of malignant melanoma of the skin in Norway, 1955–1989: associations with solar ultraviolet radiation, income and holidays abroad. *Int. J. Epidemiol.*, 25, 1132-1138.
- **Bessemoulin P. et J. Oliviéri**, 2000 : Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette. *La Météorologie*, 8^e série, 31, 42-59.
- **Bodeker G. E., D. W. Waugh, H. Akiyoshi, P. Braesicke, V. Eyring, D. W. Fahey, E. Manzini, M. J. Newchurch, R. W. Portmann, A. Robock, K. P. Shine, W. Steinbrecht et E. C. Weatherhead**, 2007: The ozone layer in the 21st century, Chapter 6. *WMO Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006*, Global Ozone Research and Monitoring Project - Report No. 50, 572 pp., Geneva, Switzerland.
- **Brognez C., V. Buchard et F. Auriol**, 2008 : Validation of UV-visible aerosol optical thickness retrieved from spectroradiometer measurements. *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 4655-4663.
- **Christensen J. H., B. Hewitson, A. Busuioac, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R. K. Kolli, W.-T. Kwon, R. Laprise, V. Magaña Rueda, L. Mearns, C. G. Menéndez, J. Räisänen, A. Rinke, A. Sarr et P. Whetton**, 2007: Regional Climate Projections. Dans : *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 et H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- **de Groot F. R., J. Longstreth, M. Norval, A. P. Cullen, H. Slaper, M. L. Kripke, Y. Takizawa et J. C. van der Leun**, 2003: Health effects from stratospheric ozone depletion and interactions with climate change. *Photochem. Photobiol. Sci.*, 2, 16-28, DOI: 10.1039/b211156j.
- **Houët M.**, 2003 : *Spectroradiométrie du rayonnement solaire UV au sol : améliorations apportées à l'instrumentation et au traitement des mesures. Analyse pour l'évaluation du contenu atmosphérique en ozone et en aérosols*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologie de Lille, France.
- **Kaurola J., P. Taalas, T. Koskela, J. Borkowski et W. Josefsson**, 2000: Long-term variations of UV-B doses at three stations in northern Europe. *J. Geophys. Res.*, 105(D16), 20813-20820.
- **Lindfors A. V., A. Arola, J. Kaurola, P. Taalas, et T. Svenøe**, 2003 : Long-term erythemal UV doses at Sodankylä estimated using total ozone, sunshine duration, and snow depth. *J. Geophys. Res.*, 108 (D16), 4518, DOI:10.1029/2002JD003325.
- **Lindfors A. et L. Vuilleumier**, 2005 : Erythemal UV at Davos (Switzerland), 1926–2003, estimated using total ozone, sunshine duration, and snow depth. *J. Geophys. Res.*, 110, D02104, DOI:10.1029/2004JD005231.
- **Madronich S., R. L. McKenzie, L. O. Björn et M. M. Caldwell**, 1998 : Changes in biologically active ultraviolet radiation reaching the Earth's surface. *J. Photochem. Photobiol. B: Biology*, 46, 5-19.
- **McKenzie R., B. Connor et G. Bodeker**, 1999 : Increased summertime UV radiation in New Zealand in response to ozone loss. *Science*, 285, 1709-1711.
- **Memon A. A., J. A. Tomenson, J. Bothwell et P. S. Friedmann**, 2000 : Prevalence of solar damage and actinic keratosis in a Merseyside population. *British Journal of Dermatology*, 142, 1154-1159.
- **Norval M., A. P. Cullen, F. R. de Groot, J. Longstreth, Y. Takizawa, R. M. Lucas, F. P. Noonan et J. C. van der Leun**, 2007 : Chapter 2, The effects on human health from stratospheric ozone depletion and its interactions with climate change. *Environmental Effects of Ozone Depletion: 2006 Assessment Interactions of Ozone Depletion and Climate Change*, United Nations Environment Programme.
- **Tarasick D. W., V. E. Fioletov, D. I. Wardle, J. B. Kerr, L. J. B. McArthur et C. A. McLinden**, 2003: Climatology and trends of surface UV radiation. *Atmosphere-Ocean*, 41(2), 121-138.
- **UKCIP02**, 2002: *UK Climate Impacts Programme*. <http://www.ukcip.org.uk>
- **WHO**, 2006 : *Charge mondiale de morbidité due au rayonnement ultraviolet solaire. Aide-mémoire n°305*. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs305/fr/index.html>
- **WMO (World Meteorological Organization)**, 2007: *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006, Global Ozone Research and Monitoring Project - Report No. 50*, 572 pp., Geneva, Switzerland.