Questions et réponses sur les effets de l'appauvrissement de la couche d'ozone, du rayonnement UV et du climat sur les êtres humains et l'environnement

Supplément au rapport d'évaluation 2022 du Groupe d'évaluation des effets sur l'environnement du PNUE



UN environment programme | ozone secretariat

Protocole de Montréal relatif aux substances qui appauvrissent la couche d'ozone

Programme des Nations Unies pour l'environnement
Secrétariat de l'ozone
P.O. Box 30552
Nairobi, 00100
Kenya

Publié en juin 2023
Mis en ligne en juin 2023

ISBN : 978-9914-733-90-7

Coordonné et édité par : Germar H. Bernhard, Roy Mackenzie-Calderón, Rachele Ossolat et Janet F. Bornman.

Auteurs : Mads P. Sulbæk Andersen, Anthony L. Andrady, Alkiviadis F. Bais, Paul Barnes, Germar H. Bernhard, Scott N. Byrne, Anu M. Heikkilä, Rachael Ireland, Marcel A. K. Jansen, Sasha Madronich, Richard L. McKenzie, Rachel Neale, Patrick J. Neale, Rachele Ossola, Qing-Wei Wang, Sten-Åke Wangberg, Christopher C. White, Stephen R. Wilson et Richard G. Zepp.

Auteurs contributeurs : Pieter J. Aucamp, Anastazia T. Banaszak, Marianne Berwick, Janet F. Bornman, Laura S. Bruckman, Bente Foereid, Donat-P. Häder, Loes M. Hollestein, Wen-Che Hou, Samuel Hylander, Andrew R. Klekociuk, J. Ben Liley, Janice D. Longstreth, Robyn M. Lucas, Roy Mackenzie-Calderón, Javier Martinez-Abaigar, Catherine M. Olsen, Krishna K. Pandey, Nigel D. Paul, Lesley E. Rhodes, Sharon A. Robinson, T. Matthew Robson, Kevin C. Rose, Tamara Schikowski, Keith R. Solomon, Barbara Sulzberger, Craig E. Williamson, Seyhan Yazar, Antony R. Young, Liping Zhu, Meifang Zhu.

Équipe de production : Roy Mackenzie-Calderón et Rachele Ossola (coordinateurs), et Alejandro Pérez-Velásquez (concepteur).

Ce document doit être cité comme suit :
Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), Questions et réponses sur les effets de l'appauvrissement de la couche d'ozone, du rayonnement UV et du climat sur les êtres humains et l'environnement. Supplément au rapport d'évaluation 2022 du Groupe de l'évaluation des effets sur l'environnement du PNUE, 25 p.; PNUE : Nairobi, 2023.

Ce document est disponible en ligne à l'adresse suivante :
https://ozone.unep.org/system/files/documents/EEAP-2022-Assessment-Report-QA.pdf

Les chiffres de ce document appartiennent au domaine public et peuvent être utilisés sans autorisation. La mention de ce document est encouragée.

Image de couverture : Vue de Tahquitz Peak, dans le sud de la Californie, vers l'ouest. Le rayonnement du soleil couchant est atténué par la fumée et la brume d'un feu de forêt, illustrant l'effet des aérosols sur les rayonnements UV et visibles. Photo de Germar H. Bernhard

ISBN 978-9914-733-90-7
9 789914 733907

Questions et réponses sur les effets de l'appauvrissement de la couche d'ozone, du rayonnement UV et du climat sur les êtres humains et l'environnement

Coordonné et édité par

Germar H. Bernhard, Roy Mackenzie-Calderón, Rachele Ossolaet Janet F. Bornman.

Auteurs

Mads P. Sulbæk Andersen, Anthony L. Andrady, Alkiviadis F. Bais, Paul Barnes, Germar H. Bernhard, Scott N. Byrne, Anu M. Heikkilä, Rachael Ireland, Marcel A. K. Jansen, Sasha Madronich, Richard L. McKenzie, Rachel Neale, Patrick J. Neale, Rachele Ossola, Qing-Wei Wang, Sten-Åke Wangberg, Christopher C. White, Stephen R. Wilson, et Richard G. Zepp.

Auteurs collaborateurs

Pieter J. Aucamp, Anastazia T. Banaszak, Marianne Berwick, Janet F. Bornman, Laura S. Bruckman, Bente Foereid, Donat-P. Häder, Loes M. Hollestein, Wen-Che Hou, Samuel Hylander, Andrew R. Klekociuk, J. Ben Liley, Janice D. Longstreth, Robyn M. Lucas, Roy Mackenzie-Calderón, Javier Martinez-Abaigar, Catherine M. Olsen, Krishna K. Pandey, Nigel D. Paul, Lesley E. Rhodes, Sharon A. Robinson, T. Matthew Robson, Kevin C. Rose, Tamara Schikowski, Keith R. Solomon, Barbara Sulzberger, Craig E. Williamson, Seyhan Yazar, Antony R. Young, Liping Zhu et Meifang Zhu.

Équipe de production

Roy Mackenzie-Calderón et Rachele Ossola (coordinateurs), et Alejandro Pérez-Velásquez (concepteur).

Table des matières

Introduction 1

Questions et Réponses 2

Q1 Qu'est-ce que le rayonnement UV solaire et pourquoi s'en préoccuper ? 2

Q2 Comment le rayonnement UV solaire a-t-il changé dans le passé et quels changements sont prévus pour l'avenir ? 5

Q3 L'appauvrissement de l'ozone a-t-il changé le climat et les conditions météorologiques ? 7

Q4 Quels sont les effets nocifs de l'exposition au soleil sur la santé humaine ? 9

Q5 Quels sont les avantages de passer du temps au soleil ? 12

Q6 Quels sont les effets du rayonnement UV-B sur les plantes et les écosystèmes terrestres ? 14

Q7 Le rayonnement UV-B affecte-t-il les rivières, les lacs et les océans ? 16

Q8 Le changement climatique modifie-t-il les effets du rayonnement UV-B sur le milieu aquatique ? 17

Q9 Les changements dans les rayons UV peuvent-ils affecter la qualité de l'air ? 18

Q10 Les produits chimiques qui remplacent les substances existantes appauvrissant la couche d'ozone apporteront-ils de nouveaux problèmes environnementaux ? 19

Q11 Comment l'exposition au rayonnement UV solaire affecte-t-elle la durée de vie des matériaux d'extérieur ? 20

Q12 Quelle est la relation entre les microplastiques et le rayonnement UV solaire ? 22

Source des chiffres 23

Liste des acronymes 24

Auteurs et contributeurs 25

Introduction

Ce recueil de questions et réponses (Q&R) a été préparé par le Groupe de l'évaluation des effets sur l'environnement (GEEE) du Protocole de Montréal sous l'égide du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE). Le document complète l'évaluation quadriennale 2022 du GEEE (https://ozone.unep.org/science/assessment/eeap) et fournit des informations intéressantes et utiles aux décideurs, au grand public, aux enseignants et aux scientifiques, rédigées dans un langage facile à comprendre.

Le Protocole de Montréal est un traité international dont l'objectif est de protéger la couche d'ozone de la Terre, qui protège la vie sur notre planète du rayonnement ultraviolet (UV) nocif du Soleil. Le traité a été accepté par tous les États membres des Nations Unies et vise à limiter les rejets de substances chimiques dans l'atmosphère terrestre qui nuisent à la couche d'ozone. Ces produits chimiques sont appelés « substances qui appauvrissent la couche d'ozone » ou simplement SACO. Dans le cadre du Protocole de Montréal, plusieurs organes consultatifs ont été créés pour évaluer chaque année de nouvelles informations scientifiques importantes sur les changements dans la couche d'ozone et sur la façon dont ceux-ci peuvent affecter la vie sur Terre, ainsi que pour évaluer les technologies de remplacement qui permettraient d'éliminer les SACO. Le GEEE est l'un de ces organes consultatifs et évalue les divers effets sur l'environnement de l'appauvrissement de la couche d'ozone.

Les questions-réponses traitent de l'importance du rayonnement UV pour la vie sur Terre et prennent en compte les effets nocifs et bénéfiques. Elles décrivent également les changements dans le rayonnement UV qui se sont produits dans le passé et qui devraient avoir lieu au cours du XXI^{e} siècle. Certains de ces changements sont également liés au changement climatique. Les questions-réponses portent sur les conséquences des modifications de l'ozone sur la santé humaine et la vie sur terre, dans les lacs et dans les océans.

Vous constaterez que la portée des questions-réponses reflète les liens entre de nombreux problèmes importants qui influencent la vie. Outre les fonctions atmosphériques et biologiques, le rayonnement UV, l'ozone et le changement climatique jouent un rôle dans la qualité de l'air que nous respirons. Les deux dernières questions-réponses traitent des effets du rayonnement UV sur les matériaux utilisés pour les bâtiments et d'autres applications, ainsi que du rôle du rayonnement UV dans la pollution plastique sur terre et dans les océans.

Dans l'ensemble, les questions-réponses soulignent le rôle crucial du protocole de Montréal dans la protection de la vie sur Terre et visent à améliorer notre compréhension, afin que nous continuions à rechercher des moyens innovants de préserver un environnement durable et une bonne qualité de vie.

Janet F. Bornman
Co-présidente du Groupe de l'évaluation des effets sur l'environnement

Q1 Qu'est-ce que le rayonnement UV solaire et pourquoi s'en préoccuper ?

Le rayonnement ultraviolet (UV) solaire fait partie du rayonnement électromagnétique provenant du Soleil. Contrairement à la lumière visible, que nous pouvons voir, le rayonnement UV est invisible et plus énergétique. En raison de son énergie plus élevée, le rayonnement UV peut rompre les liaisons chimiques des molécules, y compris celles de l'ADN, qui est la molécule qui contient le code génétique de la plupart des organismes. Les dommages causés à cette molécule peuvent avoir de multiples effets sur la santé, notamment des cancers de la peau. Le rayonnement UV peut également nuire à la productivité agricole et aquatique ainsi qu'à la qualité de l'air. Il peut également réduire la durée de vie effective de matériaux tels que les plastiques et les peintures. Toutefois, certains rayons UV sont bénéfiques pour la santé humaine car ils produisent de la vitamine D dans la peau et peuvent tuer les agents pathogènes.

Il existe différents types de rayonnement UV. Les rayonnements UV sont divisés en UV-C, UV-B et UV-A. Les UV-C sont les plus énergétiques et l'exposition à ces derniers est particulièrement dangereuse pour toutes les formes de vie. Heureusement, le rayonnement UV-C est entièrement absorbé par les molécules d'oxygène et d'ozone situées en altitude dans l'atmosphère terrestre (**Figure Q1-1**). La plupart des rayonnements UV-B émis par le Soleil sont également absorbés par la couche d'ozone ; cependant, certains atteignent la surface de la Terre. Chez l'homme, l'exposition aux rayonnements UV-B provoque des coups de soleil, augmente les risques de cancer de la peau et de cataracte et affaiblit le système immunitaire (voir **Q4**). Une exposition excessive aux rayonnements UV-B peut également endommager les plantes terrestres, y compris les cultures agricoles (voir **Q6**), les écosystèmes aquatiques (voir **Q7**) et les matériaux utilisés pour la construction et les textiles (voir **Q11**). Les rayonnements UV-A sont les moins énergétiques et ne sont que faiblement absorbés par la couche d'ozone, mais peuvent néanmoins avoir des effets néfastes sur la santé, tels qu'un vieillissement prématuré de la peau.

L'indice UV est une mesure de la quantité de rayonnements UV nocifs pour la santé humaine. L'intensité du rayonnement solaire UV intéressant la santé humaine est généralement quantifiée par l'indice UV, qui est une mesure de la quantité de rayonnement UV provoquant un coup de soleil (également appelé « érythème »). Les rayonnements UV-B et UV-A solaires représentent respectivement environ 90 % et 10 % de l'indice UV. L'indice UV est un chiffre reconnu à l'échelle internationale et a été introduit pour sensibiliser le public aux effets néfastes des rayonnements UV sur la santé humaine, et pour souligner la nécessité d'utiliser des mesures de protection individuelle (**Figure Q1-2**). Par exemple, lorsque l'indice UV est modéré ou élevé, l'Organisation mondiale de la santé recommande de « chercher de l'ombre, enfiler une chemise, mettre de la crème solaire et mettre un chapeau ». Lorsqu'à midi l'indice UV est très élevé ou extrême, il est conseillé d'éviter d'être à l'extérieur à midi ou de chercher de l'ombre à tout moment, de porter une chemise et un chapeau et d'appliquer un écran solaire avec un facteur de protection approprié.

CATÉGORIE D'EXPOSITION	GAMME UV
BAS	< 2
MODÉRÉ	3 à 5
ÉLEVÉ	6 à 7
TRÈS ÉLEVÉ	8 à 10
EXTRÊME	11 +

Figure Q1-2. Relation entre les catégories d'exposition et les gammes de l'indice UV.

Plusieurs facteurs affectent l'intensité du rayonnement UV. Les jours sans nuages, les principaux paramètres qui déterminent l'intensité du rayonnement UV à la surface de la Terre sont l'élévation du soleil au-dessus de l'horizon et la quantité d'ozone

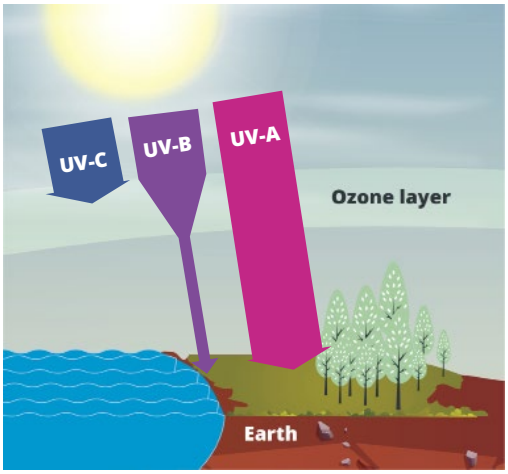


Figure Q1-1. La couche d'ozone dans la stratosphère protège la surface de la Terre des rayonnements UV nocifs. *La couche d'ozone entoure toute la Terre et est majoritairement localisée entre 15 et 40 km du sol, dans la stratosphère terrestre. Le rayonnement UV-C est entièrement absorbé par la couche d'ozone, les UV-B ne sont que partiellement absorbés, tandis que les UV-A et les autres longueurs d'onde telles que la lumière visible et le rayonnement infrarouge ne sont que faiblement absorbés. L'appauvrissement de la couche d'ozone influence principalement l'augmentation de la quantité de rayonnement UV-B qui atteint la surface de la Terre. L'un des principaux objectifs du Protocole de Montréal est de prévenir l'appauvrissement excessif de la couche d'ozone qui augmenterait l'exposition humaine aux rayons UV-B (voir **Q2**). Le rayonnement UV fait partie du rayonnement électromagnétique provenant du Soleil. Les scientifiques classent les trois types de rayonnements UV en fonction de leur longueur d'onde, mesurée en nanomètres (nm) : les UV-C vont de 100 à 280 nm, les UV-B de 280 à 315 nm et les UV-A de 315 à 400 nm (1 nanomètre équivaut à un milliardième de mètre).*

dans l'atmosphère au-dessus de l'emplacement donné. Par conséquent, c'est sous les tropiques que l'intensité du rayonnement UV est la plus élevée, où le soleil est parfois directement au-dessus de la tête à midi et où la quantité d'ozone est inférieure à celle des latitudes moyennes. Le rayonnement UV est également atténué par les particules en suspension dans l'atmosphère telles que la poussière, la fumée, la suie et le sel de mer, appelées aérosols (voir **Q9**). Les mesures visant à réduire la pollution de l'air dans les villes et les régions industrielles réduisent les aérosols, rétablissant ainsi les niveaux de rayonnement UV à ceux d'une atmosphère plus propre (voir également la **figure Q2-2**). Le rayonnement UV est également influencé par l'altitude, les variations saisonnières de la distance Soleil-Terre (la Terre est la plus proche du Soleil en décembre et janvier et la plus éloignée en juin et juillet) et la réflexion du sol (**figure Q1-3**). Par exemple, la neige fraîche réfléchit vers le haut plus de 90 % du rayonnement UV entrant et une partie de ce rayonnement est diffusée vers le sol. Dans ces conditions, l'indice UV peut être jusqu'à 60 % plus élevé sur un sol enneigé que sur un sol sans neige. Les nuages peuvent réduire le rayonnement UV de plus de 90 %, mais la réduction est inférieure à celle du rayonnement visible. Les nuages minces, tels que les cirrus, ont peu d'effet sur l'intensité du rayonnement UV à la surface de la Terre. Les rayons UV peuvent donc causer des coups de soleil les jours de ciel couvert, même lorsque le ciel semble relativement sombre. D'autre part, les nuages qui entourent le soleil mais ne le bloquent pas peuvent entraîner des augmentations du rayonnement UV, qui peuvent dépasser le rayonnement UV dans un ciel sans nuages. L'intensité du rayonnement UV sous l'eau peut toujours être élevée et dépend de la clarté de l'eau, qui est fortement influencée par la matière organique dissoute (voir **Q7**).

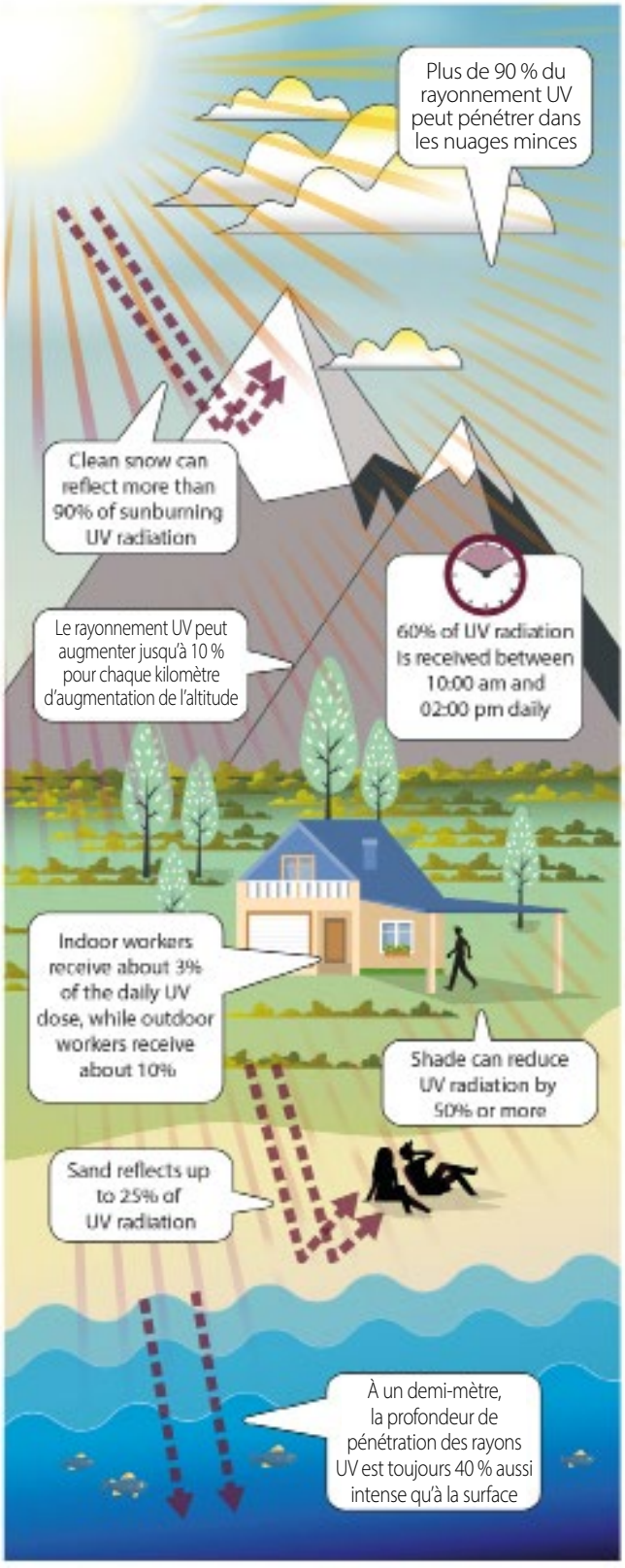


Figure Q1-3. Facteurs déterminant l'intensité du rayonnement UV à la surface de la Terre.

La diminution de l'ozone entraîne une augmentation de l'indice UV. Pour une élévation solaire donnée, l'indice UV dépend fortement de la quantité d'ozone dans une colonne verticale s'étendant de la surface de la Terre jusqu'au sommet de l'atmosphère (**figure Q1-4**). Cette colonne est appelée « ozone total » et s'exprime en unités Dobson (DU). Une unité Dobson correspond à une couche hypothétique d'ozone pur d'une épaisseur de 0,01 millimètre lorsqu'il est comprimé à la pression à la surface de la Terre. En moyenne sur la surface de la Terre et sur l'année, l'ozone total est d'environ 300 DU, ce qui correspond à une couche d'ozone pur de trois millimètres d'épaisseur (la hauteur d'une pile de deux pièces de monnaie ordinaires).

Une diminution de 1 % de l'ozone total entraîne une augmentation de l'indice UV d'environ 1,2 %. Cependant, pour les changements plus importants de l'ozone (par exemple, pour les fortes diminutions

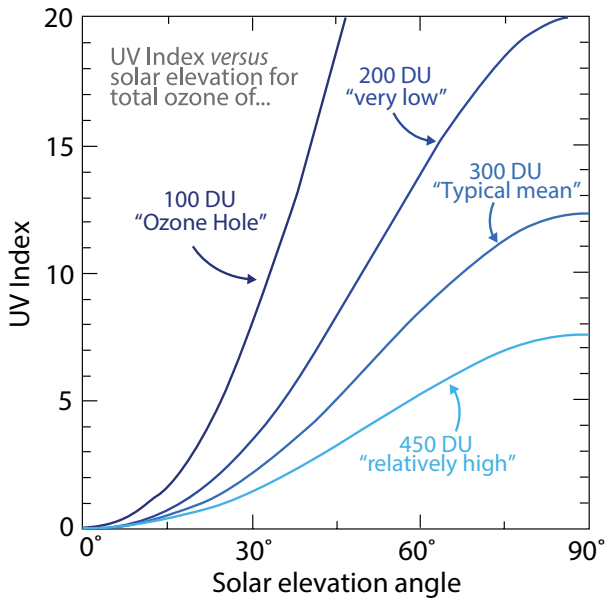


Figure Q1-4. Effet de l'élévation solaire et de l'ozone total sur l'indice UV. *L'indice UV est tracé en fonction de l'élévation du soleil au-dessus de l'horizon pour différentes quantités d'ozone total. Des niveaux d'ozone aussi bas que 100 DU n'ont été enregistrés que dans le trou d'ozone au-dessus de l'Antarctique. Dans les latitudes moyennes, la colonne d'ozone moyenne est généralement de 300 DU, avec des pics pouvant atteindre 450 DU au printemps.*

observées sous le Trou d'ozone antarctique), les augmentations de l'indice UV sont beaucoup plus importantes. Par exemple, une réduction de 50 % de l'ozone total entraîne plus qu'un doublement de l'indice UV (**Figure Q1-5**).

Les rayons UV sont inégalement répartis autour du globe terrestre. La figure Q1-6 illustre l'indice UV maximal autour du globe. Sous les tropiques, l'indice UV peut dépasser 16 au niveau de la mer et atteindre 25 à haute altitude comme dans la région de l'Altiplano au Chili. L'indice UV atteint des maxima estivaux significativement plus élevés dans l'hémisphère Sud par rapport aux latitudes correspondantes dans l'hémisphère Nord en raison des différences d'ozone total et de distance Soleil-Terre. En général, les valeurs de l'indice UV de pointe diminuent avec l'augmentation de la latitude. Cependant, la région de l'Antarctique, qui est affectée par le trou dans la couche d'ozone de l'Antarctique, est une exception notable. Là, l'indice UV maximal peut être comparable à celui des tropiques (voir également la **figure Q2-1**). En dehors de l'atmosphère protectrice de la Terre, l'indice UV dépasse 300.

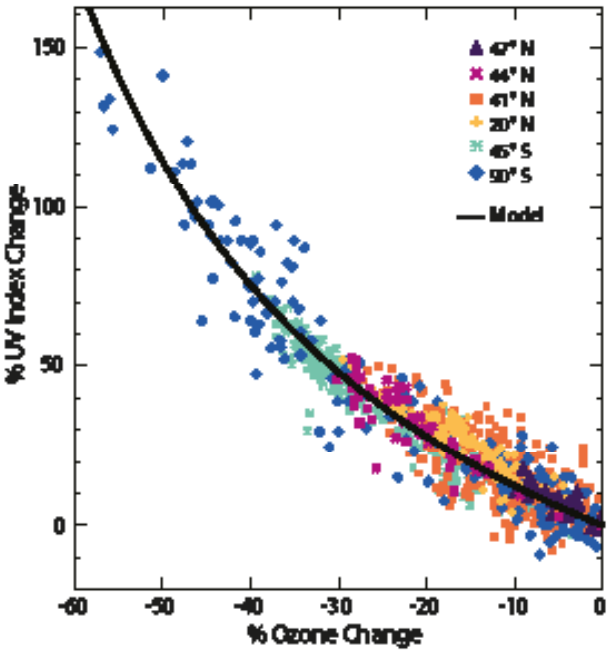


Figure Q1-5. La relation entre les variations de l'ozone total et l'indice UV. *Les symboles illustrent cette relation en utilisant les données de l'ozone total et l'indice UV mesuré sur six sites à différentes latitudes. La dépendance de l'indice UV à l'ozone total a également été calculée théoriquement et est indiquée par la courbe lisse légendée « Modèle ».*

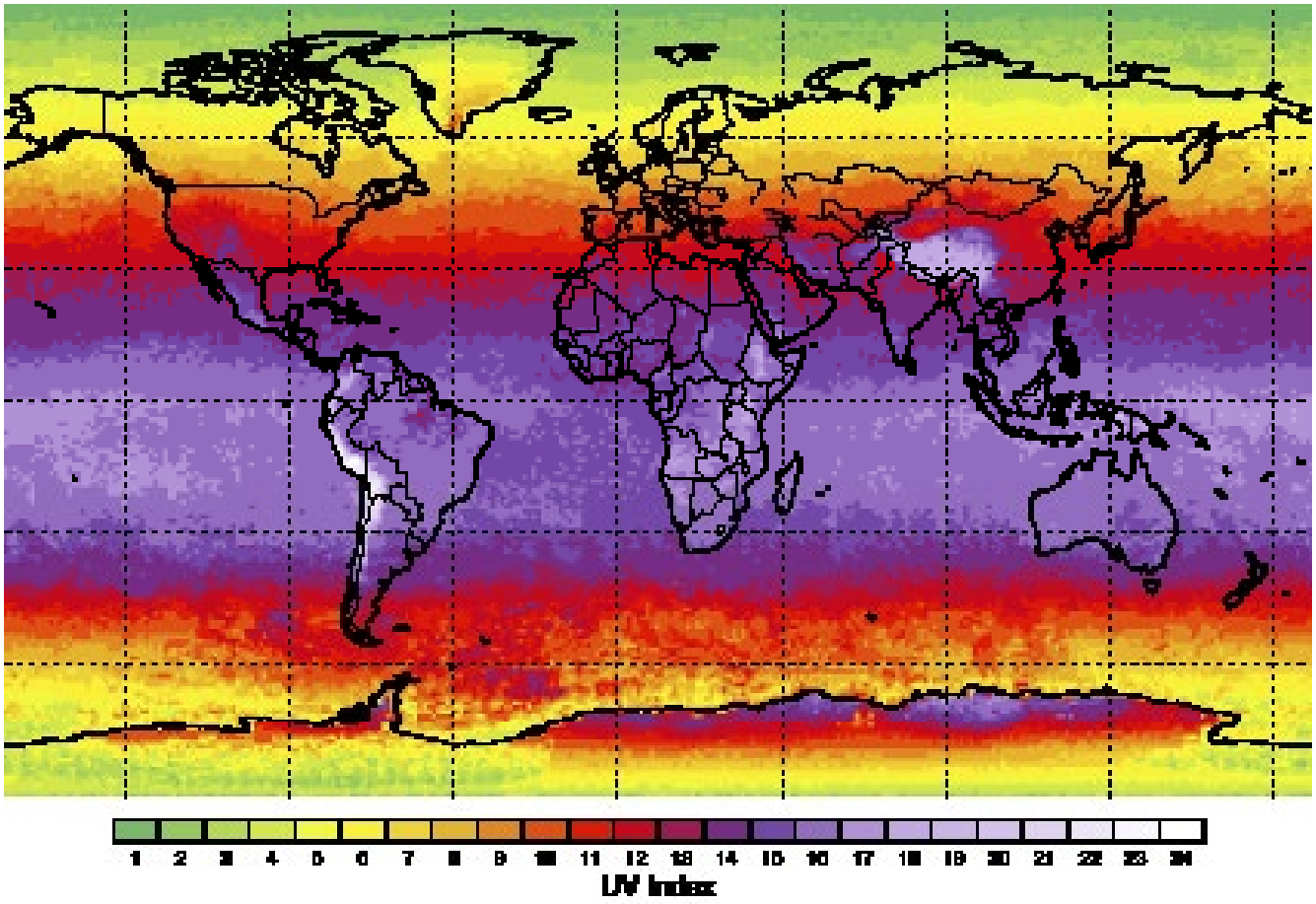


Figure Q1-6. L'indice UV maximal à la surface de la Terre dérivé des mesures par satellite. *L'indice UV le plus élevé sur Terre est observé près de l'équateur sur les sites à haute altitude. En raison du trou dans la couche d'ozone, l'indice UV sur le littoral de l'Antarctique peut parfois être aussi élevé que sous les tropiques.*

Q2 Comment le rayonnement UV solaire a-t-il changé dans le passé et quels changements sont prévus pour l'avenir ?

Les réductions de l'ozone stratosphérique entre les années 1970 et le début des années 1990, causées par des substances appauvrissant la couche d'ozone fabriquées telles que les chlorofluorocarbones, ont entraîné une augmentation du rayonnement UV de quelques pour cent aux latitudes moyennes et beaucoup plus importante en Antarctique. Ces SACO ont causé le trou d'ozone de l'Antarctique, qui est observé au-dessus du pôle Sud chaque printemps depuis les années 1980. Sans le protocole de Montréal et ses amendements, l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique et les augmentations conséquentes du rayonnement UV auraient continué. En raison de la mise en œuvre réussie de ce traité international, la couche d'ozone commence maintenant à se reconstituer. Au cours des 25 dernières années, les niveaux de rayonnement UV n'ont pas augmenté dans la plupart des régions et sont désormais principalement influencés par les variations des nuages et des aérosols.

Le rayonnement UV a augmenté au-dessus des niveaux normaux entre les années 1970 et le début des années 1990. Les changements à long terme du rayonnement UV ont été calculés à l'aide de données provenant de radiomètres au sol et d'instruments installés sur des satellites. Malheureusement, la surveillance systématique du rayonnement UV au sol n'a commencé qu'au début des années 1990. Pour cette raison, les estimations des niveaux de rayonnement UV à la surface de la Terre avant cette date reposent principalement sur des observations par satellite, qui ont commencé dans les années 1970, ou sur des reconstructions utilisant des mesures de l'ozone total et d'autres données telles que la durée de l'ensoleillement pour caractériser les changements à long terme de la nébulosité. Ces observations et reconstructions indiquent que le rayonnement UV aux latitudes moyennes (25–50°) des deux hémisphères a augmenté d'environ 3 à 5 % entre le début des années 1980 et le début des années 1990. Toutefois, les augmentations observées au niveau du trou dans la couche d'ozone de l'Antarctique ont été beaucoup plus importantes. L'indice UV maximal à la station Palmer, une station de recherche sur la côte antarctique, a plus que doublé par rapport aux années 1970 avant l'apparition du trou dans la couche d'ozone (**figure Q2-1**). Ces dernières années, l'indice UV à la station Palmer a parfois dépassé les maxima de l'indice UV à San Diego, une ville située à moyenne latitude près de la frontière des États-Unis et du Mexique, malgré la latitude beaucoup plus faible de San Diego par rapport à celle de la station Palmer. En revanche, aucune augmentation significative du rayonnement UV n'a été observée sous les tropiques. Étant donné que le rayonnement UV est également affecté par les aérosols et les nuages (voir **Q1** et **Q6**), les changements dans le rayonnement UV dans certaines régions ont été davantage provoqués par les changements des nuages et des polluants atmosphériques que par les changements de la quantité d'ozone stratosphérique (**figure Q2-2**). Par exemple, le développement économique rapide de l'Asie de l'Est, qui a commencé

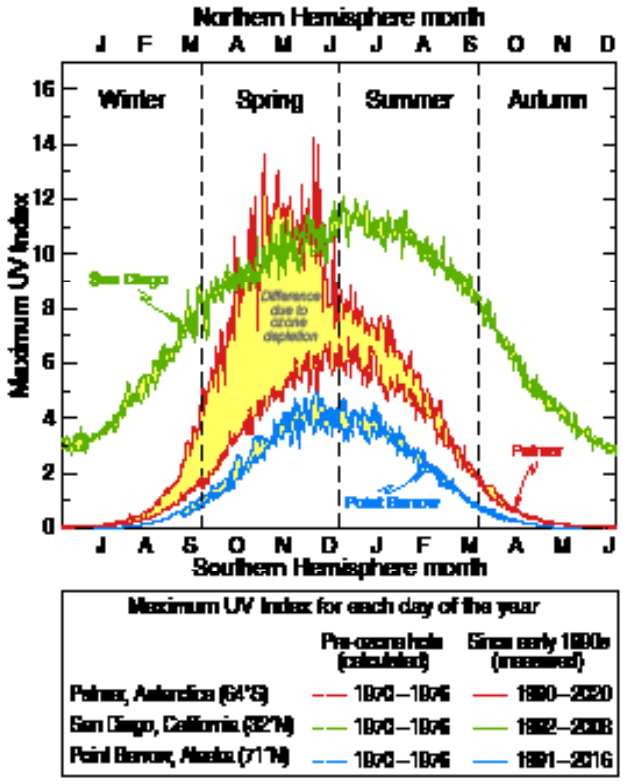


Figure Q2-1. Différences de l'indice UV à différentes latitudes et périodes de l'année. *La figure compare l'indice UV le plus élevé jamais mesuré pour chaque jour de l'année à la station Palmer (une station sur la côte antarctique), à San Diego (une ville près de la frontière des États-Unis et du Mexique) et près de Point Barrow (le point le plus au nord de l'Alaska) pendant deux périodes : avant la formation du trou dans la couche d'ozone (1970 – 1976, lignes pointillées) et la période contemporaine à partir du début des années 1990, au cours de laquelle le trou dans la couche d'ozone s'est complètement développé (lignes pleines). Les ombres jaunes représentent la différence entre les deux périodes. Historiquement, l'indice UV maximal à la station Palmer était bien inférieur à celui de San Diego. En raison des effets du trou d'ozone, l'indice UV le plus élevé mesuré à la station Palmer a plus que doublé depuis les années 1970 et peut aujourd'hui dépasser occasionnellement les maxima observés à San Diego. En revanche, les indices UV de Point Barrow sont considérablement plus faibles que ceux de la station Palmer et n'ont que légèrement varié (18 % en moyenne) entre les deux périodes. Cette augmentation relativement faible peut s'expliquer par un appauvrissement plus faible de la couche d'ozone au printemps dans l'Arctique par rapport à l'Antarctique. À San Diego, les données historiques et contemporaines sont presque impossibles à distinguer. En moyenne, les indices UV n'ont augmenté que d'environ 3 % depuis les années 1970.*

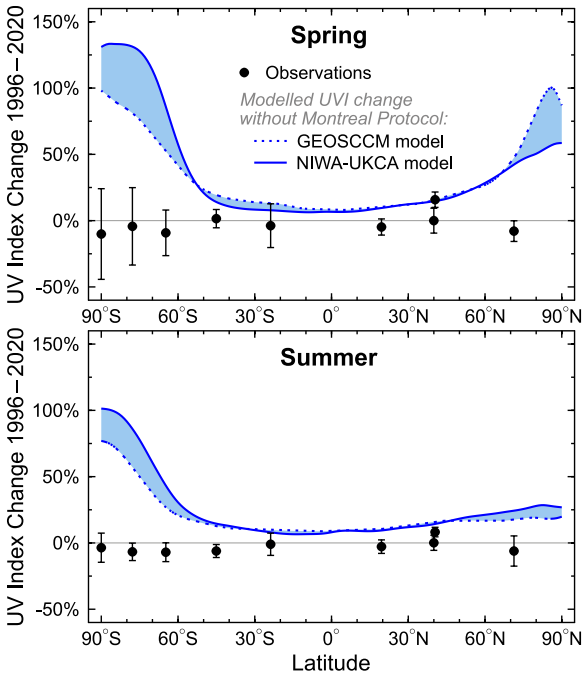


Figure Q2-2. Comparaison des changements observés dans l'indice UV entre 1996 et 2020 et des changements estimés en l'absence du Protocole de Montréal. *Les cercles et les barres verticales indiquent les meilleures estimations et leur plage plausible pour les changements de l'indice UV survenus entre 1996 et 2020. Ces estimations ont été déduites des observations sur des sites principalement non pollués (neuf stations au sol situées à une latitude allant du pôle Sud (90°S) à Barrow (71°N), en Alaska) au printemps (en haut) et en été (en bas). Les lignes bleues pleines et pointillées sont les résultats de simulations utilisant deux modèles chimiques et climatiques différents qui supposent un monde sans le Protocole de Montréal, où les émissions de substances appauvrissant la couche d'ozone ne seraient pas contrôlées. Sans le Protocole de Montréal, l'indice UV aurait augmenté de 10 à 20 % aux latitudes moyennes et aurait plus que doublé au pôle Sud au printemps. À l'exception d'un site urbain à 41°N (Thessalonique, Grèce), les changements observés dans l'indice UV ont été faibles sur tous les sites et plus faibles que les scénarios prédits par les deux modèles climatiques. Ces observations confirment que le Protocole de Montréal a empêché de fortes augmentations du rayonnement UV, en particulier aux latitudes sud supérieures à 60°S. Les augmentations relativement importantes de l'indice UV mesuré à Thessalonique (8 % pour l'été et 16 % pour le printemps) sont principalement causées par des réductions des aérosols atmosphériques résultant des mesures de contrôle de la pollution atmosphérique sur ce site urbain, montrant l'importance de facteurs autres que l'ozone dans la détermination des niveaux de rayonnement UV à la surface de la Terre (voir **Q1**).*

au début des années 1980, a entraîné une forte augmentation des aérosols atmosphériques. Dans certaines régions, cela a entraîné une diminution du rayonnement UV de plus de 25 % par rapport à l'époque préindustrielle.

Le Protocole de Montréal a aidé la couche d'ozone à se reconstituer. Le protocole de Montréal et ses amendements ont très bien réussi à réduire l'abondance atmosphérique de substances appauvrissant la couche d'ozone (SACO). Ces substances comprennent des gaz halogénés tels que les chlorofluorocarbones (CFC) rejetés par les activités humaines. Étant donné que le protocole de Montréal a été ratifié par les 198 États membres des Nations Unies, la production et la consommation de substances qui appauvrissent la couche d'ozone sont désormais contrôlées dans le monde entier. En conséquence, la quantité de SACO rejetée dans l'atmosphère diminue et la couche d'ozone stratosphérique commence à se reconstituer. Cependant, le processus de récupération est lent, car la vitesse à laquelle les SACO sont éliminées de l'atmosphère est trois à quatre fois plus lente que la vitesse à laquelle elles ont été émises dans les années 1980. Il faudra donc plusieurs décennies avant que la couche d'ozone ne soit complètement reconstituée. En outre, les concentrations d'ozone stratosphérique dépendront également des émissions futures de gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone, qui refroidissent la stratosphère. Les modèles climatiques actuels prédisent que ce refroidissement entraînera une augmentation de l'ozone. À la fin du XXIe siècle, la quantité d'ozone stratosphérique sera donc probablement plus élevée qu'au cours des années 1970, au moment où l'appauvrissement de la couche d'ozone a commencé.

L'intensité du rayonnement UV a très peu changé entre les années 1990 et aujourd'hui. Étant donné que la reconstitution de la couche d'ozone est un processus lent, les niveaux de rayonnement UV observés entre les années 1990 et aujourd'hui sont restés pratiquement constants sur les sites non pollués (**figure Q2-2**). Sur la plupart des sites, les variations annuelles du rayonnement UV sont davantage provoquées par les variations des aérosols et des nuages que par celles de l'ozone stratosphérique. À l'inverse, les modèles climatiques suggèrent que sans le Protocole de Montréal et ses amendements, l'indice UV aurait augmenté de 10 à 20 % aux latitudes moyennes entre 1996 et 2020. Au pôle Sud, l'appauvrissement de la couche d'ozone se serait poursuivi et l'indice UV au printemps aurait plus que doublé au cours de cette période (**figure Q2-2**).

Les gaz à effet de serre et les aérosols influencent la prévision des niveaux de rayonnement UV tout au long du XXIe siècle. Les estimations de l'ozone total, des aérosols et des nuages futurs sont obtenues à partir de modèles « chimiques-climatiques ». Les résultats de ces calculs sont ensuite utilisés comme données d'entrée dans d'autres modèles (appelés modèles de transfert radiatif) qui calculent les changements dans le rayonnement UV au fil du temps. Les résultats des dernières simulations suggèrent que la concentration croissante de gaz à effet de serre aura un impact sur l'ozone total (et donc sur l'indice UV) dans le futur. Pour les simulations où la quantité d'aérosol atmosphérique reste fixe par rapport aux niveaux actuels, l'indice UV aux latitudes moyennes devrait diminuer légèrement de 2015 à 2090 (de 3 % dans l'hémisphère Nord et de 6 % dans l'hémisphère Sud). Les diminutions prévues pour les hautes latitudes sont plus importantes à mesure que le trou dans la couche d'ozone de l'Antarctique et l'appauvrissement de la couche d'ozone de l'Arctique diminueront. Aucun changement significatif de l'indice UV n'est projeté sous les tropiques. Dans les régions actuellement affectées par la pollution atmosphérique, une réduction future des émissions de polluants devrait entraîner une augmentation de l'indice UV. L'ampleur de cette augmentation dépend dans une large mesure des décisions politiques. C'est pourquoi il est difficile de prédire avec fiabilité les variations d'intensité des UV dans les régions fortement affectées par la pollution atmosphérique.

Q3 L'appauvrissement de l'ozone a-t-il modifié le climat et la météo ?

Si l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique n'est pas la principale cause du changement climatique, il a contribué aux changements climatiques et météorologiques dans certaines régions de la Terre. L'effet le plus important a été observé dans l'hémisphère sud, en dehors des tropiques. L'appauvrissement de la couche d'ozone et le changement climatique sont intimement liés car l'ozone et la plupart des substances qui appauvrissent la couche d'ozone sont des gaz à effet de serre. Les variations de leurs concentrations entraînent donc des changements de la température de l'air près de la surface de la Terre. En outre, le trou d'ozone de l'Antarctique a entraîné un déplacement vers le sud des zones climatiques de l'hémisphère sud, avec des effets sur le climat, la météo et l'environnement.

Les substances appauvrissant la couche d'ozone contribuent au réchauffement climatique. Les substances qui appauvrissent la couche d'ozone (SACO) réglementées par le protocole de Montréal (voir l'**introduction**) sont également de puissants gaz à effet de serre. Ils réchauffent donc l'air près de la surface de la Terre en piégeant la chaleur. Au cours de la seconde moitié du XX^{e} siècle, l'effet conjugué de toutes les SACO a été le deuxième plus grand contributeur au réchauffement climatique après le dioxyde de carbone, le gaz à effet de serre le plus puissant. En réduisant les émissions de SACO, le protocole de Montréal a déjà permis d'éviter un réchauffement de 0,5 à 1,0 °C (0,9 à 1,8 °F) dans les régions de latitude moyenne d'Afrique, d'Amérique du Nord et d'Eurasie, et jusqu'à 1,1 °C (2,0 °F) dans l'Arctique. Entre 1955 et 2005, les SACO ont été responsables d'environ un tiers du réchauffement mondial et d'environ la moitié du réchauffement de l'Arctique. Cependant, ces estimations devraient être légèrement révisées à l'avenir. Parce que l'ozone est également un gaz à effet de serre, l'appauvrissement de l'ozone causé par les SACO a tendance à provoquer un refroidissement de la surface de la Terre. L'ampleur de cette réaction de refroidissement n'est pas encore bien comprise.

L'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique influence le climat et les conditions météorologiques. Alors que les SACO réchauffent l'atmosphère près de la surface de la Terre, elles exercent un effet de refroidissement dans la stratosphère. Ce refroidissement est plus prononcé à l'intérieur du trou dans la couche d'ozone de l'Antarctique et entraîne des changements dans les vents qui encerclent l'Antarctique à haute altitude (le vortex polaire stratosphérique). Ces changements de vents affectent également les couches inférieures de l'atmosphère et ont entraîné un déplacement vers le sud des zones climatiques de l'hémisphère sud. En conséquence, les précipitations près de l'Antarctique ont augmenté et la zone sèche subtropicale s'est déplacée vers le sud en été au cours des dernières décennies du XX^{e} siècle. Cela est corrélé à une forte augmentation des précipitations pendant l'été dans le nord de l'Argentine, l'Uruguay, le sud du Brésil, le Paraguay et les régions subtropicales de l'est de l'Australie, tandis que le sud

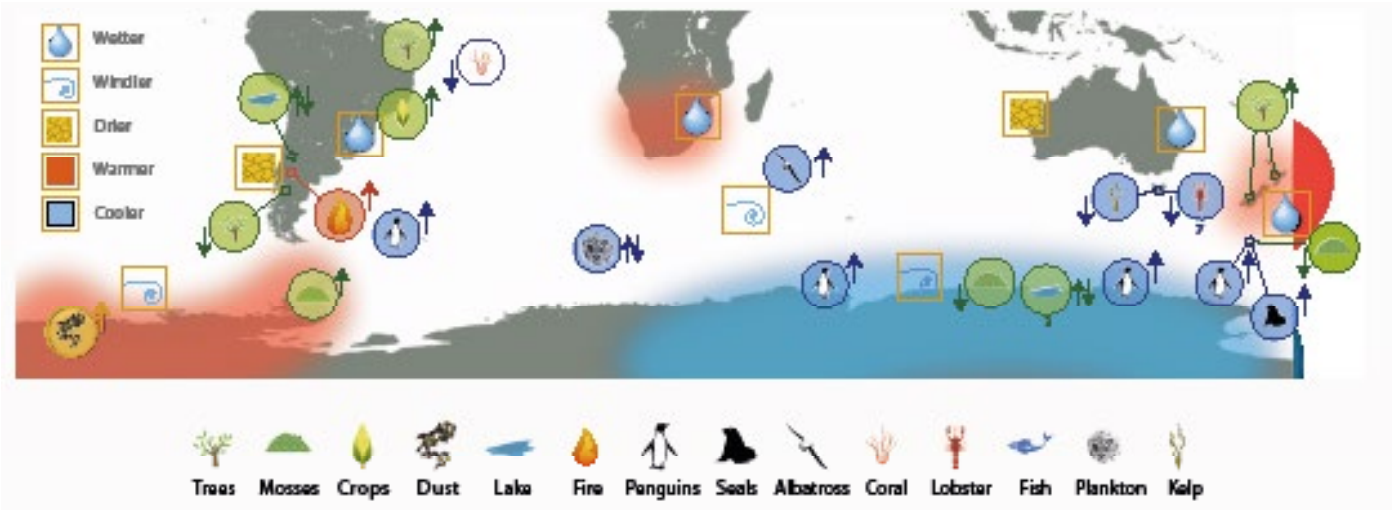


Figure Q3-1. Carte de l'hémisphère sud montrant comment l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique peut avoir affecté le climat et l'environnement, et les effets de ces changements sur les écosystèmes et les populations terrestres. *La carte montre les liens entre l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique et les effets sur l'environnement. Les symboles indiquent les types d'organismes, d'écosystèmes ou d'entités affectés (voir la légende sous la figure). Les flèches indiquent la nature de ces effets sur la biodiversité ; vers le haut = positif, vers le bas = effet négatif. Les flèches à double sens indiquent une modification de la biodiversité. Les ombres rouges et bleues indiquent les régions qui sont devenues plus chaudes ou plus froides, respectivement. Les zones devenues plus humides, plus venteuses et plus sèches sont indiquées par les symboles correspondants. Les mécanismes par lesquels l'appauvrissement de la couche d'ozone intervient dans ces divers changements n'ont pas encore été établis pour tous les indicateurs environnementaux.*

de l'Amérique du Sud est devenue plus sec (**figure Q3-1**). Les changements observés au niveau de la température et des précipitations sont également en corrélation avec l'abondance et la répartition des plantes et des animaux, tels que les manchots et les phoques, et affectent les écosystèmes de l'hémisphère sud. Les changements d'une année à l'autre dans la profondeur et la taille du trou dans la couche d'ozone de l'Antarctique dépendent fortement de la force et de la taille du vortex polaire, qui est également influencé par les changements météorologiques en dehors des régions polaires, par exemple par la température de l'océan Pacifique. En raison des nombreux liens entre les facteurs qui entraînent les changements climatiques, il est difficile de distinguer l'effet de l'appauvrissement de la couche d'ozone des autres facteurs. Par conséquent, l'effet de l'appauvrissement de la couche d'ozone sur les changements des régimes météorologiques régionaux dans l'hémisphère sud n'est pas encore complètement compris.

La reconstitution de l'ozone inverse les tendances climatiques et météorologiques. Les modèles suggèrent que la reconstitution attendue de l'ozone stratosphérique au cours de la première moitié du XXIe siècle inverserait le déplacement des zones climatiques vers les pôles, conduisant plutôt à un mouvement vers l'équateur. Cependant, cette inversion est contrée par l'augmentation attendue des gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone. Si les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre continuent d'augmenter, le mouvement vers les pôles des zones climatiques risque alors de perdurer. Dans la seconde moitié du XXIe siècle, lorsque les SACO seront principalement éliminées de l'atmosphère et que le trou saisonnier dans la couche d'ozone ne se produira plus, les effets des gaz à effet de serre domineront et les zones climatiques se déplaceront davantage vers les pôles. On ne sait toujours pas comment ce changement affecterait les régimes météorologiques en Amérique du Sud, en Afrique du Sud et en Australie en raison des nombreuses rétroactions climatiques (par exemple, les changements dans la glace de mer et la température des océans) qui pourraient se développer au cours des 50 prochaines années.

L'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique a été moins grave en Arctique qu'en Antarctique. Pour cette raison, l'effet de l'appauvrissement de l'ozone arctique sur les conditions météorologiques dans l'hémisphère Nord est moins bien établi. Cependant, il est prouvé que l'appauvrissement exceptionnellement important de la couche d'ozone arctique en mars-avril 2020 a contribué à des températures anormalement élevées en Asie et en Europe au cours des mois qui ont suivi l'événement. Par exemple, la température dans la ville sibérienne de Verhojansk a établi un nouveau record de 38 °C le 20 juin 2020, soit la température la plus élevée jamais enregistrée près du cercle polaire arctique.

Q4 Quels sont les effets nocifs de l'exposition au soleil sur la santé humaine ?

L'exposition aux rayons UV endommage la peau et les yeux. L'exposition de la peau aux rayonnements UV provoque des coups de soleil, le vieillissement de la peau, le cancer de la peau et des affections cutanées inflammatoires. L'exposition des yeux provoque des affections telles que la cataracte et le ptérygion. Les risques sont particulièrement élevés pour les personnes à la peau claire vivant dans des zones où l'intensité du rayonnement UV est très élevée, comme en Australie et en Nouvelle-Zélande.

L'exposition de la peau à la lumière du soleil peut provoquer des coups de soleil et le cancer de la peau. Une surexposition aiguë de la peau aux rayonnements UV solaires provoque des coups de soleil, qui se présentent sous forme de rougeur chez les personnes ayant la peau claire, et peuvent provoquer des douleurs, des cloques et des desquamations. Une exposition répétée à la lumière du soleil peut entraîner un vieillissement de la peau et des cancers de la peau.

Il existe trois cancers de la peau courants causés par l'exposition de la peau aux rayonnements UV. Il s'agit du mélanome, du carcinome épidermoïde et du carcinome basocellulaire. Les carcinomes épidermoïdes et basocellulaires sont collectivement appelés cancers des kératinocytes. Le mélanome est le type de cancer de la peau le plus fatal. Il touche environ 325 000 personnes dans le monde chaque année et provoque environ 57 000 décès. On estime qu'entre 62 % et 96 % des mélanomes sont causés par l'exposition de la peau au soleil, en fonction de l'intensité du rayonnement UV dans un pays spécifique et de la méthode utilisée pour calculer ce pourcentage. Les cancers des kératinocytes peuvent provoquer une défiguration importante, en particulier lorsqu'ils se produisent sur le visage, mais ils sont rarement mortels. Cependant, ils peuvent être mortels chez certaines personnes, en particulier celles qui ont reçu une greffe d'organe ou qui prennent des médicaments qui suppriment leur système immunitaire. En raison de leur fréquence dans certains pays, les cancers des kératinocytes représentent une charge importante pour les systèmes de santé. En Australie, par exemple, ces cancers sont les plus coûteux de tous, avec un coût d'environ 1,3 milliard de dollars australiens par an.

L'exposition au soleil provoque le cancer de la peau en endommageant l'ADN et en affaiblissant le système immunitaire. L'exposition de la peau aux rayons UV provoque le cancer de la peau par de multiples mécanismes (**figure Q4-1**). Le rayonnement UV-B endommage directement l'ADN dans les cellules. Les UV-A et, dans une moindre mesure, les rayonnements UV-B peuvent également endommager indirectement l'ADN par la production d'espèces réactives de l'oxygène générées par des molécules adjacentes. La plupart des lésions de l'ADN sont réparées. Cependant, si la réparation ne se produit pas avant la division cellulaire, la mutation persiste et est transmise aux deux nouvelles cellules qui sont créées par la division cellulaire. Chacune de ces cellules nouvellement créées peut subir d'autres lésions de l'ADN et transmettre ces mutations supplémentaires à leurs cellules filles. Si l'accumulation de mutations de l'ADN se poursuit, les cellules finissent par perdre le contrôle de la division cellulaire et deviennent cancéreuses. Le système immunitaire joue un rôle essentiel dans la reconnaissance et la destruction des cellules cancéreuses, mais malheureusement, l'exposition aux rayonnements UV affaiblit le système immunitaire. Ainsi, le rayonnement UV provoque à la fois les dommages qui conduisent les cellules à devenir cancéreuses et empêche le système immunitaire d'identifier et de détruire les cellules cancéreuses.

On estime que le Protocole de Montréal aura permis de prévenir environ 11 millions de mélanomes et 432 millions de cancers des kératinocytes qui auraient autrement eu lieu aux États-Unis chez les personnes nées entre 1890 et 2100.

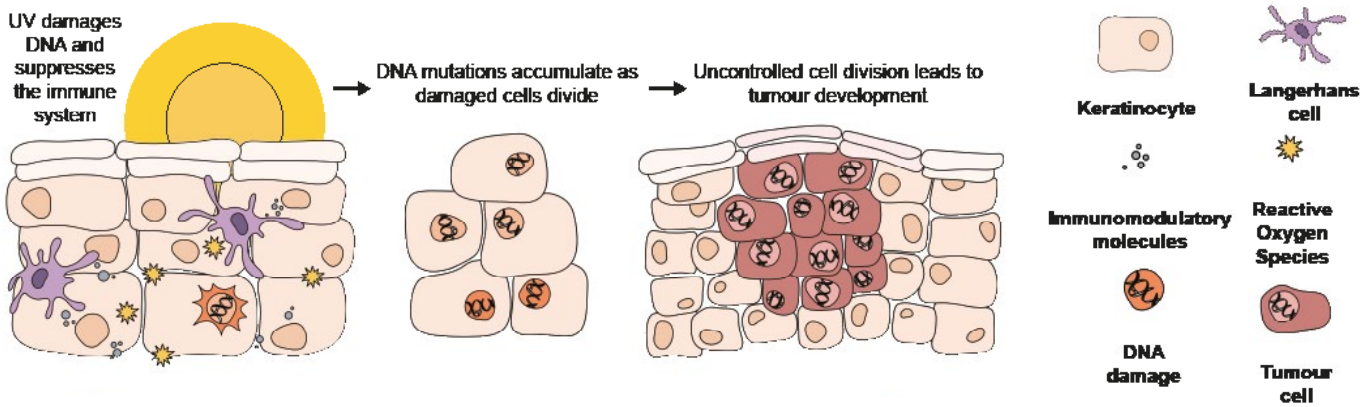


Figure Q4-1. Les rayons UV provoquent le cancer de la peau par divers mécanismes. *Ces mécanismes comprennent les lésions directes de l'ADN, les lésions indirectes par la production d'espèces réactives de l'oxygène et la suppression immunitaire. Les kératinocytes sont des cellules de la couche supérieure de notre peau (l'épiderme). La plupart des cellules de l'épiderme sont des kératinocytes. Les cellules de Langerhans sont des cellules immunitaires qui se trouvent dans la peau. Les molécules immunomodulatrices sont des produits chimiques qui sont régulés à la hausse ou à la baisse par le rayonnement UV, influençant la réponse du système immunitaire aux cellules mutées.*

L'incidence du cancer de la peau varie à travers le monde. Les cancers de la peau sont plus fréquents dans les pays où l'intensité du rayonnement UV est élevée et où de nombreuses personnes ont la peau claire. L'incidence est la plus élevée en Australie et en Nouvelle-Zélande, et la plus faible dans les pays où la plupart des gens ont une peau très pigmentée (**Figure Q4-2**). L'incidence du mélanome en Australie est 228 fois plus élevée qu'en Guinée équatoriale, le pays avec l'incidence la plus faible au monde.

L'incidence du cancer de la peau a évolué au fil du temps. Dans tous les pays où les tendances ont été documentées, l'incidence du cancer de la peau a augmenté au cours des quatre dernières décennies (**Figure Q4-3**). Cette tendance est très probablement attribuable aux changements dans les habitudes d'exposition au soleil jusqu'au milieu du XX^{e} siècle. Les personnes nées entre 1950 et 1980 ont été encouragées à bronzer et la protection solaire n'a pas fait l'objet d'une large promotion. À mesure que ces personnes atteignent l'âge de la quarantaine, le nombre de cancers de la peau qu'elles subissent augmente considérablement. Cependant, dans certains pays, il existe un plateau, voire un déclin, dans les groupes d'âge plus jeunes (**Figure Q4-3**). Cela peut être dû aux campagnes de santé publique qui ont conduit à une utilisation accrue des mesures de protection solaire, telles que la crème solaire, les chapeaux et les vêtements.

L'exposition de la peau au soleil provoque des affections cutanées inflammatoires. Chez certaines personnes, l'exposition de la peau aux rayons UV provoque une réaction excessive du système immunitaire qui conduit à une affection cutanée inflammatoire appelée photodermatose. Il existe plusieurs types de photodermatoses. Les symptômes de chaque affection varient, mais les symptômes classiques sont la douleur cutanée quelques minutes après l'exposition au soleil, de graves démangeaisons, des rougeurs, des cloques et des cicatrices. Ces conditions peuvent avoir un impact négatif sur la qualité de vie des personnes, à la fois en raison des symptômes directs et parce que les personnes doivent limiter considérablement leurs activités de plein air. La fréquence de ces affections n'est pas claire car elles ne sont pas systématiquement documentées dans les registres.

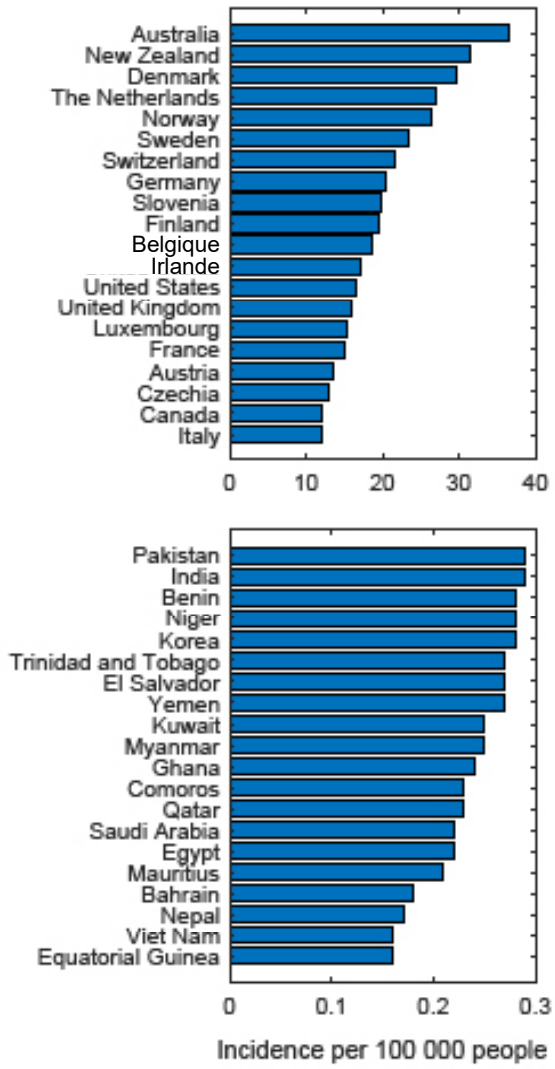


Figure Q4-2. Incidence du mélanome (normalisée par âge à la population standard mondiale) dans les 20 pays avec le taux d'incidence le plus élevé (en haut) et le plus faible (en bas). *Les données sont exprimées en nombre de cas pour 100 000 personnes par an.*

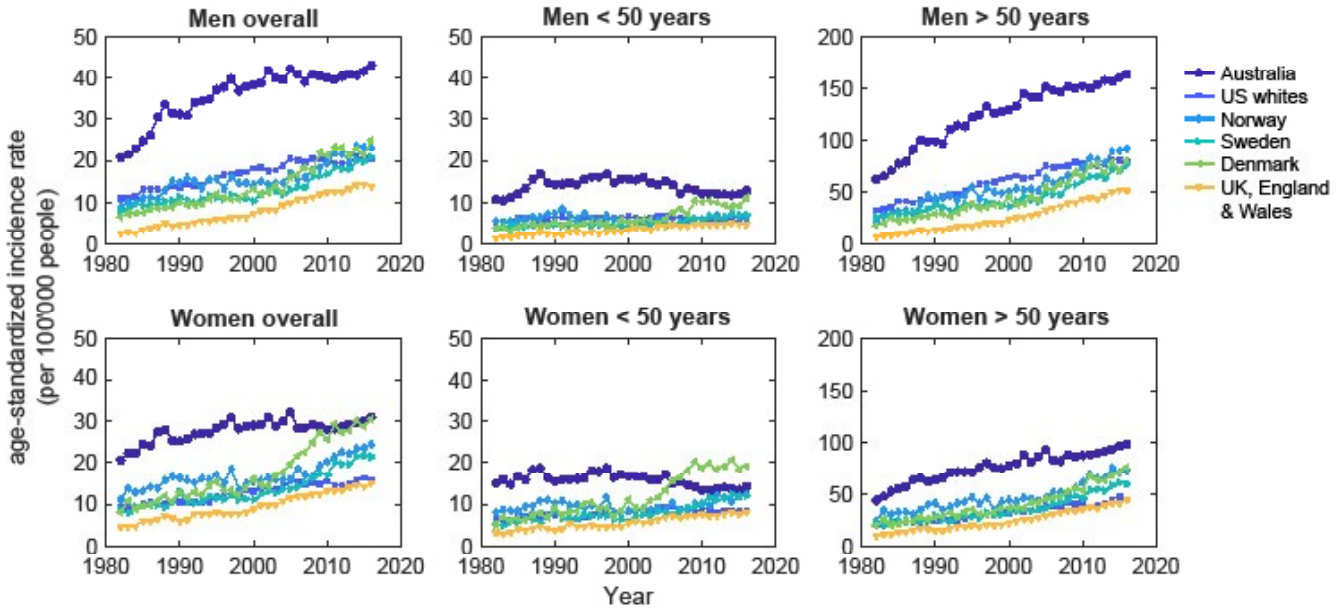


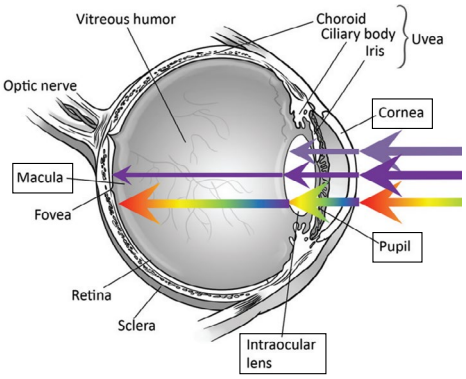
Figure Q4-3. Incidence du mélanome dans six pays à prédominance de populations à la peau claire selon le sexe et l'âge entre 1982 et 2016. *L'axe des y indique le nombre de cas de mélanome pour 100 000 personnes par an (âge normalisé à la population standard mondiale). Notez que les deux graphiques de droite (hommes et femmes > 50 ans) ont un axe des y différent.*

L'exposition au soleil endommage les yeux. Il existe un certain nombre d'affections oculaires causées par l'exposition des yeux au soleil, comme le montre le **tableau 1**. Les mélanomes survenant à l'intérieur de l'œil, la dégénérescence maculaire (qui affecte la rétine à l'arrière de l'œil et provoque une perte de vision) et le glaucome (augmentation de la pression dans l'œil) sont d'autres affections qui peuvent également être influencées par l'exposition des yeux à la lumière du soleil, mais cela n'est pas encore prouvé.

La cataracte est la cause la plus fréquente de perte de vision. Elle est facilement traitable en retirant le cristallin trouble et en le remplaçant par un cristallin artificiel. Néanmoins, il s'agit de la principale cause de cécité dans le monde ; en 2015, elle représentait 35 % de la cécité totale. Entre 1990 et 2019, le fardeau mondial du handicap dû à la cataracte a presque doublé. Dans certains pays d'Asie de l'Est, d'Asie du Sud-Est et d'Afrique subsaharienne, la proportion de déficiences visuelles modérées à graves causées par la cataracte a été estimée supérieure à la moyenne mondiale. Cela peut être dû à la forte intensité du rayonnement UV dans ces pays, combinée à un faible accès au traitement chirurgical.

Tableau Q4-1. Affections oculaires causées par l'exposition des yeux au soleil. *La figure en haut à droite montre un schéma de l'anatomie de l'œil. Les flèches montrent les différentes pénétrations des UV-B, UV-A et du rayonnement visible (de haut en bas) dans l'œil*

Affection	Définition
Cataracte	Opacité du cristallin, entraînant une altération de la vision.
Ptérygion	Une prolifération charnue de conjonctive épaissie (la membrane tapissant l'intérieur des paupières et l'orbite) qui se développe sur la cornée. S'il se développe au niveau de la pupille, un ptérygion peut entraîner des troubles de la vision.
Carcinome épidermoïde de la cornée ou de la conjonctive	Le carcinome épidermoïde est comme un cancer de la peau, mais il se produit à la surface de l'œil.
Photokératite / photoconjonctivite	Ces affections oculaires temporaires douloureuses s'apparentent à un coup de soleil des yeux. La photokératite, également appelée « cécité des neiges », affecte la cornée (la surface de l'œil), tandis que la photoconjonctivite affecte la conjonctive.
Pinguécula	Une pinguécula est une petite croissance surélevée de couleur blanche ou jaune qui se limite à la conjonctive ; elle peut se produire sur le côté interne ou externe de l'œil.



Q5 Quels sont les avantages de passer du temps au soleil ?

L'exposition de la peau aux rayons UV conduit à la production de vitamine D, qui est nécessaire pour maintenir des niveaux adéquats de calcium dans la circulation sanguine. Une faible teneur en vitamine D entraîne une fragilisation des os et augmente le risque de fractures. La vitamine D pourrait jouer un rôle plus général dans la santé. Parmi les autres avantages possibles de l'exposition au soleil, citons la réduction du risque de maladies auto-immunes (par exemple, la sclérose en plaques), l'hypertension artérielle, la myopie et la dépression.

Bien que l'exposition de la peau et des yeux aux rayons UV provoque des dommages importants (voir **Q4**), passer du temps au soleil présente également des avantages importants (**figure Q5-1**). Certains d'entre eux sont transmis par les rayons UV et d'autres par des longueurs d'onde plus importantes, comme la lumière visible. Comme les longueurs d'onde à l'origine de la plupart des effets néfastes et bénéfiques se chevauchent, il peut être difficile de trouver l'équilibre optimal.

L'exposition aux rayons UV conduit à la production de vitamine D. La production de vitamine D est l'avantage le plus connu de l'exposition de la peau aux rayonnements UV-B. Lorsque les rayons UV-B frappent la peau, le 7-déshydrocholestérol, un composé chimique présent dans la peau, est converti en pré-vitamine D_3 (**figure Q5-2**). Ce composé se transforme ensuite en vitamine D_3, qui est transportée par la circulation sanguine vers le foie. Dans le foie, la vitamine D_3 est convertie en un autre produit chimique appelé 25-hydroxyvitamine D (ou 25(OH)D en abrégé). La 25(OH)D a une activité minimale dans le corps, mais elle reste longtemps dans la circulation sanguine et est un bon indicateur du stock de vitamine D de l'organisme. Ce produit chimique est ce que les médecins et les scientifiques mesurent pour déterminer le niveau en vitamine D des personnes. La 25(OH)D est transportée vers le rein où elle est convertie en la forme active de la vitamine D, également appelée calcitriol (**figure Q5-2**). Le calcitriol est en circulation dans le flux sanguin et est particulièrement important pour maintenir une quantité correcte de calcium dans le sang. Le calcitriol permet au calcium d'être absorbé par les aliments et réduit sa sécrétion dans les urines. L'absence de vitamine D adéquate entraîne une fragilisation des os. Chez les enfants, cette affection est appelée rachitisme ; chez les adultes, elle est appelée ostéomalacie.

La vitamine D nous maintient en bonne santé. En plus de maintenir des niveaux de calcium stables et d'avoir des effets importants sur les os et les muscles, la vitamine D joue un rôle supplémentaire dans notre corps : elle contrôle la façon dont les cellules se reproduisent ou meurent, elle influence les voies qui contrôlent la pression artérielle et elle module le système immunitaire. De plus en plus de preuves suggèrent que la vitamine D joue un rôle dans le cancer, les maladies infectieuses et les maladies auto-immunes telles que la sclérose en plaques.

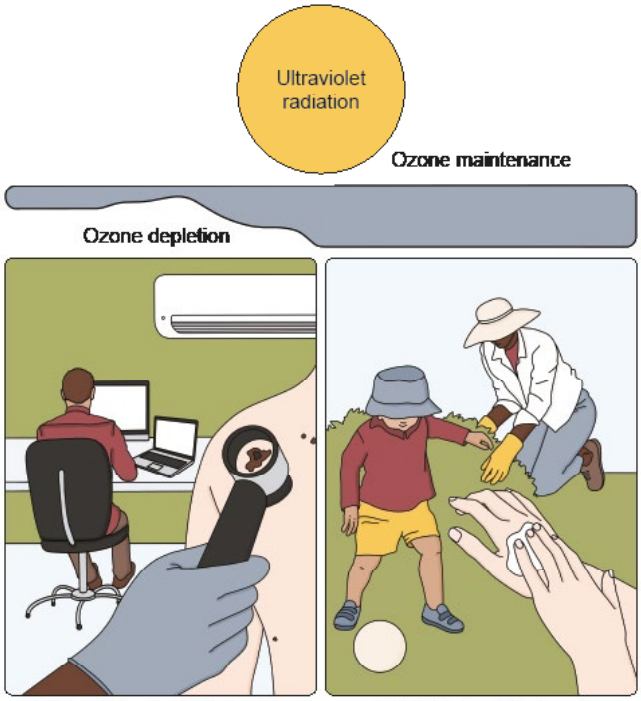


Figure Q5-1. Le protocole de Montréal et ses amendements ont empêché des augmentations excessives de l'intensité du rayonnement UV. *Cela permet aux gens de passer du temps à l'extérieur et de profiter des nombreux avantages du soleil, ce qui n'aurait peut-être pas été possible autrement.*

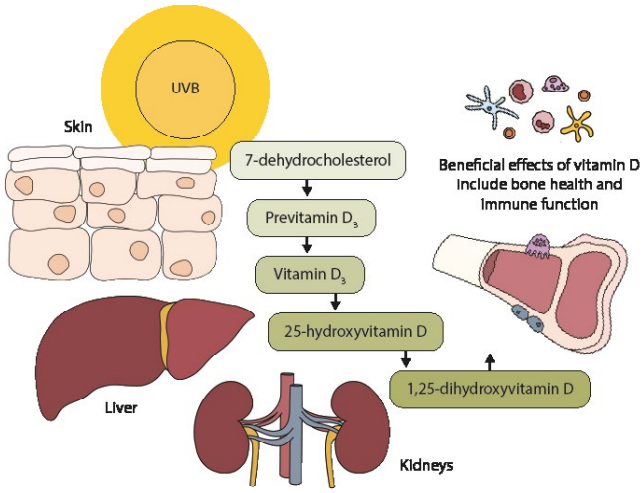


Figure Q5-2. Production de vitamine D dans la peau et formation du produit actif dans le foie et les reins. *Les rayons UV solaires convertissent le 7-déshydrocholestérol en pré-vitamine D_3 dans la peau.*

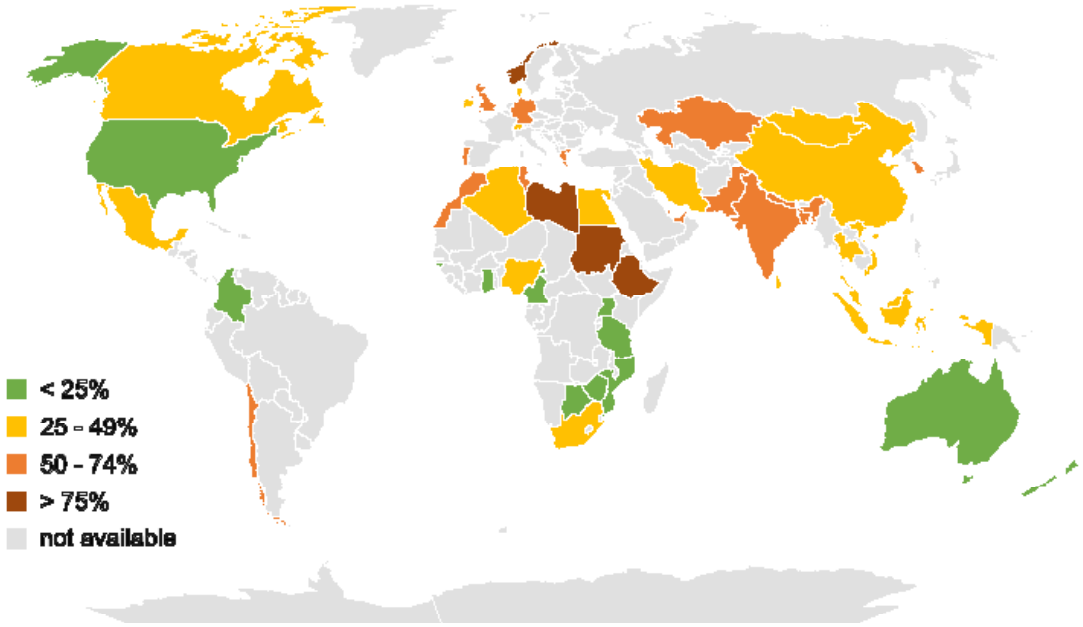


Figure Q5-3. Prévalence de la carence en vitamine D à travers le monde. *Les chiffres indiquent le pourcentage de la population présentant une carence en vitamine D signalée (25(OH)D < 50 nmols par litre).*

Depuis l'émergence de la pandémie de COVID-19, de nombreuses recherches ont été menées sur le rôle possible de la vitamine D dans le risque ou la gravité de la COVID-19. Les preuves sont toujours incohérentes, mais compte tenu des preuves raisonnablement solides d'un rôle positif dans d'autres infections des voies respiratoires et de l'effet sur les cellules immunitaires dans les études sur la souris et en laboratoire, il est prudent d'éviter une carence en vitamine D aux moments où le risque d'infection est élevé.

Une certaine quantité de 25(OH)D est nécessaire dans la circulation sanguine. On ne sait toujours pas combien de 25(OH)D est nécessaire pour maintenir une santé optimale. Cela est en partie dû au fait que les tests de laboratoire utilisés pour mesurer la 25(OH)D ont été inexacts et imprécis. Pour la santé des os, de nombreux experts considèrent qu'une concentration de 50 nanomoles de 25(OH)D par litre est suffisante pour éviter les dommages aux os. Si la 25(OH)D est inférieure à ce seuil, on est considéré comme étant en carence en vitamine D. La plupart des preuves issues de différents types d'études suggèrent que cette concentration est également suffisante pour prévenir d'autres problèmes de santé éventuels.

La prévalence de la carence en vitamine D varie dans le monde, certains pays comptant plus de 75 % de leur population en état de carence en vitamine D (**figure Q5-3**). Toutefois, dans la plupart des pays, il n'y a pas eu d'enquêtes de grande qualité.

Un niveau adéquat en vitamine D peut être maintenu en passant du temps à l'extérieur. La peau humaine produit de la vitamine D très efficacement. Une petite dose de rayons UV-B suffit à satisfaire les besoins de l'organisme, à condition que la peau soit suffisamment exposée (par exemple, en portant une chemise à manches courtes et un short). Il est important de noter que des études montrent que l'utilisation régulière d'un écran solaire ne nous empêche pas de produire la vitamine D dont nous avons besoin. Cependant, le temps nécessaire pour obtenir la dose de rayons UV-B nécessaire pour maintenir une vitamine D adéquate varie considérablement en fonction de la couleur de la peau, de l'emplacement géographique, de la saison et de l'heure de la journée. Dans les zones tropicales et subtropicales, les personnes à la peau claire peuvent produire suffisamment de vitamine D toute l'année avec un peu de temps à l'extérieur (moins de 15 minutes) entre 8 h et 16 h. Dans les régions éloignées de l'équateur, il peut être difficile, voire impossible, de produire suffisamment de vitamine D en hiver. Cela nécessiterait de passer de longues périodes à l'extérieur avec une grande partie de la peau exposée, ce qui est peu réaliste pour la plupart des gens en raison des conditions météorologiques défavorables. Cependant, la vitamine D peut rester dans le corps pendant plusieurs mois, il peut donc être possible de répondre aux besoins tout au long de l'hiver en obtenant une exposition suffisante à la lumière du soleil en d'autres saisons. Par exemple, au Royaume-Uni, les personnes à la peau claire peuvent maintenir un niveau suffisant de vitamine D tout au long de l'année en passant 10 minutes à l'extérieur tous les jours vers midi entre mars et septembre (le bas des jambes et les avant-bras étant découverts de juin à août, et seuls les mains et le visage étant découverts de mars à mai et en septembre). Les personnes ayant la peau brun foncé ou noire ont besoin de plus de temps à l'extérieur (1,5 à 3 fois plus, bien que ce nombre soit incertain) pour répondre à leurs besoins en vitamine D par la lumière du soleil par rapport aux personnes ayant la peau claire.

Il existe d'autres avantages à exposer la peau aux rayonnements solaires, au-delà de la production de vitamine D. L'exposition de la peau aux rayons UV est bénéfique pour notre santé, indépendamment de la vitamine D. Certains de ces avantages sont véhiculés par les effets positifs des rayons UV sur le système immunitaire dans son ensemble. En particulier, les rayonnements UV suppriment les voies du système immunitaire qui conduisent à des maladies auto-immunes telles que la sclérose en plaques et le diabète de type 1. Il existe également des preuves que le rayonnement UV peut libérer des substances chimiques dans la peau qui peuvent réduire le risque d'hypertension artérielle et de maladies métaboliques, telles que l'obésité et le diabète sucré de type 2. Cependant, ces avantages doivent encore être prouvés.

Le fait de passer du temps à l'extérieur permet de bénéficier d'autres avantages liés aux longueurs d'onde du rayonnement solaire autres que le rayonnement UV. La lumière visible aide à maintenir le rythme circadien, ce qui est important pour le sommeil, l'humeur et la concentration. Il existe également un lien entre le temps passé à l'extérieur et le développement de la myopie chez les enfants, une plus grande exposition à la lumière entraînant une diminution des taux de myopie.

Q6 Quels sont les effets du rayonnement UV-B sur les plantes et les écosystèmes terrestres ?

Selon la quantité à laquelle une plante est exposée, le rayonnement UV-B a des effets à la fois positifs et négatifs sur la productivité des plantes, la production et la qualité des cultures agricoles et la biodiversité des écosystèmes terrestres. Les interactions entre le changement climatique et l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique affectent de manière significative la façon dont les plantes réagissent au rayonnement UV-B, avec des implications pour la santé et les services écosystémiques, et la sécurité alimentaire.

Le rayonnement UV-B a divers effets sur les plantes. Les plantes ont besoin de la lumière du soleil pour leur croissance et leur reproduction, mais cela signifie également qu'elles sont exposées à des quantités importantes de rayonnement UV-B au cours de leur vie. Des niveaux élevés de rayonnement UV-B, comme cela aurait été le cas sans le protocole de Montréal, peuvent endommager des molécules importantes (comme l'ADN, les protéines et les lipides) et inhiber la photosynthèse, la croissance et la reproduction (**Figure Q6-1**). Ces effets auraient probablement réduit la capacité des plantes à éliminer le dioxyde de carbone (CO_2) de l'atmosphère par la photosynthèse, ce qui aurait entraîné des changements climatiques plus graves. Aux niveaux actuels de rayonnement UV-B, la productivité agricole et la sécurité alimentaire ne sont probablement pas menacées, car la plupart des plantes disposent de mécanismes de protection leur permettant de tolérer le rayonnement UV-B.

Les plantes s'adaptent aux variations des niveaux de rayonnement UV-B. Les plantes sont protégées des effets nocifs du rayonnement UV-B par plusieurs mécanismes. L'un des plus courants est la production et l'accumulation de pigments de protection solaire dans leur tissu épidermique (c'est-à-dire leur « peau »), ce qui minimise la quantité de rayonnement UV-B qui atteint des molécules sensibles comme l'ADN. La quantité d'écrans solaires augmente avec l'exposition au rayonnement UV-B, et certaines plantes peuvent rapidement ajuster la production de ces pigments en réponse aux variations quotidiennes et saisonnières du rayonnement UV-B (**Figure Q6-2**). Les mécanismes de protection additionnels comprennent l'augmentation de l'épaisseur des feuilles et la réparation efficace des lésions de l'ADN.

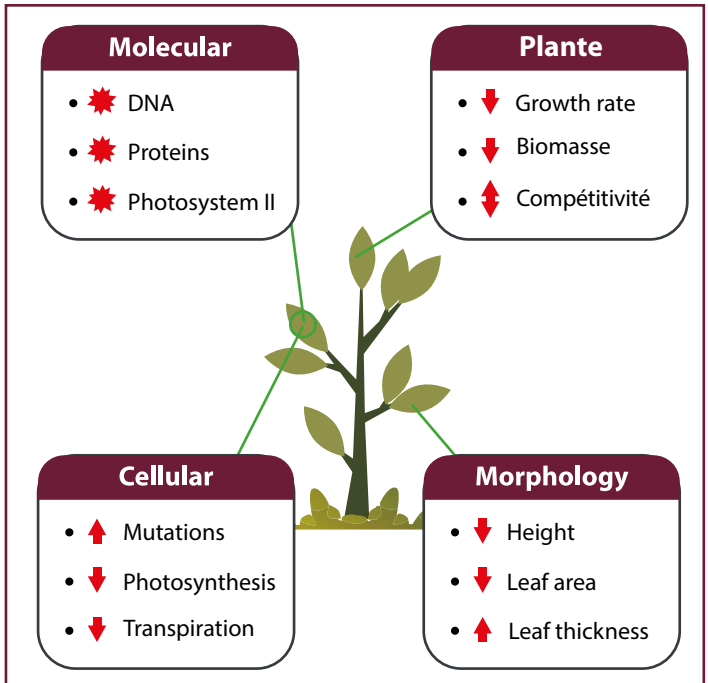


Figure Q6-1. Effets potentiels des niveaux élevés de rayonnement UV-B sur les plantes. *L'icône d'explosion rouge indique des dommages causés par les UV sur l'ADN, les protéines et le photosystème II. Les flèches rouges indiquent une diminution et une augmentation de l'effet sur les caractéristiques ou le processus de la plante.*



Figure Q6-2. Des roches incrustées de mousses et de lichens près de la station Casey dans l'Antarctique oriental. *Au début de l'été, les mousses antarctiques sortent de sous la neige et peuvent être exposées à des niveaux élevés de rayonnement UV-B. Lorsque les mousses apparaissent pour la première fois, elles sont d'une couleur vert vif. Les mousses situées dans des zones protégées, comme sous l'eau de fonte ou dans de petites dépressions, resteront vertes. En revanche, les mousses situées sur les crêtes exposées accumulent rapidement des pigments protecteurs contre le soleil, comme le montre la couleur brun-rouge de cette photographie.*

Le rayonnement UV-B a des effets à la fois néfastes et bénéfiques sur les cultures agricoles. Le rayonnement UV-B affecte la composition chimique de divers organes végétaux. Ces changements peuvent altérer la qualité alimentaire des cultures et le contenu pharmaceutique des plantes médicinales. Certaines de ces variations chimiques sont bénéfiques pour l'homme et le bétail, tandis que d'autres réduisent la digestibilité des plantes (**Figure Q6-3a**). Par exemple, dans certaines cultures, le rayonnement UV-B peut augmenter la quantité de flavonoïdes, qui sont bénéfiques pour la santé en raison de leurs propriétés antioxydantes. Ces variations de la composition chimique peuvent renforcer la tolérance des plantes à la sécheresse et aux températures extrêmes et renforcer leurs défenses contre les parasites et les agents pathogènes. Ce sont des défenses

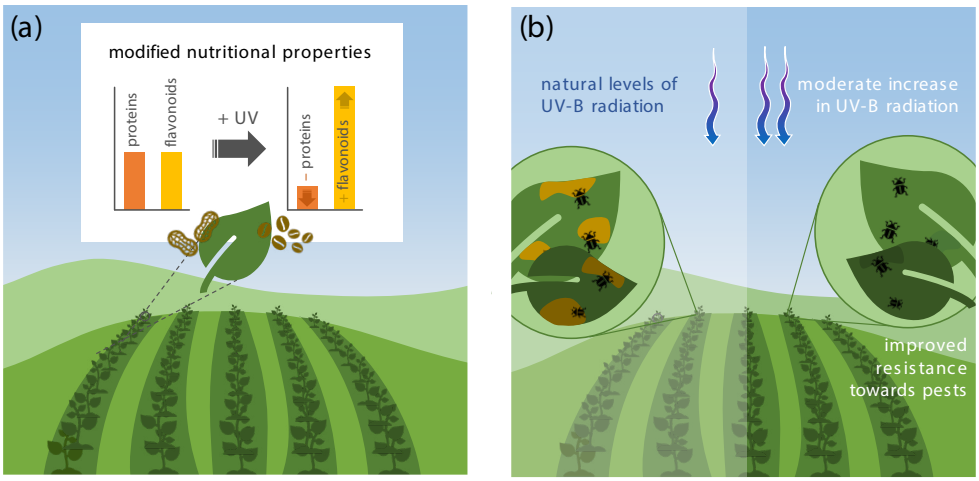


Figure Q6-3. Effets bénéfiques du rayonnement UV sur les cultures agricoles. *(a) Le rayonnement UV modifie les propriétés nutritionnelles des cultures et (b) peut améliorer leur résistance aux parasites.*

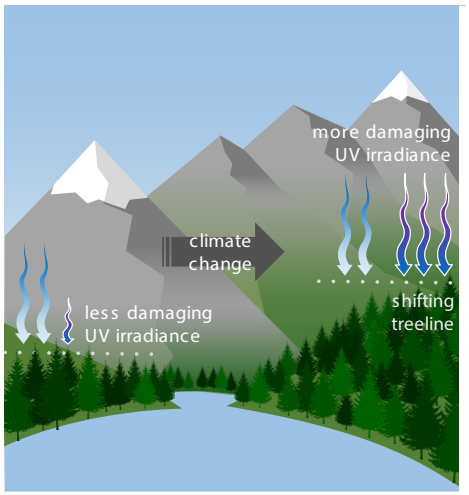


Figure Q6-4. Effets du rayonnement UV sur la répartition des espèces et les écosystèmes. *L'augmentation des températures résultant des changements climatiques entraîne le déplacement des plantes vers des altitudes plus élevées, où les niveaux de rayonnement UV-B sont plus élevés.*

indirectes contre le rayonnement UV-B dans les écosystèmes agricoles (**Figure Q6-3b**).

Le rayonnement UV-B a un impact sur les écosystèmes avec de potentiels effets négatifs sur la biodiversité. La quantité de rayonnement UV-B à laquelle les cultures et les plantes sauvages sont exposées n'est pas seulement due à l'ozone stratosphérique, mais aussi au changement climatique. En réponse à l'augmentation des températures, de nombreuses espèces végétales se déplacent vers des altitudes plus élevées (donc vers un environnement avec des niveaux plus élevés de rayonnement UV-B (**Figure Q6-4**)) ; ou vers des latitudes plus élevées (où, d'autre part, les niveaux de rayonnement UV-B sont plus faibles). Ces changements en termes de répartition des espèces végétales dans les écosystèmes peuvent modifier la chimie des plantes et les modèles de croissance, affecter la façon dont les plantes et les insectes interagissent et modifier la structure de la végétation. Considérés de manière globale, ces changements peuvent réduire la biodiversité.

La plupart des organismes peuvent s'adapter à des niveaux élevés de rayonnement UV-B, mais les changements climatiques peuvent compromettre leur survie. Les régions polaires, les montagnes de haute altitude et les tropiques sont les écosystèmes les plus susceptibles d'être touchés de manière négative par les variations du rayonnement UV-B induites par le changement climatique. En raison de leurs niveaux naturellement élevés de rayonnement UV-B, les plantes vivant dans ces environnements ont développé des mécanismes de protection contre le rayonnement UV. Cependant, l'effet conjugué du rayonnement UV-B et du changement climatique peut constituer une menace importante pour leur survie en raison des mécanismes dévastateurs d'acclimatation et d'adaptation aux conditions changeantes. Par exemple, le changement climatique entraîne moins de chutes de neige aux hautes latitudes et en haute altitude. Certaines plantes sont donc vulnérables aux rayons UV-B (car elles ne sont pas protégées par une « couverture » de neige) et à des conditions environnementales défavorables (car la neige maintient des températures stables dans le sol) à des périodes de l'année où elles peuvent être mal équipées pour s'acclimater à ces changements. Ce phénomène est évident, par exemple, dans certaines zones de la toundra de l'Extrême-Arctique et en Antarctique.

Q7

Le rayonnement UV-B affecte-t-il les rivières, les lacs et les océans ?

Le rayonnement UV-B de la lumière du soleil peut pénétrer dans les eaux des rivières, des lacs et des océans, où il affecte de nombreux organismes et composés chimiques. Il existe d'énormes variations dans l'exposition sous-marine aux rayonnements UV qui sont contrôlées par des facteurs tels que la latitude, l'altitude, la profondeur, la couverture de glace et la clarté de l'eau. L'effet net du rayonnement UV-B dépend à la fois de la quantité d'exposition au rayonnement UV, de la sensibilité de l'organisme ou du produit chimique et des mécanismes que les organismes ont mis au point pour se protéger contre les dommages causés par le rayonnement UV-B. Le changement climatique modifie la pénétration du rayonnement UV dans l'eau en régissant la couverture de glace, le mélange et la clarté de l'eau.

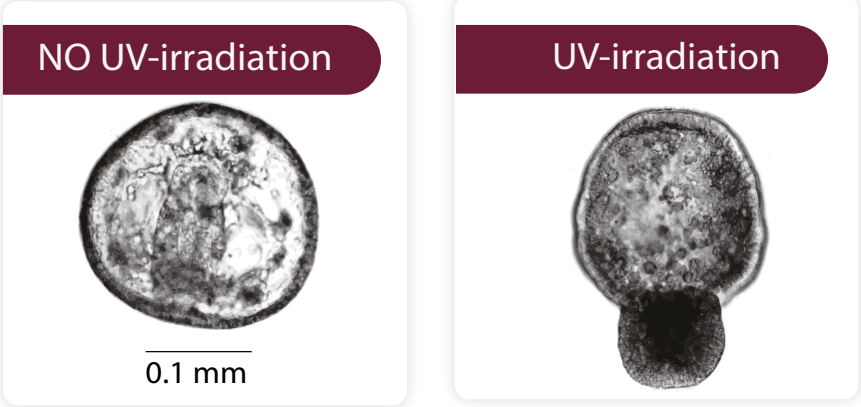
Le rayonnement UV-B pénètre dans l'eau. La couleur et la clarté contrôlent la pénétration du rayonnement UV dans l'eau et peuvent varier considérablement selon les différents types de plans d'eau (par exemple, les rivières, les lacs et les océans). La concentration de matière organique dissoute est souvent le plus grand facteur régulant de la clarté de l'eau. Des concentrations élevées de matière organique dissoute donnent une teinte brune aux plans d'eau, un peu comme la couleur du thé ou du café. La concentration de matière organique dissoute peut être élevée dans les lacs, les étangs et les zones côtières entourés de forêts et de zones humides abondantes, où le rayonnement UV-B pénètre souvent à moins d'un mètre sous l'eau. Dans une eau plus claire, où la concentration de matière organique dissoute est faible, le rayonnement UV-B peut pénétrer à des profondeurs substantielles, parfois des dizaines de mètres ou plus. Dans la plupart des eaux, la concentration de matière organique dissoute et la profondeur à laquelle le rayonnement UV-B pénètre se situent entre ces extrêmes et varient selon les saisons et la quantité de neige ou de pluie.

Le rayonnement UV-B affecte les organismes aquatiques et la chimie de l'eau. Lorsque les organismes sont exposés à des niveaux élevés de rayonnement UV-B, des composants cellulaires importants tels que les protéines, l'ADN et les lipides peuvent être endommagés. À son tour, ce processus peut réduire la croissance et la reproduction, ou dans les cas graves, entraîner la mort. Par exemple, le développement des embryons d'oursin peut être gravement affecté, entraînant un développement anormal (**figure Q7-1**). Des quantités élevées de rayonnement UV-B peuvent également réduire la virulence des agents pathogènes et des parasites ou les tuer. Les organismes unicellulaires ou de petite taille qui n'ont pas de coquille ou de structure cutanée sont particulièrement vulnérables. Les œufs de poisson et les jeunes poissons (larves) peuvent également être sensibles aux rayonnements UV (UV-B et UV-A). Par ailleurs, les poissons adultes ne sont généralement pas sensibles aux dommages causés par les UV, mais certains d'entre eux peuvent développer un cancer de la peau dans des environnements à forte exposition aux UV. Les organismes vivant dans des eaux à faible niveau de rayonnement UV sous-marin (comme les zones côtières) sont souvent plus sensibles au rayonnement UV que ceux qui vivent au large et qui sont adaptés à des niveaux plus élevés de rayonnement UV.

Les organismes ont évolué pendant des milliards d'années et disposent d'un large éventail d'outils pour s'adapter aux rayonnements UV-B. Certains organismes aquatiques peuvent voir le rayonnement UV et éviter les zones où les dommages causés par les UV sont élevés. De plus, certains organismes peuvent fabriquer ou consommer des pigments qui les protègent des dommages causés par les UV, de la même manière que la peau humaine peut s'assombrir lorsqu'elle est exposée à la lumière du soleil (en raison de la production de mélanine). Ces caractéristiques et mécanismes d'adaptation permettent à de nombreux types d'organismes aquatiques de faire face à des niveaux de rayonnement UV qui pourraient autrement leur être préjudiciables.

De la même manière que le rayonnement UV peut atténuer la couleur des matériaux laissés à l'extérieur (voir **Q11**), l'exposition au rayonnement UV décompose les substances et modifie la chimie du monde naturel. Sous l'eau, le rayonnement UV conduit à la décomposition de la matière végétale et animale morte (appelée « matière organique »). Le rayonnement UV peut également décomposer les polluants pétroliers. Ce processus de décomposition libère souvent du dioxyde de carbone dans l'air. Il peut également stimuler les bactéries à décomposer davantage la matière organique, libérant ainsi plus de dioxyde de carbone.

Figure Q7-1. Effet de l'exposition au rayonnement UV sur les embryons de l'oursin vert Strongylocentrotus droebachiensis. *La photo de gauche montre un embryon normal (non exposé au rayonnement UV), tandis que l'embryon de droite présente un développement anormal à la suite de l'exposition au rayonnement UV.*



Q8 Le changement climatique modifie-t-il les effets du rayonnement UV-B sur le milieu aquatique ?

L'augmentation des températures et les modifications des régimes météorologiques dues au changement climatique influent sur l'impact du rayonnement UV-B sur les milieux aquatiques. Les scientifiques ont identifié plusieurs mécanismes à l'origine de ce phénomène, notamment des modifications de la couverture de glace, de la circulation de l'eau dans les océans et les lacs, ainsi que de la transparence de l'eau au rayonnement UV-B.

La couverture de glace diminue sur les lacs et les océans. Lorsqu'elle est présente, la couverture de glace protège l'eau de l'exposition aux rayonnements UV. Cependant, la couverture de glace a diminué dans les océans polaires ainsi que sur de nombreux lacs qui, par le passé, gelaient au moins de façon saisonnière. Par exemple, le minimum annuel de couverture de glace est passé de 63 % à 41 % de l'océan Arctique entre 1996 et 2022. La couverture actuelle est de 25 % inférieure à la médiane à long terme (**figure Q8-1**). Des températures plus élevées signifient également qu'un plus grand nombre d'étangs se forment à la surface de la glace, ce qui augmente la pénétration du rayonnement UV à travers la glace restante, amplifiant encore les niveaux de rayonnement UV sous l'eau.

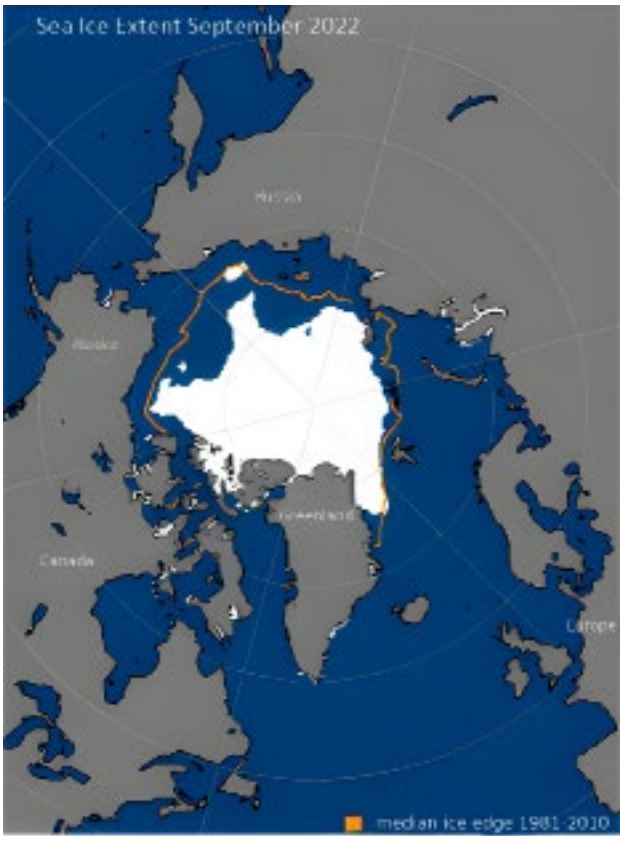


Figure Q8-1. Diminution de la glace de mer dans l'Arctique. *Carte de la couverture de glace au minimum saisonnier en septembre 2022 (zone blanche) par rapport à la limite médiane de la glace en septembre pour les années 1981 à 2010 (ligne orange). Le rayonnement UV-B pénètre maintenant dans l'océan Arctique dans des zones qui étaient auparavant protégées.*

La profondeur de la couche mixte est en train de changer. Le vent mélange les eaux de surface de la plupart des plans d'eau. Cette couche d'eau est appelée « couche mixte ». Les organismes et substances flottant dans cette zone sont régulièrement mélangés et sont exposés au rayonnement UV-B lorsqu'ils passent près de la surface (**figure Q8-2**). Un mélange plus profond entraîne une exposition plus faible aux rayonnements UV-B (en moyenne), tandis qu'un mélange moins profond augmente l'exposition aux rayonnements UV-B. Les changements climatiques ont modifié la profondeur de la couche mixte dans de nombreux plans d'eau, modifiant ainsi l'exposition aux rayonnements UV-B. Par exemple, dans les océans, la couche mixte est devenue plus profonde dans de nombreuses régions, réduisant ainsi l'exposition moyenne au rayonnement UV-B dans la couche.

Les concentrations de matière organique dissoute augmentent. Au cours des deux dernières décennies, les concentrations de matière organique dissoute ont augmenté dans de nombreux plans d'eau dans des régions telles que le nord-est des États-Unis et le nord-ouest de l'Europe, réduisant ainsi la pénétration du rayonnement UV et l'exposition sous-marine au rayonnement UV. L'augmentation régionale des précipitations (par exemple, les chutes de pluie, le réchauffement des températures et les événements extrêmes tels que les tempêtes violentes amplifient les apports en matières organiques dissoutes et en d'autres substances absorbant la lumière dans les rivières, les lacs et les zones côtières. Les changements climatiques en cours sont susceptibles de réduire encore le rayonnement UV sous-marin dans les années à venir.

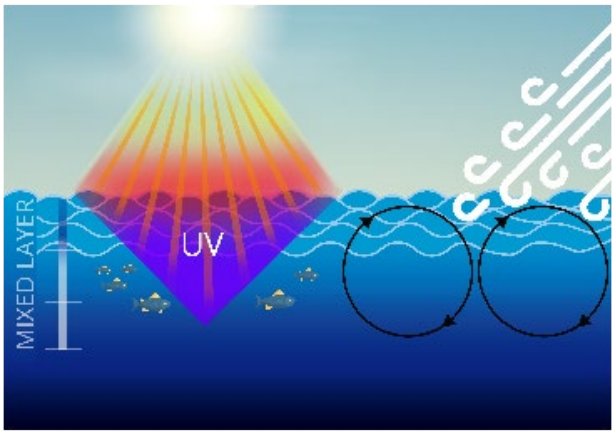


Figure Q8-2. Schéma d'une colonne d'eau de lac ou d'océan. *Les cercles noirs indiquent la profondeur à laquelle le vent mélange l'eau. Les vents se sont intensifiés au-dessus des océans et, dans de nombreuses régions, les eaux de surface se mélangent aujourd'hui sur une profondeur plus grande qu'il y a quelques dizaines d'années.*

Q9 Les changements dans le rayonnement UV peuvent-ils affecter la qualité de l'air ?

À l'échelle mondiale, la pollution de l'air extérieur serait responsable de plus de 4 millions de décès prématurés chaque année. La pollution de l'air endommage également les cultures, entraînant une réduction du rendement estimée à 10 %. Le danger posé par la pollution de l'air dépend de la nature et des quantités des composés qui sont émis dans l'atmosphère ainsi que de leur interaction avec le rayonnement UV et les changements climatiques. L'impact net sur la qualité de l'air dépend de l'évolution de tous ces facteurs.

La mauvaise qualité de l'air constitue un risque mondial important pour la santé humaine. L'air que nous respirons contient un mélange complexe de composés qui peuvent être affectés par les rayons UV. Ces composés comprennent des substances chimiques libérées directement dans l'atmosphère, telles que les oxydes d'azote (NOx) issus de la combustion, et des composés organiques volatils (COV) provenant de sources aussi diverses que les plantes et les peintures. D'autres produits chimiques, comme l'ozone (O_3) et les COV oxydés, sont formés dans l'atmosphère dans des processus alimentés principalement par le rayonnement UV solaire (**figure Q9-1**). Les variations de l'ozone stratosphérique et du changement climatique ont un impact sur la production et le devenir de ces polluants atmosphériques.

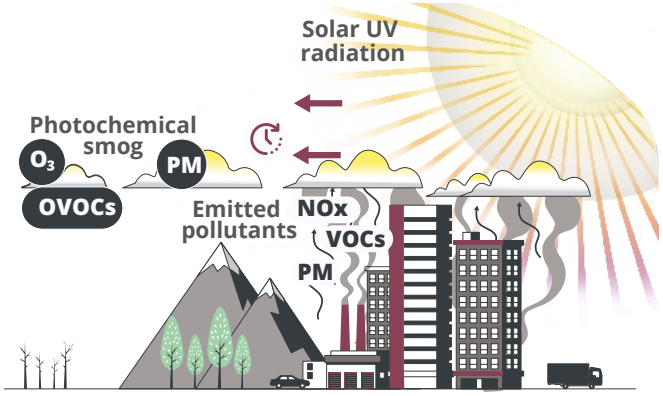


Figure Q9-1. Qu'est-ce que la qualité de l'air ? *La qualité de l'air est une façon de résumer à quel point l'air que nous respirons est sain. Les activités humaines libèrent de nombreuses substances chimiques dans l'atmosphère, notamment des composés organiques volatils (COV), des oxydes d'azote (NOx) et des particules (PM). Dans l'atmosphère, le rayonnement UV solaire peut les transformer en une gamme d'autres composés, notamment des particules dangereuses supplémentaires, des COV oxydés (OVOC) et de l'ozone (O_3). À terme, le rayonnement solaire élimine les polluants atmosphériques, mais cela peut prendre beaucoup de temps.*

Les particules minuscules ($PM_{2,5}$, particules inférieures à 2,5 µm) sont considérées comme la plus grande menace pour la santé humaine due à l'air pollué. Des estimations récentes ont montré qu'aux États-Unis, plus de la moitié de la masse de ces particules est générée par des processus induits par le rayonnement solaire UV.

En plus de former des particules, le rayonnement UV solaire déclenche de nombreuses autres réactions chimiques impliquées dans la formation du smog, notamment la génération d'ozone au niveau du sol (également appelé ozone troposphérique), qui a également un impact significatif sur la santé humaine et végétale. Le rayonnement UV-B est également impliqué dans la destruction de l'O_3 au niveau du sol, un processus qui génère des radicaux hydroxyle, le principal agent de nettoyage de la troposphère. Les radicaux hydroxyles réagissent avec des composés tels que les COV, les NOx et le dioxyde de soufre dans des réactions qui régénèrent souvent l'ozone. Ce cycle complexe est modifié par tout facteur qui influence la quantité de rayonnement UV, tel que les nuages et l'O_3 stratosphérique.

Changements attendus dans l'ozone troposphérique à la suite du protocole de Montréal. Les augmentations de la concentration d'O_3 stratosphérique résultant de la mise en œuvre du protocole de Montréal et du changement climatique devraient réduire la concentration d'ozone au niveau du sol dans les régions polluées, ce qui tend à améliorer la qualité de l'air. Par ailleurs, la qualité de l'air dans les zones moins polluées devrait se dégrader en raison d'une augmentation de l'ozone au niveau du sol. **La figure Q9-2** montre les changements attendus dans l'ozone troposphérique dans l'ouest des États-Unis, causés par une augmentation de 5 % de l'O_3 stratosphérique. Bien que ceux-ci ne soient pas négligeables, des changements plus importants sont possibles en réduisant les émissions de NOx et de COV.

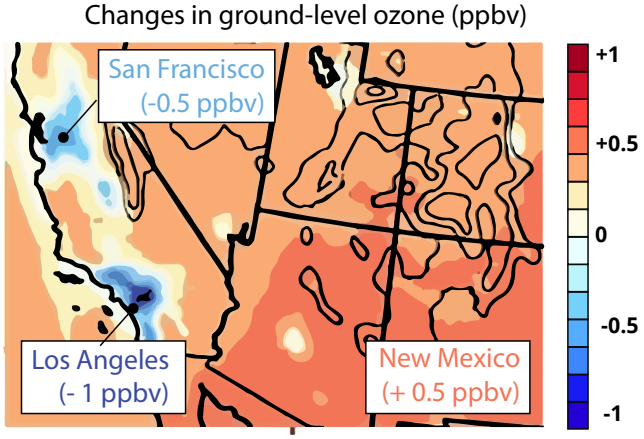


Figure Q9-2. Changement attendu dans l'ozone troposphérique à la suite de la reconstitution de l'ozone stratosphérique. *L'augmentation de l'ozone stratosphérique (O_3) réduira le rayonnement UV-B à la surface de la Terre, modifiant la production et la destruction de l'O_3 au niveau du sol. La figure montre que dans l'ouest des États-Unis, l'O_3 au niveau du sol (en parties par milliard en volume, ppbv) devrait diminuer dans les grandes zones urbaines et augmenter ailleurs en raison d'une augmentation de 5 % de l'O_3 stratosphérique.*

Q10 Les produits chimiques qui remplacent les substances existantes réduisant la couche d'ozone apporteront-ils de nouveaux problèmes environnementaux ?

Les nouveaux produits de remplacement des substances qui appauvrissent la couche d'ozone font l'objet de tests de sécurité pour l'homme et l'environnement avant que leur utilisation ne soit approuvée, et peu de problèmes ont été observés jusqu'à présent. Cependant, il faut éviter toute complaisance et appliquer une gestion responsable de ces substances.

Les substances qui appauvrissent la couche d'ozone et leurs substituts ont un effet sur le climat et l'environnement. À l'origine, les chlorofluorocarbones (CFC) et les halons, largement utilisés comme réfrigérants et à diverses autres fins, étaient considérés comme sans danger pour l'environnement, mais il s'est avéré que ce n'était pas le cas. Une fois dans la stratosphère, ces substances libèrent du chlore et du brome, qui détruisent l'ozone stratosphérique. En outre, les CFC sont des gaz à effet de serre et contribuent au réchauffement climatique. Lorsque les hydrofluorocarbures (HFC) ont été proposés comme substituts aux CFC dans les années 1980, en réponse au protocole de Montréal, le potentiel de réchauffement global de ces substances chimiques commençait à peine à être pris en compte. Une fois que leurs potentiels de réchauffement global ont été reconnus, il était clair que les HFC ne pouvaient être qu'une solution à court terme.

Les produits de dégradation des substances appauvrissant la couche d'ozone et de leurs substituts peuvent s'accumuler dans l'environnement. Les substituts actuels aux CFC (tels que les hydrocarbures et les hydrofluorooléfines) ont moins d'effet sur la couche d'ozone stratosphérique et sur le climat que les HFC. En effet, ils sont dégradés avant d'atteindre la stratosphère et ont un faible potentiel de réchauffement global. Cependant, l'acide trifluoroacétique (TFA), le produit ultime de la dégradation atmosphérique de plusieurs de ces produits chimiques (**figure Q10-1**, 1), a suscité des inquiétudes en raison de sa persistance dans l'environnement. Le TFA est très soluble dans l'eau et est éliminé de l'atmosphère par précipitation (**figure Q10-1**, 2 - 3). Lorsqu'il atteint la terre, le TFA se combine avec des minéraux dans le sol et l'eau pour former des sels de TFA (**figure Q10-1**, 4), qui s'écoulent dans les eaux de surface sur terre et dans les océans (**figure Q10-1**, 5). Dans les endroits où il y a peu ou pas d'écoulement d'eau et une forte évaporation (océans et lacs salés), la concentration de sels de TFA augmentera au fil du temps. Cependant, pour les lacs et les océans, les effets de l'augmentation des concentrations de sels minéraux naturels, tels que le chlorure de sodium, et d'autres minéraux hydrosolubles sont plus importants et plus significatifs sur le plan biologique que ceux causés par les sels de TFA. Les sels de TFA dans le sol sont absorbés par les racines des plantes et se concentrent dans les feuilles, où ils semblent n'avoir aucun effet. Si les animaux mangent les feuilles, le TFA est rapidement excrété et ne s'accumule pas dans leur corps ou dans la chaîne alimentaire.

Sur la base des connaissances actuelles, les produits de dégradation ne posent pas de problèmes environnementaux. Sur la base des estimations de l'utilisation actuelle et future des HFC et d'autres substituts aux CFC, les apports supplémentaires de TFA dans l'océan n'augmenteront que légèrement (moins de 0,5 % par an) les quantités qui ont été présentes dans le passé. Aujourd'hui et dans un avenir lointain, les concentrations prévues de TFA dans les eaux de surface et les bassins terminaux sont des milliers de fois inférieures aux seuils préoccupants pour la santé humaine ou environnementale. Cependant, le TFA est également produit par la dégradation de nombreux autres produits fabriqués par l'homme tels que les plastiques, les pesticides et les produits pharmaceutiques. Comme il persiste dans l'environnement, ces sources supplémentaires soulignent la nécessité d'une surveillance continue des concentrations de TFA et de la prise en compte des effets environnementaux potentiels.

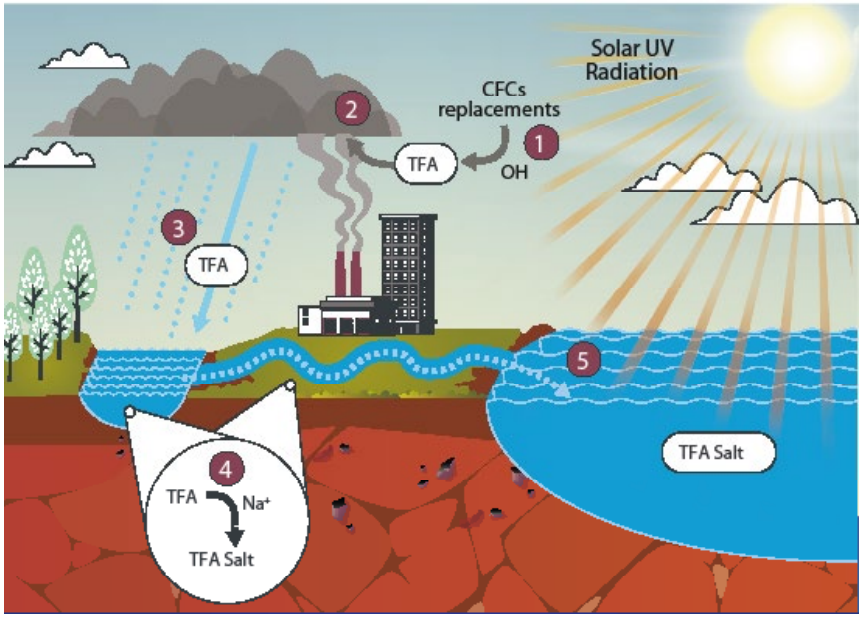


Figure Q10-1. D'où vient l'acide trifluoroacétique (TFA) et où va-t-il ? *Le TFA est formé par la destruction d'une gamme de gaz fluorés dans l'atmosphère (1). Une fois formé, il se dissout rapidement dans l'eau des nuages (2) et atteint la surface de la Terre par la pluie ou la neige (3). Après contact avec le sol ou les eaux naturelles, il forme des sels avec des ions métalliques tels que le sodium (4). Ceux-ci s'écoulent ensuite avec les eaux de surface jusqu'à atteindre un bassin terminal (par exemple, les lacs salés) ou l'océan (5). Les concentrations de sels de TFA sont les plus faibles dans les précipitations et les eaux de surface, légèrement plus élevées dans les océans et encore plus élevées dans les petits bassins terminaux où ils s'accumulent avec d'autres sels minéraux.*

Q11

Comment l'exposition au rayonnement UV solaire affecte-t-elle la durée de vie des matériaux d'extérieur ?

Les matériaux couramment utilisés dans la construction de bâtiments, les transports, l'industrie de l'énergie et les textiles sont régulièrement exposés au rayonnement UV solaire au cours de leur vie. Souvent, la perte de leurs propriétés utiles (telles que la résistance mécanique) ou de leurs caractéristiques de surface (telles que la couleur et la rugosité) causée par l'exposition au rayonnement UV solaire détermine leur durée de vie à l'extérieur. Les stratégies disponibles pour contrôler la dégradation induite par les UV comprennent des revêtements de surface ou l'incorporation de très faibles concentrations de composés chimiques qui agissent comme des « écrans solaires ». Bien qu'efficaces pour contrôler la dégradation par les rayons UV dans diverses conditions d'exposition, ces additifs augmentent le coût total de la durée de vie des matériaux conçus pour une utilisation de routine à l'extérieur. En outre, certains de ces additifs peuvent s'échapper des matériaux pendant leur utilisation ou après leur élimination et peuvent nuire à l'écosystème en raison de leur toxicité.

Les matériaux peuvent se dégrader lorsqu'ils sont exposés à la lumière du soleil. Certains matériaux utilisés dans la construction et les textiles sont des polymères à base de carbone qui peuvent se dégrader lorsqu'ils absorbent le rayonnement UV solaire. Ces matériaux polymères comprennent le bois et les produits en papier, les polymères synthétiques tels que les plastiques et le caoutchouc, et les textiles comme la laine et le polyester. Ces polymères possèdent des groupements chimiques spécifiques (appelés chromophores) qui peuvent absorber le rayonnement solaire UV et déclencher leur dégradation. Dans des matériaux comme le bois, les chromophores font partie de la structure du polymère, tandis que d'autres matériaux, tels que le plastique polyéthylène, contiennent des impuretés chimiques qui absorbent le rayonnement UV solaire.

L'absorption du rayonnement solaire UV déclenche des réactions chimiques qui conduisent souvent à la dégradation du matériau en perturbant la longue structure en chaîne du polymère. Étant donné que la résistance des matériaux et les propriétés souhaitables (telles que l'apparence et les caractéristiques de surface) reposent sur la présence de chaînes polymères longues et intactes, l'absorption des rayons UV compromet les propriétés utiles telles que la durabilité et l'apparence du bois et des plastiques utilisés à l'extérieur. En outre, dans des applications telles que les modules photovoltaïques, la construction de bâtiments et les revêtements organiques protecteurs, cette réduction de la durée de vie nécessite un remplacement plus rapide, ce qui augmente le coût d'utilisation.

La décoloration, le jaunissement et la fragilisation sont des signes de dégradation photochimique. Lorsque les matériaux sont exposés au rayonnement solaire, trois signes peuvent indiquer leur dégradation. Il s'agit de la décoloration, du jaunissement et de la fissuration de surface (**figure Q11-1**).

La décoloration. La décoloration est un changement de couleur causé principalement par l'exposition aux rayonnements UV, même si la chaleur et la lumière visible peuvent également contribuer à ce phénomène. La décoloration est observée dans les peintures, les revêtements, les produits en bois, les textiles et les plastiques. Le rayonnement UV-B est plus énergétique mais moins intense dans le spectre solaire que les autres longueurs d'onde. Cependant, la décoloration des tissus et des revêtements causée par le rayonnement UV-B est courante et limite souvent leur durée de vie utile. Le rayonnement UV-A est moins énergétique que le rayonnement UV-B, mais à la surface de la Terre, le rayonnement solaire contient une plus grande proportion d'UV-A que d'UV-B. Pour cette raison, le rayonnement UV-A est la principale cause de la décoloration.

Le jaunissement. Lorsqu'ils sont exposés au rayonnement solaire, les plastiques peuvent jaunir au fil du temps, un processus qui nécessite généralement de l'oxygène (donc, de l'air) pour avoir lieu.



Figure Q11-1. Signes de dégradation des matériaux induite par la lumière du soleil.

Le jaunissement se produit parce que l'oxydation des polymères par le rayonnement UV forme des espèces chimiques de couleur jaune — c'est pourquoi une teinte jaune indique une dégradation. Les polymères PVC jaunissent lors d'une utilisation en extérieur, ce qui affecte leur durée de vie effective. Le jaunissement du PVC peut se produire même sans oxygène.

Affaiblissement et fragilisation. Lorsqu'ils sont exposés aux rayons UV, les plastiques subissent des modifications chimiques qui peuvent briser les longues chaînes de molécules de polymères en fragments plus petits. Par ailleurs, ces réactions peuvent créer de nouvelles liaisons chimiques entre les chaînes de polymères, ce qui rend le matériau plus rigide au fil du temps. Les deux processus affaiblissent le polymère, qui a tendance à se casser et à se rompre au lieu de se plier et de se redresser lorsqu'il est soumis à une contrainte mécanique. L'affaiblissement des matériaux exposés au rayonnement solaire entraîne une réduction marquée de leur résistance mécanique et de leur flexibilité au fil du temps. Pour les plastiques, une exposition prolongée au rayonnement solaire les fait se désagréger lors de la manipulation. On dit alors que le matériau est fragilisé, un phénomène qui contribue à la production de microplastiques dans l'environnement (voir **Q12**).

Plusieurs stratégies existent pour protéger les matériaux du rayonnement UV. Il existe plusieurs stratégies pour atténuer les dommages causés par les rayons UV au bois, aux plastiques et aux fibres textiles. Les trois plus courantes sont l'écrantage, la stabilisation et la neutralisation.

L'écrantage. L'écrantage implique la présence d'un additif dans le plastique qui empêche physiquement le rayonnement UV de pénétrer dans le matériau. Les additifs les plus courants pour les plastiques sont le noir de carbone et le dioxyde de titane. Pour le bois, un moyen courant de réduire les dommages causés par la lumière du soleil et l'humidité consiste à utiliser des produits de revêtement de surface. Ces revêtements sont constitués d'un film opaque contenant un pigment inorganique (comme le dioxyde de titane) qui empêche les rayons UV d'atteindre le bois sous-jacent.

Les stabilisateurs. Une deuxième façon de protéger les plastiques et le bois est d'utiliser des stabilisateurs UV. Un stabilisateur peut être un composé qui absorbe fortement le rayonnement UV et réduit ainsi la quantité de lumière disponible pour dégrader le matériau. Les stabilisateurs UV sont efficaces à de très faibles concentrations, généralement inférieures à 0,1 % du poids du matériau. Les stabilisateurs atténuent l'effet nocif du rayonnement UV sur les matériaux et, dans la plupart des cas, peuvent maintenir la durée de vie des produits même en cas d'exposition prolongée au rayonnement UV. Cependant, ces additifs augmentent le coût du matériau et peuvent provoquer une contamination de l'environnement lorsqu'ils s'échappent du matériau ou du revêtement.

Les neutralisateurs. Une troisième approche consiste à arrêter la progression des réactions chimiques de dégradation à l'aide d'un neutralisateur. Le rayonnement UV déclenche généralement des réactions radicalaires, ce qui peut créer plus de dommages oxydatifs pour le matériau. Les neutralisateurs sont des molécules qui peuvent piéger ces radicaux libres, arrêtant ainsi la chaîne oxydative des réactions et empêchant les dommages aux chaînes polymères. Le groupe de neutralisateurs le plus utilisé pour les plastiques polyoléfiniques est celui des stabilisants à la lumière de type amine à empêchement stérique.

Q12 Quelle est la relation entre les microplastiques et le rayonnement UV solaire ?

Les microplastiques sont de petits morceaux de plastiques courants. Elles sont formées par la fragmentation de gros déchets plastiques par le biais de divers processus, dont l'altération par les rayons UV du soleil. Ces petites particules de plastique (moins de 5 mm) sont répandues dans l'environnement et les effets potentiels sur les organismes vivants suscitent de vives inquiétudes.

Les microplastiques sont omniprésents dans l'environnement. Les microplastiques sont de petits morceaux de matières plastiques, généralement définis comme des particules de moins de 5 mm dans une dimension. Des études récentes ont démontré que les microplastiques sont omniprésents dans les eaux douces et marines, l'air, le sol et les organismes vivants, même dans les zones reculées telles que l'Arctique et les sédiments des grands fonds. Plus inquiétantes encore sont les découvertes récentes de microplastiques dans l'eau potable, le sel et même le sang humain. Par conséquent, les impacts potentiels des microplastiques sur les organismes, en particulier les êtres humains, suscitent de vives inquiétudes.

Les rayons UV sont un facteur environnemental clé responsable de la formation de microplastiques. Il existe deux questions clés concernant les microplastiques dans l'environnement : Comment se forment-ils ? Quelle est leur durée de vie ? La plupart des particules de microplastique présentes dans l'environnement se formeraient par la fragmentation de déchets plastiques plus volumineux tels que les bouteilles de boissons, les emballages alimentaires et les sacs à provisions. Cette dégradation commence par l'altération des plastiques, un processus qui est principalement induit par le rayonnement UV solaire. Le rayonnement UV provoque des dégradations de surface, des fissurations et la formation de trous dans de gros débris de plastique (voir **Q11**). Ces fissures se propagent dans la masse du matériau, le rendant sujet à la fragmentation. La fragmentation nécessite également l'exposition du plastique dégradé à une force mécanique telle que la turbulence des vagues dans les mers et les océans, la mastication par les organismes ou l'abrasion par le sable (**figure Q12-1**). La zone de « slush » où échouent les vagues, brassant l'eau, le sable et les débris de plastique, est particulièrement importante, car elle entraîne la formation de microfragments. Alors que le rayonnement solaire UV est un facteur clé de l'altération et de la fragmentation ultérieure des déchets plastiques de grande taille, le changement climatique influe sur la vitesse de ce processus en modifiant la quantité et la composition spectrale du rayonnement UV, la distribution des plastiques et les forces mécaniques telles que le mouvement et l'énergie des vagues.

La dégradation photochimique des plastiques peut libérer du dioxyde de carbone. Les rayons UV solaires ne se contentent pas de décomposer les grands objets en plastique en fragments plus petits. Les études de laboratoire ont également indiqué que certains types de plastiques sont entièrement décomposés en dioxyde de carbone après l'exposition aux rayonnements UV. Toutefois, la pertinence environnementale de ce processus reste à établir, car il pourrait être trop lent pour réduire de manière significative les grandes quantités de déchets plastiques dans l'environnement. Ainsi, d'une part, la mise en œuvre du Protocole de Montréal et de la législation connexe pourrait avoir réduit la formation de microplastiques en diminuant la quantité de rayonnement UV disponible pour ce processus. D'autre part, il est possible qu'elle ait également diminué l'élimination finale de ces déchets de l'environnement, car des quantités plus faibles de rayonnement UV signifient que moins de débris microplastiques sont transformés en dioxyde de carbone. À l'heure actuelle, les données sont insuffisantes pour quantifier la contribution relative de ces processus opposés et leur impact global sur l'environnement.

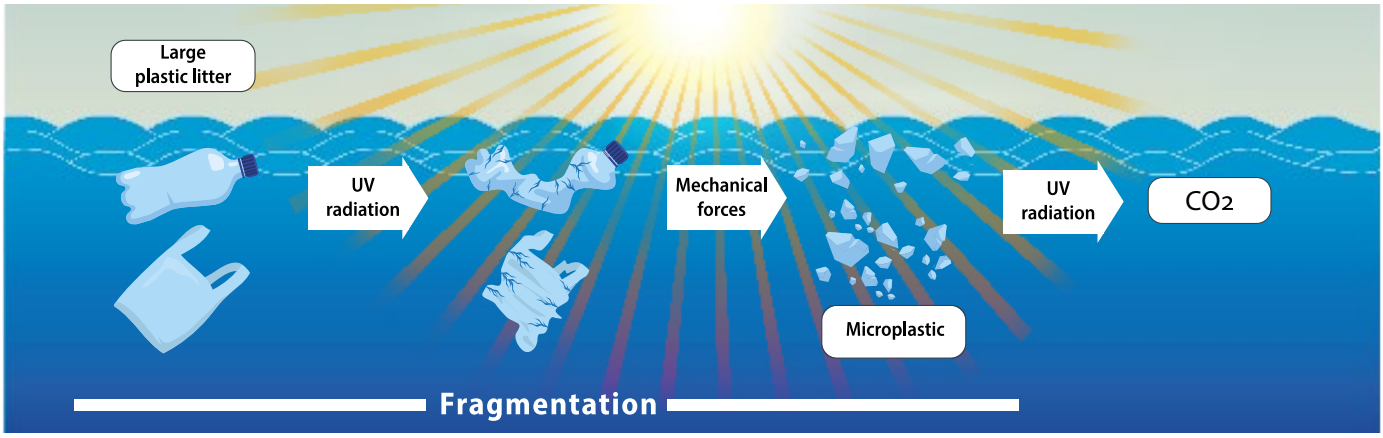


Figure Q12-1. *Le* ***rayonnement UV solaire peut entraîner la photo-oxydation des plastiques****, provoquant leur altération et les rendant sujets à la fragmentation, un processus qui peut entraîner la formation de particules microplastiques. La pertinence de la dégradation des plastiques en dioxyde de carbone dans l'environnement naturel reste à établir. Le climat a un impact sur la photo-oxydation par diverses voies, notamment par des effets directs sur le rayonnement solaire UV, la dispersion du plastique et la création des forces mécaniques qui entraînent la fragmentation réelle.*

Source des chiffres

Q1-2	Reproduit de l'OMS, 2002 : Global Solar UV Index: A Practical Guide. Who/SDE/OEH/02.2, 28 p., https://apps.who.int/iris/handle/10665/42459
Q1-3	Mis à jour de l'OMS, 2002 : Global Solar UV Index: A Practical Guide. Who/SDE/OEH/02.2, 28 p., https://apps.who.int/iris/handle/10665/42459
Q1-5	Reproduit à partir de 20 questions et réponses sur la mise à jour 2022 de la couche d'ozone, disponible sur https://ozone.unep.org/science/assessment/sap. Le document est une composante de l'évaluation scientifique OMM/PNUE de l'appauvrissement de la couche d'ozone : rapport 2022. Figure fournie par Chelsea R. Thompson, Laboratoire des sciences chimiques de la NOAA
Q1-6	Fourni par J. Ben Liley, Institut national de recherche sur l'eau et l'atmosphère, Nouvelle-Zélande
Q2-1	Adapté de Bernhard, G.H., McKenzie, R.L., Lantz, K. et al. Mise à jour de l'analyse des données de Palmer La station, l'Antarctique (64°S) et San Diego, en Californie (32°N), confirment l'effet important du trou dans la couche d'ozone de l'Antarctique sur le rayonnement UV. Photochem Photobiol Sci 21, 373–384 (2022). https://doi.org/10.1007/s43630-022-00178-3
Q3-1	Mis à jour par Bornman, Janet F., Paul W. Barnes, T. Matthew Robson, Sharon A. Robinson, Marcel AK Jansen, Carlos L. Ballaré et Stephan D. Flint. « Linkings between stratospheric ozone, UV radiation and climate change and their implications for terrestrial ecosystems. » Photochemical & Photobiological Sciences 18, n°3 (2019) : 681-716. https://doi.org/10.1039/C8PP90061B. Figure fournie par Sharon A. Robinson, Université de Wollongong, Australie
Q6-2	Fourni par Sharon A. Robinson, Université de Wollongong, Australie
Q7-1	Adapté de la figure 1 de Adams, N. L., Campanale, J. P., & Foltz, K. R. (2012). Réponses protéomiques des embryons d'oursin aux rayonnements ultraviolets stressants. Integrative and Comparative Biology, 52(5), 665-680. https://doi.org/10.1093/icb/ics058. Utilisé avec la permission de Nikki L. Adams.
Q8-1	Fourni par le National Snow and Ice Data Center, États-Unis

Les chiffres non énumérés dans ce tableau ont été soit tirés spécifiquement pour ce rapport de questions-réponses, soit reproduits à partir du rapport d'évaluation 2022 du Groupe de l'évaluation des effets sur l'environnement du PNUE, disponible sur https://ozone.unep.org/science/assessment/eeap

Liste des acronymes

CFC	chlorofluorocarbones
CO_2	dioxyde de carbone
ADN	acide désoxyribonucléique
GEEE	Groupe de l'évaluation des effets sur l'environnement
HFC	hydrofluorocarbure
nm	nanomètre
NOx	oxydes d'azote
O_3	ozone
SACO	substance qui appauvrit la couche d'ozone
PM	particules
$PM_{2,5}$	particules inférieures à 2,5 micromètres
ppbv	parties par milliard en volume
PVC	chlorure de polyvinyle
TFA	acide trifluoroacétique
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'environnement
UV	ultraviolet
UV-A	ultraviolet A
UV-B	ultraviolet B
UV-C	ultraviolet C
COV	composé organique volatil

Auteurs et contributeurs

Affiliations des auteurs

Mads P. Sulbaek Andersen	Université d'État de Californie	États-Unis
Anthony L. Andrady	Université d'état de Caroline du Nord	États-Unis
Alkiviadis F. Bais	Université Aristote de Thessalonique	Grèce
Paul W. Barnes	Université Loyola	États-Unis
Germar H. Bernhard	Biospherical Instruments, Inc.	États-Unis
Scott N. Byrne	The University of Sydney	Australie
Anu M. Heikkilä	Finnish Meteorological Institute	Finlande
Rachael Irlande	The University of Sydney	Australie
Marcel A.K. Jansen	University College Cork	Irlande
Sasha Madronich	National Center for Atmospheric Research	États-Unis
Richard L. McKenzie	Institut national de recherche sur l'eau et l'atmosphère (NIWA)	Nouvelle-Zélande
Rachel E. Neale	QIMR Berghofer Medical Research Institute, U. du Queensland	Australie
Patrick J. Neale	Smithsonian Environmental Research Center	États-Unis
Rachele Ossola	Université de l'État du Colorado	États-Unis
Qing-Wei Wang	Chinese Academy of Sciences	Chine
Sten-Åke Wängberg	University of Gothenburg	Suède
Christopher C. White	Exponent, Inc.	États-Unis
Stephen R. Wilson	University of Wollongong	Australie
Richard G. Zepp	Agence de protection de l'environnement des États Unis	États-Unis

Auteurs collaborateurs

Pieter J. Aucamp	Ptersa Environmental Consultants	Afrique du Sud
Anastazia T. Banaszak	Universidad Nacional Autónoma de México	Mexique
Marianne Berwick	University of New Mexico	États-Unis
Janet F. Bornman	Université Murdoch	Australie
Laura S. Bruckman	Université Case Western Reserve	États-Unis
Bente Foereid	Institut norvégien de recherche en bioéconomie	Norvège
Donat-P. Häder	Université Friedrich-Alexander	Allemagne
Loes M. Hollestein	Centre médical universitaire de Rotterdam	Pays-Bas
Wen-Che Hou	Université nationale Cheng Kung	Chine
Samuel Hylander	Université Linnaeus	Suède
Andrew R. Klekociuk	Division australienne de l'Antarctique	Australie
J. Ben Liley	Institut national de recherche sur l'eau et l'atmosphère (NIWA)	Nouvelle-Zélande
Janice D. Longstreth	L'Institut de recherche sur les risques mondiaux	États-Unis
Robyn M. Lucas	Université Nationale d'Australie	Australie
Roy Mackenzie-Calderón	Université de Magallanes, Cape Horn International Center, Millenium Institute Biodiversity of Antarctic and Subantarctic Ecosystems	Chili
Javier Martinez-Abaigar	Université de La Rioja	Espagne
Catherine M. Olsen	Institut de recherche médicale du Queensland	Australie
Krishna K. Pandey	Institute of Wood Science and Technology	Inde
Nigel D. Paul	Université de Lancaster	Royaume-Uni
Lesley E. Rhodes	Université de Manchester	Royaume-Uni
Sharon A. Robinson	University of Wollongong	Australie
T. Matthew Robson	Université de Cumbria, Université d'Helsinki	Royaume-Uni, Finlande
Kevin C. Rose	Institut polytechnique Rensselaer	États-Unis
Tamara Schikowski	Institut de recherche en médecine environnementale de Leibniz	Allemagne
Keith R. Solomon	Université de Guelph	Canada
Barbara Sulzberger	Institut fédéral suisse des sciences et technologies aquatiques	Suisse
Craig E. Williamson	Université de Miami	États-Unis
Seyhan Yazar	Institut de recherche médicale du Garvan	Australie
Antony R. Young	King's College London	Royaume-Uni
Liping Zhu	Université de Donghua	Chine
Meifang Zhu	Université de Donghua	Chine

Les *questions et réponses de 2022 sur les effets de l'appauvrissement de la couche d'ozone, du rayonnement UV et du climat sur les êtres humains et l'environnement* fournissent un bref aperçu qui souligne le rôle important du Protocole de Montréal dans la protection de la vie sur Terre. Les questions et réponses sont destinées aux décideurs, au grand public, aux enseignants et aux scientifiques afin de les sensibiliser à un éventail de questions importantes. Des informations plus détaillées sont disponibles dans le *rapport d'évaluation du GEEE 2022*, accessible sur https://ozone.unep.org/science/assessment/eeap.



Questions et réponses sur les effets de l'appauvrissement de la couche d'ozone, du rayonnement UV et du climat sur les êtres humains et l'environnement

UN environment programme | ozone secretariat

Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone