



LE PROTOCOLE DE MONTRÉAL ET LA SANTÉ HUMAINE

Comment une action
mondiale nous protège des
ravages du rayonnement
ultraviolet

PROGRAMME DES NATIONS-UNIES POUR L'ENVIRONNEMENT



Copyright © Programme des Nations Unies pour l'environnement, 2016

A condition d'en mentionner la source, la présente publication peut être reproduite intégralement ou en partie sous quelque forme que ce soit à des fins pédagogiques ou non lucratives sans autorisation spéciale du détenteur du copyright. Le Programme des Nations Unies pour l'environnement souhaiterait recevoir un exemplaire de toute publication produite à partir des informations contenues dans le présent document.

L'usage de la présente publication pour la vente ou toute autre initiative commerciale quelle qu'elle soit est interdite sans l'autorisation préalable écrite du Programme des Nations Unies pour l'environnement.

Avertissement

Les termes utilisés et la présentation du matériel contenu dans la présente publication ne sont en aucune façon l'expression d'une opinion quelconque par le Programme des Nations Unies pour l'environnement à propos de la situation légale d'un pays, d'un territoire, d'une ville ou de son administration ou de la délimitation de ses frontières ou de ses limites. De plus, les opinions exprimées ne représentent pas nécessairement la décision ou la politique officielle du Programme des Nations Unies pour l'environnement, de même que la mention de marques ou de méthodes commerciales ne constitue une recommandation.

Le
PNUE encourage les
pratiques respectueuses de
l'environnement au niveau mondial et
dans ses propres activités.
Cette publication est imprimée sur du papier
100 % recyclé, en utilisant des encres d'origine
végétale et d'autres pratiques respectueuses de
l'environnement. Notre politique de distribu-
tion a pour objectif de réduire l'empreinte
carbone du PNUE.

Remerciements

Le document a été produit par le Programme ActionOzone de la Division de la Technologie, de l'Industrie et de l'Économie du PNUE (PNUE DTIE) dans le cadre du programme du PNUE pour le Fonds Multilatéral pour la Mise en œuvre du Protocole de Montréal.

L'équipe du projet au PNUE :

- Dr. Shamila Nair-Bedouelle, Directrice, PNUE DTIE programme ActionOzone
- Mme Anne-Maria Fenner, Chargée de communication, programme ActionOzone

Recherche et rédaction :

- Prof. Nigel Paul, Co-président, Groupe de l'évaluation des effets sur l'environnement (GEEE) du PNUE, Lancaster Environment Centre, Université de Lancaster, Royaume-Uni

Relecture :

- Dr. Sarah Allinson, Université de Lancaster, Royaume-Uni
- Dr. Pierre Césarini, Association Sécurité Solaire, France
- Dr. Emilie Van Deventer, Organisation mondiale de la santé (OMS)
- Prof. Robyn Lucas, Australian National University, Australie
- Dr. Richard McKenzie, National Institute of Water and Atmospheric Research, Nouvelle-Zélande
- Prof. Mary Norval, Université d'Édimbourg, Royaume-Uni
- Dr. Rémy Slama, Inserm, France

- Dr. Ezra Clark, Capacity-building Manager, PNUE ActionOzone
- Mme Artie Dubrie, Coordinatrice régionale du réseau pour le Pacifique, Bureau régional PNUE Asie / Pacifique (ROAP)
- M. Shaofeng Hu, Coordinateur régional du réseau pour l'Asie du Sud-est, ROAP
- M. Jean Paul Martial, Consultant, PNUE ActionOzone
- Mme Kakuko Nagatani-Yoshida, Chargée de programme, ROAP
- M. Marco Pinzon, Coordinateur régional du réseau pour les Caraïbes, Bureau régional PNUE Amérique latine et Caraïbes (ROLAC)
- M. Mahesh C. Uniyal, Consultant, ROAP

Traduction pour la version française :

- M. Jean Paul Martial, Consultant, PNUE ActionOzone

Maquette et mise en page :

- Mme Aurélie Ek, Consultante

Photos : © Shutterstock sauf mention du contraire

Images de couverture : © Shutterstock

Résumé analytique

Le succès de l'application du protocole de Montréal montre de façon éclatante que le monde peut s'unir pour combattre une menace pour l'humanité toute entière. Depuis son adoption en 1987, le traité ayant pour but l'élimination des substances qui appauvrissent la couche d'ozone a apporté des bienfaits significatifs à la santé humaine dans le monde entier. Ces résultats ont été obtenus en premier lieu en empêchant une augmentation importante du rayonnement ultraviolet dans la plupart des zones habitées de la planète.

La destruction de l'ozone augmente la quantité de rayonnement UV qui atteint la surface de la Terre. Des recherches scientifiques intensives menées au cours des dernières années ont permis une meilleure compréhension des phénomènes par lesquels la raréfaction de l'ozone stratosphérique affecte non seulement la santé de l'Homme mais aussi la production des denrées alimentaires et les écosystèmes qui contribuent au maintien de la vie. Le monde aurait été bien différent sans le protocole de Montréal. Ce livret, tout en présentant un condensé des connaissances actuelles sur les effets des variations du rayonnement UV sur la santé humaine, offre aussi un panorama de ce que le monde aurait pu être si nous n'étions pas arrivés à contrôler les substances qui appauvrissent la couche d'ozone. Il y aurait eu un effondrement de l'ozone stratosphérique vers le milieu du 21^{ème} siècle, avec pour résultat une augmentation dramatique du rayonnement UV partout dans le monde, des pôles jusqu'aux tropiques.

Les effets du succès de l'application du protocole de Montréal commencent à être quantifiés et on estime à au moins 10 millions les cas de cancer de la peau qui auront été évités d'ici à la fin du siècle. Une modélisation récemment publiée fait état de 300 millions de cancers de la peau évités sur le seul territoire des Etats-Unis. De nombreux millions de cas de cataracte auront aussi pu être évités, une estimation faisant état de de dizaines de millions de cas aux seuls Etats-Unis.

L'exposition aux rayons UV peut aussi affecter le système immunitaire de l'être humain et, en limitant l'appauvrissement de la couche d'ozone, le protocole de Montréal aura probablement évité tout impact mesurable de l'accroissement du rayonnement UV sur la fonction immunitaire chez l'Homme. La diminution du rayonnement UV, entraînée par la reconstitution progressive de la couche d'ozone, n'aura pas non plus d'effet attendu sur le temps d'exposition à la lumière solaire nécessaire à la synthèse de la vitamine D qui est indispensable à la santé de l'Homme. Un rayonnement UV plus important a aussi des effets délétères sur les récoltes de l'agriculture et sur les ressources halieutiques ainsi que sur les écosystèmes marins qui les supportent. Ainsi, le protocole de Montréal aura contribué à la santé humaine en protégeant la sécurité alimentaire. Un autre bienfait aura été l'élimination de produits chimiques toxiques qui étaient utilisés couramment, comme le bromure de méthyle. Enfin, en éliminant des substances qui détruisent l'ozone et qui

sont aussi de puissants gaz à effet de serre, le Protocole aura aussi permis la réduction des risques pour la santé induits par les changements climatiques.

L'étendue des dommages qui auraient pu être causés à la santé si nous n'avions pas réussi à préserver la couche d'ozone apparait clairement. La santé et le bien-être de centaines de millions de gens, dont beaucoup ne sont pas encore nés, ont été protégés grâce aux efforts concertés des signataires du Protocole depuis 1987.

Sommaire

Remerciements	3
Résumé analytique	4
Avant-propos	7
Introduction	9
Le rayonnement ultraviolet : le lien entre l’ozone stratosphérique et la santé humaine	13
Le cancer de la peau : un enjeu majeur de santé publique à l’échelle mondiale	18
Le Protocole de Montréal et l’avenir de la couche d’ozone : le monde dans lequel nous vivons et <i>le Monde que nous avons évité</i>	23
Les cancers de la peau dans <i>le Monde que nous avons évité</i>	28
Les cancers de la peau dans le futur tel que nous l’envisageons	33
La raréfaction de l’ozone, les rayonnements UV et les maladies oculaires	35
La raréfaction de l’ozone, les rayonnements UV et le système immunitaire	37
La raréfaction de l’ozone, les rayonnements UV et la vitamine D	39
D’autres effets potentiels de la raréfaction de l’ozone sur la santé humaine	42
Au bout du compte : La valeur économique des bienfaits pour la santé du protocole de Montréal	45
Remarques finales	46
Références et suggestions de lecture	48

Avant-propos

La santé humaine a toujours été au centre de la protection de la couche d'ozone. En 1985, les toutes premières lignes du préambule de la Convention de Vienne sur la protection de la couche d'ozone ne laissent planer aucun doute sur le fait que les Parties à la Convention étaient « [...] *Conscientes de l'incidence néfaste que pourrait avoir sur la santé humaine et l'environnement toute modification de la couche d'ozone* [...] ». Deux ans plus tard, en 1987, cette position est réaffirmée dans le préambule du Protocole de Montréal qui débute par ces mots : « [...] *Conscientes de leur obligation [...] de prendre les mesures appropriées pour protéger la santé de l'homme et l'environnement contre les effets néfastes qui résultent ou risquent de résulter d'activités humaines qui modifient ou risquent de modifier la couche d'ozone* [...] ».

Aujourd'hui, après ces trente ans au cours desquels les Parties à la Convention de Vienne et au Protocole de Montréal ont déployé d'immenses efforts pour protéger la couche d'ozone, nous relisons ces déclarations et il est patent que la protection de la santé humaine a toujours été implicitement présente dans chacune des actions des Parties. Cependant,

malgré tout, lors de nos discussions au sujet de l'usage des substances qui appauvrissent la couche d'ozone et leur remplacement, de la complexité des processus stratosphériques etc., nous avons parfois oublié ce que la protection de la couche d'ozone signifiait pour la santé humaine et le bien-être des personnes vivant sur cette planète. C'est ce visage humain de la protection de la couche d'ozone que ce livret se propose d'explorer.

Cet ouvrage dresse un bilan des connaissances actuelles de l'impact de l'évolution de la couche d'ozone sur la santé humaine, non seulement dans le monde dans lequel nous vivons mais aussi dans *le Monde que nous avons évité*. C'est-à-dire le monde dans lequel nous aurions vécu si nous n'avions pas réussi à contrôler les substances qui détruisent la couche d'ozone. En se penchant sur ce monde auquel nous avons échappé, nous voyons clairement, pour reprendre les termes du préambule de la convention de Vienne, l'étendue de « l'impact néfaste sur la santé humaine et sur l'environnement » que nous avons évité grâce au succès de l'application du protocole de Montréal.

Le protocole de Montréal est largement salué non seulement pour avoir réussi à atteindre son but premier d'éradication des SAO et pour le frein mis à l'appauvrissement de la couche d'ozone, mais aussi pour les bienfaits pour l'environnement et pour la santé qui en ont résulté.

Les bienfaits considérables pour la santé publique, qui ont pu être quantifiés, en ce qui concerne la réduction du rayonnement UV revêtent une signification particulière pour démontrer le succès du Protocole, et la contribution ainsi apportée aux Objectifs du Millénaire pour le développement (OMD), « *préserver l'environnement et combattre les maladies* ».

Nous souhaitons que cette publication serve au Bureaux nationaux de l'ozone et aux autres parties prenantes afin d'accroître la visibilité, la connaissance et la vocation éducatrice du protocole de Montréal. « *L'éducation est l'arme la plus puissante dont nous disposons*

pour changer le monde » (Nelson Mandela).
Travaillons ensemble à éduquer les masses à la protection de notre environnement, notre bien commun, la précieuse couche d'ozone.

Notre reconnaissance va au professeur Nigel Paul pour avoir rendu ce sujet extrêmement scientifique compréhensible et facile à lire pour tout un chacun. Nous remercions également tous les relecteurs pour leur contribution bénévole à cette publication.

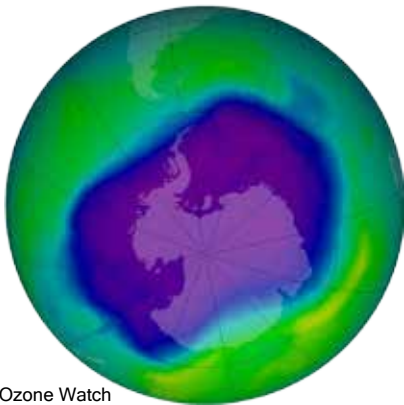
Shamila Nair-Bedouelle
Directrice, Programme ActionOzone

Introduction

«L'exemple du Protocole de Montréal montre bien que face aux grands défis mondiaux, l'action est non seulement possible, mais a des avantages financiers et humains qui l'emportent toujours sur les coûts»

Ban Ki-Moon, Secrétaire général des Nations Unies

Le Secrétaire General Ban Ki-Moon n'est pas le seul à voir dans le protocole de Montréal l'exemple ultime de ce que le monde peut faire par des efforts concertés pour protéger notre planète. Le succès du protocole de Montréal est certainement indiscutable. Depuis sa signature en 1987, l'émission dans l'atmosphère de substances qui détruisent la couche d'ozone a, dans un premier temps, été réduite et a aujourd'hui pratiquement cessé. Nous pouvons annoncer avec confiance que la couche d'ozone stratosphérique est en train de se reconstituer. Grâce aux efforts combinés des 197 pays signataires du Protocole, nous avons réussi à « combler le trou dans la couche d'ozone ».



© Ozone Watch

Lorsque nous pensons à la couche d'ozone stratosphérique, ce qui vient à l'esprit de la plupart d'entre nous est sans doute le trou dans la couche d'ozone au-dessus de l'Antarctique. Ces images sont devenues des icônes de la lutte pour la protection de l'environnement, mais peuvent aussi donner l'impression que l'appauvrissement de la couche d'ozone est limité à un continent reculé sans aucune population humaine. On pourrait certainement défendre l'idée de protéger l'Antarctique et les animaux qui y vivent, mais est-ce bien là la seule raison de protéger la couche d'ozone ?

Qu'en est-il de la santé humaine, des récoltes ou des écosystèmes ? Bien sûr, protéger la couche d'ozone c'est protéger tout cela, mais comment ? Comment l'ozone, cette toute petite portion de l'atmosphère (moins d'une partie par million), présente pour sa plus grande part à des kilomètres dans la haute atmosphère, peut-elle affecter à ce point les gens et les autres formes de vie qui se trouve à la surface de la Terre ?

Des recherches approfondies, menées sur des décennies (voir encadré n°1) ont permis d'avoir une vision précise des mécanismes par lesquels la couche

d'ozone stratosphérique peut influencer sur l'environnement à la surface de la Terre, et comment la santé humaine peut en être affectée.

Ce qui relie principalement la santé humaine à l'appauvrissement de la couche d'ozone, c'est l'augmentation du rayonnement ultraviolet (UV) à la surface de la Terre qui résulte de la raréfaction de l'ozone stratosphérique.

Aujourd'hui nous comprenons que la composante ultraviolette de la lumière solaire a des effets multiples sur la santé de l'Homme. Un équilibre s'est établi au cours des millions d'années que les humains ont été exposés à des niveaux de radiation constants, entre les effets

nocifs apportés par un excès ou un manque d'UV (figure n°1). Cependant, nous commençons à comprendre plus clairement les mécanismes de la destruction galopante de la couche d'ozone qui aurait pu intervenir si le protocole de Montréal n'avait pas été un succès. Forts de cette connaissance, nous pouvons évaluer en quoi ces changements auraient affecté la santé de l'Homme.

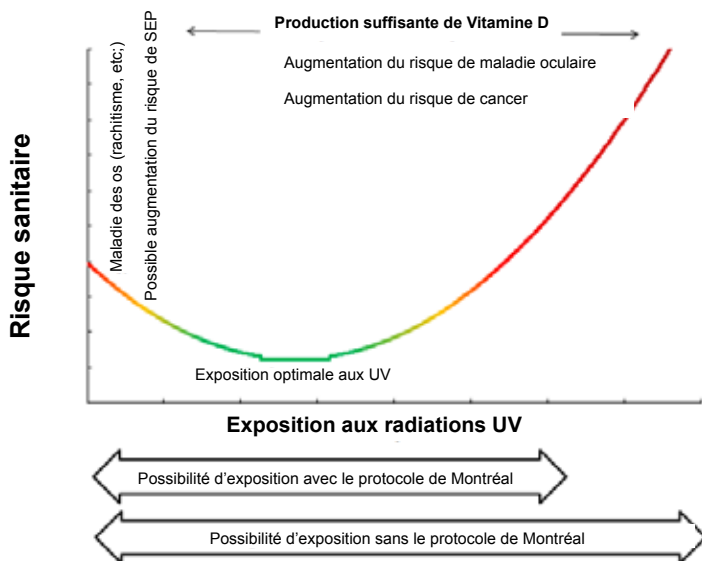


Figure 1 : La courbe en U de la relation entre les UV et la santé. Aux niveaux courants, il y a des risques liés à la sous-exposition (par exemple aux latitudes élevées en hiver) et à la surexposition (par exemple les bains de soleils en été, en particulier aux latitudes faibles). Les risques de la sous-exposition comprennent une plus grande fréquence de certaines maladies osseuses et, possiblement, de maladies auto-immunes comme la sclérose en plaques. L'accroissement important des UV qui aurait découlé d'un appauvrissement incontrôlé de la couche d'ozone aurait provoqué une importante augmentation des risques liés à la surexposition aux UV, y compris les cancers cutanés et les maladies oculaires. Ces deux aspects sont développés plus bas.

Depuis 1987, Le Groupe de l'évaluation des effets sur l'environnement du PNUE (GEEE), apporte aux Parties au protocole de Montréal des évaluations actualisées réalisées par des experts portant sur les derniers développements de la recherche sur les effets de l'appauvrissement de la couche d'ozone. Le GEEE évalue l'ensemble des effets potentiels de la raréfaction de l'ozone et de l'augmentation du rayonnement UV sur les écosystèmes [1] aquatiques et terrestres [2], sur les cycles environnementaux [3], sur la qualité de l'air [4] et les matériaux [5] de construction [6]. Les effets de la disparition de l'ozone sur la santé humaine ont toujours été au centre des préoccupations des Parties, d'où l'intérêt principal porté par les évaluations du GEEE [7]. Ce livret fait extensivement usage des évaluations les plus récentes du GEEE, publiées en 2015[1-7].



Le rayonnement ultraviolet : le lien primordial entre l'ozone stratosphérique et la santé humaine

Le rayonnement ultraviolet est ce qui relie les changements qui interviennent au sein de la couche d'ozone dans la haute atmosphère et les changements qui s'opèrent à la surface de la Terre, dans l'environnement où nous vivons. La lumière visible – les couleurs de l'arc-en-ciel, du rouge au violet – ne représente qu'une petite partie du spectre du rayonnement solaire. Le soleil émet des radiations sur toute une gamme de fréquences allant des ondes radio (grande longueur d'onde / faible énergie) aux rayons gamma (courte longueur d'onde / énergie élevée). Le rayonnement ultraviolet se situe dans cette gamme entre des longueurs d'onde juste trop courtes pour être perçues par l'œil humain et des longueurs d'onde bien plus courtes.

Les longueurs d'onde les plus courtes constituent ce qu'on appelle les ultraviolets C (souvent abrégé UV-C). Les UV-C présents dans la lumière solaire dans l'espace sont complètement absorbés par l'atmosphère et n'atteignent pas la surface de la Terre.

L'atmosphère terrestre n'affecte pas de manière significative les rayonnements UV aux longueurs d'onde les plus longues, les ultraviolets A (UV-A). Les UV-A ne sont pas absorbés par l'ozone et les autres

gaz présents dans l'atmosphère, et ils atteignent donc la surface de la Terre. De nombreux animaux perçoivent les UV-A, et ils jouent un rôle important dans leur comportement. Il existe des indices qui montreraient que les bébés humains seraient capables de voir les rayons UV-A que les adultes ne perçoivent pas. En revanche, nous en prenons conscience par leurs effets sur notre peau. Ce sont surtout les UV-A solaires qui stimulent le bronzage des peaux pâles. A long terme, les UV-A provoquent le vieillissement de la peau et contribuent à d'autres problèmes cutanés.

L'étroite bande de rayonnement ultraviolet entre les UV-A et les UV-C est connue sous le nom d'ultraviolet B (UV-B). Le rayonnement UV-B est grandement absorbé par l'ozone, ce qui fait qu'une atteinte à la couche d'ozone provoque une augmentation du rayonnement UV-B qui atteint la surface de la Terre. Nous en ressentons les effets sur nos personnes car ce sont les UV-B qui sont responsables des coups de soleil. Les coups de soleil se développent quelques heures seulement après une courte exposition à une forte dose d'UV-B. **L'exposition aux UV-B en trop grande quantité sur une longue période peut amener des problèmes de santé bien plus sévères.**



Copyright © Jana Masickova

Figure 2. La lumière visible, qui se décompose en couleurs de l'arc-en-ciel, n'est qu'une petite partie du rayonnement émis par le soleil. Si nous pouvions voir au-delà des couleurs de l'arc-en-ciel, des radiations aux longueurs d'onde plus courtes, comme les ultraviolets, formeraient des bandes supplémentaires sous le violet dans l'arc-en-ciel. Si les humains avaient de telles capacités de vision des UV, la « couleur » UV-A apparaîtrait dans une nouvelle bande, immédiatement sous le violet. De nombreux oiseaux et de nombreux insectes voient les UV-A et voient donc réellement une autre couleur dans l'arc-en-ciel, qui nous est invisible. De la même manière, l'ultraviolet B (UV-B) apparaîtrait comme une autre bande sous l'UV-A. Si nous étions capables de voir cette « couleur » UV-B, alors nous serions en mesure de voir l'appauvrissement de l'ozone dans l'arc-en-ciel. La raréfaction de l'ozone rendrait la bande UV-B, et seulement celle-ci, beaucoup plus brillante car une quantité plus importante d'UV-B pénétrerait l'atmosphère jusqu'à la surface.

Le rayonnement UV et la santé humaine : environnement, biologie et comportement

Pour comprendre les effets des ultraviolets solaires sur la santé humaine, nous devons prendre en considération non seulement les facteurs environnementaux, comme la couche d'ozone, mais aussi la biologie (par exemple, comment les UV de différentes longueurs d'onde affectent les biomolécules) et les comportements humains.

L'environnement

Pour que les UV affectent la santé humaine, ils doivent pénétrer l'atmosphère et atteindre la surface de la Terre.

Les UV-C n'atteignent pas la surface de la Terre, même en cas d'appauvrissement extrême de la couche d'ozone. Ils ne constituent donc pas un facteur influant sur la santé humaine (bien qu'ils soient extrêmement nocifs lorsqu'ils sont émis par des sources artificielles comme les appareils de soudure ou les lampes spécialisées). Les UV-A et les UV-B pénètrent tous deux l'atmosphère et atteignent la surface du globe. Ils sont donc potentiellement susceptibles d'affecter la santé humaine

La biologie

Les effets des UV-A et des UV-B sur la santé humaine sont liés à leur capacité à être absorbés par les biomolécules et à leur causer des altérations importantes. La nature chimique des molécules d'intérêt biologique, comme l'ADN et les protéines, induit qu'elles sont capables d'absorber les UV-A et/ou les UV-B. Ce qui peut souvent, mais pas toujours, affecter leurs fonctions (voir encadré n°2). Les dommages causés par les UV aux molécules de base de la vie peuvent à la longue affecter la santé de l'Homme. Mais bien sûr, tout le monde ne réagit pas de la même manière aux rayons du soleil. Les peaux plus sombres offrent une protection certaine contre les dommages des UV, mais cette protection n'est certainement pas totale [7].

Comportements

Nous avons tous le choix du comportement que nous adoptons face au soleil. Il est évident que les rayons UV ne peuvent pas affecter notre santé si nous ne nous exposons pas à la lumière du soleil. Si nous faisons le choix de rester à l'intérieur ou à l'ombre, en particulier aux alentours de midi lorsque le rayonnement UV est le plus intense, alors nous diminuons les

risques de maladies associées à une surexposition aux UV, dont les cancers de la peau et la cataracte. A l'opposé, si nous recherchons délibérément le soleil, pour obtenir un bronzage par exemple, nous augmentons inévitablement les risques de surexposition aux UV. D'autres

choix, comme celui de protéger notre peau avec des vêtements et nos yeux avec un chapeau sont aussi des facteurs déterminants pour le risque encouru.



L'ADN est probablement connu surtout pour être le « code génétique » que nous nous passons de génération en génération. Mais l'ADN est aussi le mode d'emploi qui permet à toutes les cellules de notre corps de remplir leur fonction propre. Si le mode d'emploi est endommagé, les cellules peuvent mourir ou se mettre à dysfonctionner, et c'est exactement ce qui se passe lorsqu'une cellule est exposée aux UV solaires, en particulier aux UV-B. Certains des éléments constitutifs de l'ADN absorbent les rayons UV-B. Lorsque cela arrive, l'énergie lumineuse peut rompre ou altérer la structure de l'ADN et endommager sa fonction.

Parfois les dégâts causés par les UV-B sont si importants que la cellule meurt ; mais notre corps remplace les cellules mortes rapidement. Souvent, l'ADN peut se réparer (nos cellules disposent de différents moyens pour faire cela), et la cellule continue de fonctionner normalement. Le plus grand danger pour notre santé réside dans la possibilité que la cellule survive mais que l'ADN ne soit pas correctement réparé. Selon les dégâts subis par la cellule, cela ne cause pas de menace sérieuse immédiatement. Mais si l'ADN de la cellule est de nouveau endommagé, par exemple par une nouvelle exposition aux UV ou à d'autres facteurs physiques ou chimiques, l'effet cumulé de ces agressions peut suffire à déclencher des modifications dans le fonctionnement de la cellule qui au bout du compte causent un cancer.

Si l'ADN peut être considéré comme le « mode d'emploi » de la cellule, les protéines ont un rôle vital car elles sont les « outils » grâce auxquels les instructions sont exécutées, ou les « briques » avec lesquelles la cellule est construite. L'effet des UV sur le vieillissement de la peau vient directement des dégâts que subissent les protéines dont le rôle est de maintenir sa structure. La cataracte vient aussi des dégâts causés par les UV sur des protéines, en l'occurrence les protéines présentes dans le cristallin.

Enfin, les UV absorbés par notre peau induisent des réactions chimiques grâce auxquelles nous produisons de la vitamine D. La vitamine D peut se trouver naturellement dans certains aliments (comme les poissons gras) ou être ajoutée à certains aliments durant la préparation par l'industrie agroalimentaire, mais pour la plupart des gens autour du globe, les effets du soleil sont la seule source de vitamine D, indispensable à notre santé.

Le cancer de la peau : un enjeu majeur de santé publique à l'échelle mondiale

Le cancer de la peau n'est pas une maladie unique, mais un terme générique qui couvre plusieurs maladies. La plupart des cancers de la peau appartiennent à l'un des trois types principaux : le carcinome basocellulaire, le carcinome spinocellulaire (regroupés sous le terme de non-mélanomes) et le mélanome parfois appelé mélanome malin (voir encadré n°3 pour plus d'information). Chaque année, entre deux et trois millions de nouveaux cancers de la peau sont diagnostiqués dans le monde. Cela signifie que les cancers de la peau représentent environ un tiers de tous les cancers diagnostiqués. Au sein de certaines populations à la peau claire, les cancers de la peau sont les cancers les plus fréquents.

Une augmentation substantielle de la fréquence de survenue de ces cancers a pu être observée au cours des dernières décennies. Cette augmentation est un phénomène mondial, en particulier chez les populations à la peau faiblement pigmentée. La fréquence de survenue de cancers non-mélanomateux a plus que doublé dans certains pays depuis les années 60. L'augmentation des cas de mélanome (souvent mieux répertoriés dans les statistiques de santé publique) est encore plus évidente. **La fréquence des cancers de type mélanome chez les populations à la peau claire a quasiment doublé tous les 10 à 20 ans depuis les années 60 [7].**

Cet accroissement spectaculaire des mélanomes pose de sérieuses questions quant aux causes qui le sous-tendent.

Les cancers de la peau et le rayonnement UV

Le lien de cause à effet qui existe entre le rayonnement UV et le développement des cancers de type mélanome ou non-mélanome est clair et démontré par de multiples éléments de preuve [7].

- Le risque de cancer de type mélanome ou non-mélanome chez les populations à la peau pâle augmente sous les latitudes faibles, là où les UV solaires sont les plus intenses.
- Certaines formes de cancer de type non-mélanome se développent le plus souvent sur le visage, le cou ou les avant-bras, les parties du corps les plus exposées au soleil au cours d'une vie.
- Chez les sujets jeunes, le cancer de type mélanome a plus de chances de se développer aux extrémités et sur le torse. L'augmentation des cas de mélanome chez les individus à la peau claire au cours des dernières décennies est beaucoup plus marquée pour les tumeurs se développant sur le torse. Ces observations témoignent qu'une exposition intermittente à un rayonnement UV intense constitue un facteur de risque significatif pour le mélanome. L'exposition intermittente à de fortes doses d'UV peut aussi être un facteur déterminant pour certains cancers de type non-mélanome.

Le mélanome

Seuls 4 à 5 pour cent des cancers de la peau sont des mélanomes (Figure 3), et avec un diagnostic précoce, ils peuvent souvent être traités avec succès. Cependant, en l'absence de traitement, le mélanome peut se propager à d'autres parties du corps. En conséquence, bien que le mélanome ne représente que 5 pour cent des cas de cancers de la peau, il provoque 75 à 80 pour cent de tous les décès imputables à cette maladie. Bien que le mélanome soit bien plus fréquent chez les individus à la peau claire, les individus à la peau foncée peuvent être affectés. Des statistiques provenant des Etats-Unis montrent que la fréquence de survenue des mélanomes est 20 fois moins élevée chez les Américains à la peau foncée que les Américains à la peau claire. Mais les premiers signes du mélanome sont plus difficiles à détecter sur une peau foncée, la maladie a plus de chances d'en être à un stade avancé lorsqu'elle est diagnostiquée, réduisant ainsi les chances de succès du traitement.



Figure 3. Photo d'un mélanome

Le carcinome basocellulaire et le carcinome épithélial

Environ 95 pour cent de tous les cancers de la peau sont des cancers non-mélanomateux, terme général pour désigner entre autres les carcinomes, le carcinome basocellulaire et le carcinome spinocellulaire. Le carcinome basocellulaire est 3 à 4 fois plus fréquent que le carcinome spinocellulaire. Bien qu'ils soient bien plus fréquents que le mélanome, les carcinomes sont beaucoup moins susceptibles d'être mortels. Cela dit, les cancers de la peau de type carcinome peuvent s'étendre autour de la lésion d'origine, provoquant la formation de tumeurs qui peuvent défigurer les patients, entraînant une perte de qualité de vie et une dégradation de la santé. Le traitement chirurgical pour ôter ces tumeurs est douloureux et peut également défigurer le patient. Comme pour le mélanome, les cancers de type non-mélanome sont moins fréquents chez les populations à la peau foncée. Cependant les non-mélanomes sont généralement diagnostiqués beaucoup plus tard chez les individus à la peau sombre, provoquant un risque de maladie et de mort bien plus important.

Une exposition au soleil, suffisante pour causer un coup de soleil sévère, en particulier au cours de l'enfance, apparaît comme un facteur de risque important de développement d'un mélanome malin plus tard au cours de la vie. Ceci met en lumière un aspect primordial de la relation entre les UV et le cancer de la peau :

Il existe un décalage dans le temps, qui se compte en années, voire en dizaines d'années, entre les dégâts initiaux causés par l'exposition aux UV et la survenue du cancer de la peau. Autrement dit, le mélanome qui se développe aujourd'hui n'a pas été provoqué par une exposition au soleil qui date d'un ou deux ans, mais une exposition qui peut avoir eu lieu il y a vingt ans ou plus. Cette notion de décalage est cruciale pour comprendre l'augmentation de cas de cancers de la peau au cours des dernières décennies [7].

Le cancer de la peau en relation avec les variations récentes de niveau de rayonnement UV et le comportement des gens face au soleil

Grâce au succès de l'application du Protocole de Montréal, l'accroissement du rayonnement UV dû à l'appauvrissement de la couche d'ozone a été faible. En fait, en dehors de quelques épisodes de courte durée, l'augmentation des UV dans la plupart des zones habitées du globe a été trop faible pour être vraiment mesurable en comparaison avec les variations

d'origine météorologiques ou autres [1].

Le monde aurait été tout différent sans le protocole de Montréal (voir ci-dessous). Malgré ce succès, on observe une augmentation de la fréquence des cancers de la peau qui ne peut s'expliquer par une raréfaction incontrôlée de l'ozone. Quelle peut donc bien être la cause de cet accroissement des diagnostics de cancer de la peau lors des dernières décennies ?

Pour partie, cet accroissement est dû à une meilleure connaissance des cancers de la peau de la part du public, ce qui les amène à consulter et entraîne une meilleure comptabilisation. L'importante médiatisation de l'appauvrissement de la couche d'ozone a contribué à cette prise de conscience et a probablement sauvé des vies grâce à un diagnostic et un traitement précoces.

Cependant, il est clair que cet accroissement des cas de cancer de la peau comptabilisés est dû à bien plus qu'à une meilleure détection. Il y a bien eu une augmentation réelle de la fréquence des cas de cancer. Le phénomène majeur ayant affecté l'apparition de nouveaux cas de cancer de la peau depuis quelques dizaines d'années réside dans le changement d'attitude des gens face au soleil [7]. Au cours des cinquante dernières années, un certain nombre de changements se sont produits dans

le comportement des gens en ce qui concerne l'exposition au soleil :

- une préférence pour un teint hâlé chez les populations à la peau claire qui sont davantage vulnérables aux agressions du soleil ;
- des changements de mode vestimentaire, dont l'abandon du port du chapeau, qui amène une plus grande surface de peau à être exposée au soleil, et ceci plus souvent ;
- des changements d'habitudes concernant les loisirs, où plus de temps est passé au soleil, notamment des vacances passées dans des régions ensoleillées où les UV sont plus intenses.

Tous ces changements cumulés amènent une augmentation du temps d'exposition aux UV de chaque personne, augmentant les risques de cancer de la peau. Alors que les campagnes de santé publique ont fait progresser la connaissance de la protection solaire, elles n'ont pas nécessairement fait évoluer les comportements individuels.

La nécessité de faire changer les habitudes et le comportement des gens face au soleil reste une question prioritaire de santé publique (voir encadré n°4), indépendamment de l'évolution de la couche d'ozone.



Copyright © Ezra Clark



© Sécurité Solaire



Au début des années 1990, la compréhension de la menace qui pesait sur la couche d'ozone et l'augmentation prévisible à une grande échelle des cas de cancer de la peau ont amené l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) et d'autres organisations à mettre sur pied le programme INTERSUN. Les objectifs du programme INTERSUN sont les suivants :

- apporter des informations, des conseils pratiques et des prédictions scientifiquement fondées sur l'impact de l'exposition aux UV sur la santé
- encourager les pays à prendre des mesures pour réduire les risques de santé induits par les UV ;
- suggérer des orientations aux pouvoirs publics et autres instances pour l'élaboration de programmes de sensibilisation aux dangers du soleil.

Même si le protocole de Montréal a réussi à prévenir une augmentation dramatique des rayonnements UV, le travail du programme INTERSUN demeure une priorité internationale. Les choix que nous faisons en tant qu'individus quand il s'agit de nous exposer aux rayons du soleil sont vitaux. L'information du public et son éducation sont donc des objectifs primordiaux

Le programme INTERSUN a pour but d'encourager l'utilisation de l'index UV en tant que mesure du risque de santé d'un excès de rayonnement UV, facile à comprendre pour tout un chacun (encadré n°7). L'index UV est mesuré sur une échelle simple de 1 à 12 (on utilise depuis quelques temps une échelle étendue de 1 à 15 pour prendre en compte les niveaux d'UV rencontrés en montagne et sous les tropiques). Les variations de la composante ultraviolette de la lumière solaire en fonction du moment de la journée, de la saison, de la latitude et de la couverture nuageuse peut être facilement exprimée grâce à l'index UV. Grâce à cette information de base, les individus peuvent prendre en toute connaissance de cause la décision de s'exposer aux rayons solaires, pour la durée choisie en se protégeant ou non avec un écran solaire ou des vêtements ou autres.

Aider les gens à prendre les meilleures décisions en ce qui concerne la façon dont ils s'exposent aux UV solaires est essentiellement une question d'éducation. INTERSUN met l'accent prioritairement sur des programmes d'éducation à l'intention des enfants, car la surexposition aux rayons UV dans les premières années de la vie est un des facteurs de risque les plus importants de développement d'un mélanome ou d'autres formes de cancers de la peau. Entre autres, certains de ces programmes mettent en œuvre des approches innovantes, s'adressant aux enfants eux-mêmes, aux enseignants, aux professionnels de la santé et à ceux qui, comme les maîtres-nageurs sauveteurs, sont en première ligne face à l'exposition du public au soleil.

Le protocole de Montréal et l'avenir de la couche d'ozone : Le monde dans lequel nous vivons et *le Monde que nous avons évité*

En 2014, le PNUE a annoncé que la couche d'ozone avait commencé de se reconstituer [8]. Nous pouvons maintenant envisager une reconstitution progressive qui sera totale d'ici à la fin du 21^{ème} siècle [1,8]. Si nous poursuivons un contrôle efficace des substances qui appauvrissent la couche d'ozone, ce sont les modifications du climat qui risquent d'être le principal facteur d'influence sur la couche d'ozone. Il est même possible que, aux latitudes moyennes, la couche d'ozone non seulement se reconstitue, mais atteigne des niveaux supérieurs à ce qu'ils étaient dans les années 1960 et auparavant [1,8].

Bien évidemment, ce futur, celui dans lequel nous allons vivre, n'était pas le seul futur envisageable lorsque l'appauvrissement de la couche d'ozone a été reconnu. Les modèles atmosphériques et climatiques qui nous permettent de prédire le futur de la couche d'ozone tel que nous le connaissons nous permettent aussi de modéliser ce qui aurait pu se passer sans le Protocole de Montréal : le « Monde que nous avons évité ».

En effet, un certain nombre d'études ont été publiées présentant des modélisations de la couche d'ozone dans *le Monde que nous avons évité* [1]. Chacune d'entre elles est obtenue selon une méthode et des postulats légèrement différents, mais elles mettent toutes en lumière la sévérité des changements qui se seraient produits sans la réussite du contrôle des substances qui appauvrissent la couche d'ozone. Elles montrent toutes une disparition progressive de la couche d'ozone qui se serait accélérée avec le temps et aurait à terme affecté la planète entière (Figure 4). Les changements prévus au niveau des tropiques sont particulièrement alarmants, en particulier si on les considère du point de vue actuel, où la disparition de la couche d'ozone est essentiellement un phénomène polaire. **Ces modélisations prédisent que la couche d'ozone au niveau des tropiques serait restée relativement stable jusqu'au milieu du siècle, puis aurait rapidement décliné jusqu'à son effondrement.**

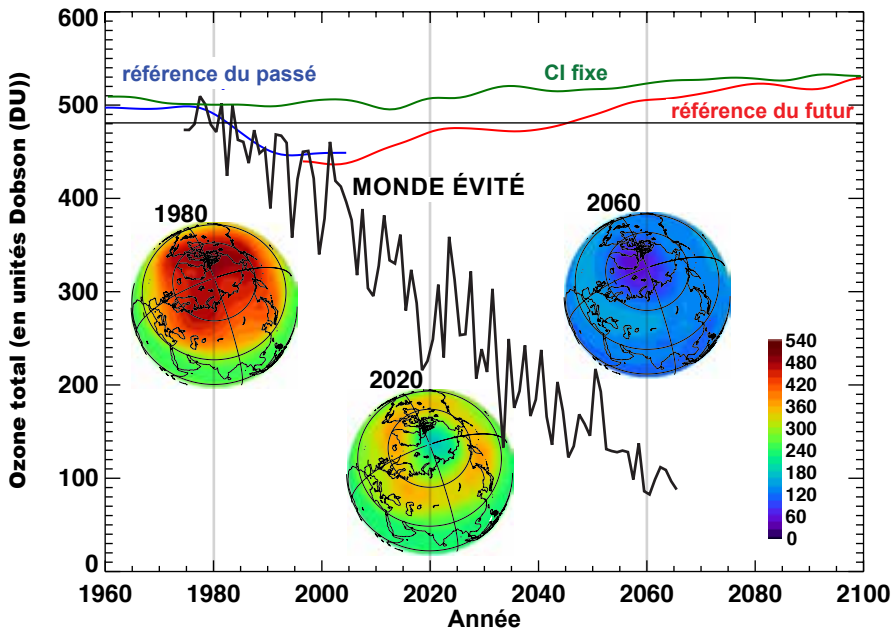


Figure 4. Appauvrissement de la couche d'ozone sur la durée du 21^{ème} siècle dans le scénario du *Monde que nous avons évité*. Les données sont des simulations pour un mois d'avril dans l'hémisphère nord dans *le Monde que nous avons évité*, c'est-à-dire sans la réussite du protocole de Montréal (en noir) et pour un avenir dans lequel le protocole de Montréal a été appliqué avec succès (en rouge). Les deux courbes supplémentaires représentent l'ozone dans la période 1960-2005 (en bleu) et un monde où l'utilisation des substances qui appauvrissent la couche d'ozone n'aurait jamais augmenté au-delà des niveaux de 1960 (en vert). Les colorisations montrent la répartition géographique de l'ozone en 1980, 2020 et 2060. Les mesures sont exprimées en unités Dobson. On peut noter l'effondrement mondial de l'ozone stratosphérique vers 2060. Reproduit avec l'autorisation de Newman et al, 2009 [9]



“D’ici à 2100 le Protocole de Montréal aura permis d’éviter pas moins de 300 millions de cas de cancer de la peau aux seuls Etats-Unis”

Les conséquences de cette disparition brutale de l'ozone sur le rayonnement UV auraient été profondes. En prenant pour étalon l'index UV (voir encadré n°7) les doses d'ultraviolet que nous recevons dans la plupart des régions du globe vont de 0 à 12. A des altitudes élevées aux abords des tropiques, comme par exemple dans les Andes, l'index UV peut atteindre 15. Dans des conditions exceptionnelles, dans de tels endroits, l'index UV peut atteindre des valeurs proches de 25 pour des périodes de courte durée. L'OMS définit tout index UV supérieur à 10 comme « danger immédiat pour la santé des peaux non protégées en cas d'exposition ». Souvent cet avis est accompagné de l'avertissement « la peau non protégée et les yeux peuvent brûler en quelques minutes ». Connaissant ces valeurs d'aujourd'hui, on peut les comparer aux valeurs projetées dans *le Monde que nous avons évité*, sans le protocole de Montréal : **des valeurs supérieures aux**

extrêmes d'aujourd'hui, au dessus de 25, seraient devenues monnaie courante dans la plupart des zones habitées de la planète (Figure 5). Dans les plaines, sous les tropiques, l'index UV aurait dépassé 50, ce qui représente quatre fois plus que ce qui est considéré aujourd'hui comme extrême. Il est fortement probable que ces valeurs extrêmes de l'index UV sont largement supérieures à tout ce que l'espèce humaine a connu tout au long de son évolution. Ce qui paraît de plus en plus évident est que ces index UV sans précédents dans *le Monde que nous avons évité* auraient eu une influence sur la prévalence du cancer de la peau et d'autres problèmes de santé chez les humains.

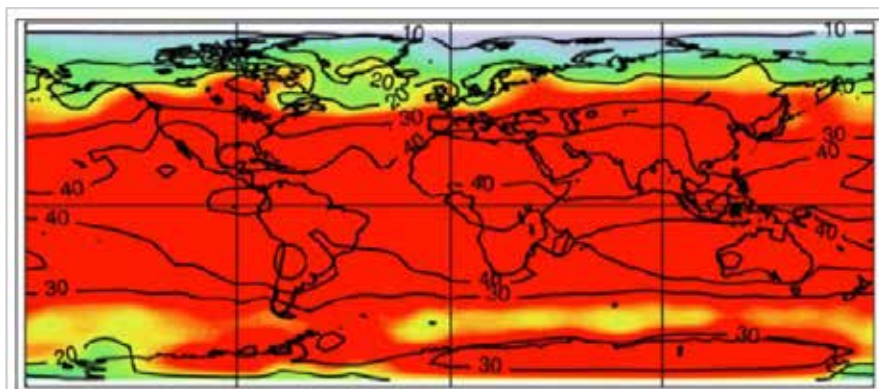


Figure 5: Index UV dans *le Monde que nous avons évité*. Les chiffres sont ceux de l'index UV (voir encadré n° 7) pour 2090 dans *le Monde que nous avons évité*, c'est-à-dire sans le succès de la mise en œuvre du Protocole de Montréal. A noter, les régions colorées en rouge dépassent les index UV maximum connus sur la Terre à l'heure actuelle (environ 25, index relevé dans des conditions exceptionnelles, en haute altitude dans les Andes). Reproduit avec l'autorisation de Egorova et al, 2013 [10]

Les Cancers de la peau dans *le Monde que nous avons évité*

On trouve aujourd'hui un nombre de plus en plus élevé de modélisations de l'évolution de l'ozone stratosphérique et de l'index UV dans un monde sans le Protocole de Montréal [1,8]. Depuis les années 1990, ces modèles, associés à une meilleure compréhension du lien entre l'exposition excessive au rayonnement UV et les risques de cancer de la peau, ont permis d'obtenir des estimations quantitatives de la fréquence du cancer de la peau dans *le Monde que nous avons évité*.

Une étude récente [11], menée par l'Institut national néerlandais de la Santé publique et de l'Environnement, basée sur des modélisations existantes faites par ce même institut, examine de quelle façon la fréquence du cancer de la peau aurait

été modifiée sur toute la planète dans *le Monde que nous avons évité* (Figure 6). Le chiffre-clé de cette étude [11] est que **le succès de l'application du protocole de Montréal aura permis de prévenir près de deux millions de cancers dans le monde entier d'ici à 2030**. Cette simulation ne s'étend pas au-delà de 2030, mais si l'on fait une estimation sans même envisager une accélération du phénomène, on arrive à un total de 150 millions de cancers évités d'ici à 2100.

Mais, comme il existe un décalage de plusieurs années, voire de dizaines d'années entre l'atteinte cutanée due aux UV et le développement visible d'un cancer de la peau (voir plus haut), l'augmentation des cas de cancer déclarés d'ici aux années 2030 serait

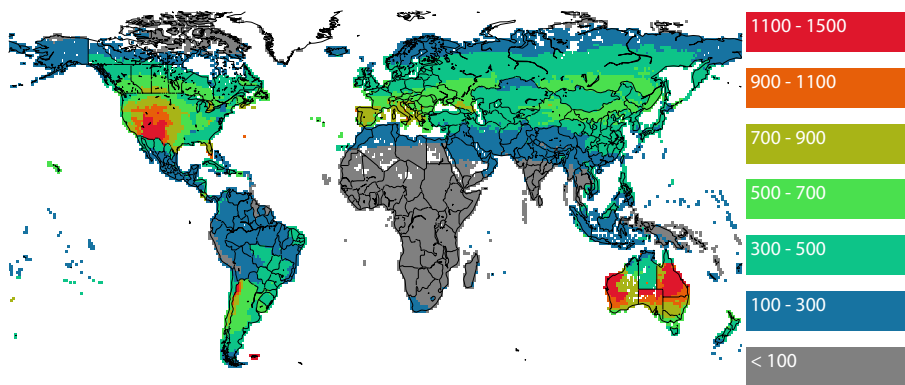


Figure 6 : Estimations tirées des simulations concernant les cancers de la peau évités par le Protocole de Montréal en 2030. Les chiffres sont exprimés en millions de personnes par an. Reproduit avec l'autorisation de van Dijk et al. 2013 [11].

pour une grande part la conséquence d'une exposition aux UV vers la fin des années 1990 et au début des années 2000. C'est-à-dire avant la grande disparition de l'ozone prévue pour le milieu du siècle dans *le Monde que nous avons évité*.

D'autres études ont évalué les bienfaits à long terme du protocole de Montréal pour la réduction des cancers de la peau, mais étaient limitées à certaines parties du globe. La première étude de ce type a été publiée dès 1996 [12]. Cette étude portait sur l'évolution de la fréquence du cancer de la peau jusqu'en 2100, se

limitant aux Etats-Unis et au pays du nord de l'Europe de l'ouest. Cette modélisation prévoyait que, sans la protection efficace de la couche d'ozone, la fréquence du cancer de la peau augmenterait progressivement. L'augmentation serait relativement faible dans les premières dizaines d'années du siècle, pour accélérer ensuite fortement (Figure 7). **On y prévoyait que l'application efficace du protocole de Montréal permettrait de prévenir environ deux millions de cas supplémentaires de cancer de la peau d'ici à 2100 sur le seul territoire des Etats-Unis et de l'Europe Occidentale.**

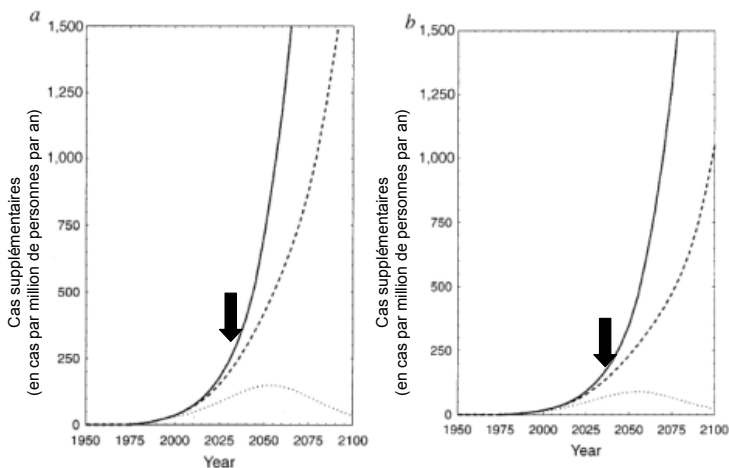


Figure 7 : Estimations tirées des simulations concernant l'augmentation des cancers de la peau (a) aux Etats-Unis et (b) dans les pays du nord de l'Europe occidentale dans *le Monde que nous avons évité* (c'est-à-dire sans la réussite de la mise en œuvre du Protocole de Montréal) par rapport à une valeur de base correspondant à une mise en œuvre complète. Les flèches indiquent 2030, la date utilisée dans la simulation des cancers évités au niveau mondial (voir figure 6). Extrapolé de Slaper et al. 1996 [12].

Des modélisations provenant de l'agence américaine de protection de l'environnement (EPA) nous donnent également une vision des bienfaits à long terme du protocole de Montréal, pour ce qui concerne les cancers de la peau dans *le Monde que nous avons évité*. Leurs modèles, dont le premier date de 2006 [13], mis à jour ensuite en 2015 [14], s'intéressent à la fréquence des cancers de la peau aux seuls États-Unis, chez les personnes nées entre 1980 et 2100. La simulation de l'EPA de 2015 [14] estime que le protocole de Montréal et ses amendements auront évité la survenue d'un total de 275 à 330 millions de cas de cancers non-mélanomateux et de 8 à 10 millions de cas de mélanome sur le sol des seuls États-Unis. Même en tenant compte de la qualité du traitement médical que l'on peut trouver aux États-Unis, ces cas de cancer supplémentaires auraient amené au moins un million et demi de morts supplémentaires. La simulation de l'EPA

de 2006 [13] mettait en lumière le fait que la plupart de ces nouveaux cas de cancer seraient apparus au cours des dernières décennies du siècle. Plus de 80% des cas de cancer supplémentaires auraient touché les personnes nées après 2015 [13].

Aucune de ces études ne revendique l'exactitude totale de ses prédictions quantitatives concernant la fréquence des cancers de la peau dans le futur. Elles prennent en compte les limites de leur propre méthodologie et reconnaissent la part d'incertitude inhérente à leurs prédictions (voir encadré n° 5). Néanmoins, toutes les modélisations existantes vont dans le même sens et indiquent une tendance qui porte à croire que d'ici à 2100, le protocole de Montréal aura permis d'éviter au moins une centaine de millions de cas de cancer de la peau, et probablement beaucoup plus.




Copyright © Ezra Clark

Toutes les simulations concernant la prévalence du cancer de la peau dans *le Monde que nous avons évité* ont été faites en prenant bien garde de tenir compte des limitations de l'exercice de prédiction. Comme pour tous les aspects de notre compréhension des effets de la raréfaction de l'ozone sur la santé humaine, la modélisation de la prévalence à venir du cancer de la peau doit prendre en compte les facteurs environnementaux, les aspects biologiques de la maladie et les comportements humains.

De ces trois facteurs, les marges d'incertitude les plus faibles se trouvent probablement du côté des variables environnementales ; c'est-à-dire les évolutions de la couche d'ozone et du rayonnement UV. Cependant, comme les modèles ont été affinés au fil du temps, ils ont intégré une meilleure connaissance des tendances de l'évolution des substances qui appauvrissent la couche d'ozone, et de l'ozone lui-même ; y compris les effets de l'évolution du climat sur l'ozone stratosphérique. La prise en compte de l'effet de la couverture nuageuse sur le rayonnement UV a aussi été affinée.

En ce qui concerne les aspects biologiques, les incertitudes portent sur les effets des ultraviolets en fonction de leur longueur d'onde sur les principaux types de cancer, leurs taux de mortalité, l'importance du type d'exposition aux UV (durée, fréquence...), et l'effet protecteur de la pigmentation naturelle variant d'un groupe d'individus à un autre. Les effets du vieillissement et de l'augmentation de la population méritent également d'être pris en compte. Le rapport de l'EPA de 2006 [13] semble indiquer que les facteurs biologiques amènent une incertitude de l'ordre de 60 pour cent dans les estimations concernant les cancers de la peau aux Etats-Unis. Un élargissement de cette modélisation à la population mondiale ne peut à l'évidence qu'augmenter ce taux d'incertitude.

Les plus grandes inconnues dans cet exercice de prédiction sur la prévalence à venir du cancer de la peau concernent le comportement des individus. Dans un monde où le protocole de Montréal n'aurait pas existé, les gens auraient certainement pris conscience de manière aiguë de la menace représentée par les UV. En choisissant d'éviter le soleil, ils auraient sans doute limité dans une certaine mesure l'augmentation des cancers de la peau décrite dans les simulations actuelles. Les changements de comportement rendus nécessaires sont difficiles à cerner. La vie dans *le Monde que nous avons évité* aurait signifié vivre avec des niveaux de radiation UV trois à quatre fois plus élevés que ceux qui sont décrits à l'heure actuelle comme impliquant que « sans protection la peau et les yeux peuvent brûler en quelques minutes ». Les modifications de comportement nécessaires pour vivre dans un tel environnement sont difficiles à imaginer.

The image shows two people in silhouette, jumping joyfully on a beach. The sun is low on the horizon, creating a bright, golden glow that silhouettes the figures. The person on the left is in mid-air, with arms raised high. The person on the right is also jumping, with arms raised and legs bent. The background consists of the ocean and a clear sky. The overall mood is one of happiness and freedom.

“Si l’on veut
prédire l’évolution
de la fréquence
des cancers
de la peau, la
plus grande
inconnue tient au
comportement
des individus”

Les cancers de la peau dans le Monde que nous prévoyons

Comme nous l'avons indiqué plus haut, en limitant l'appauvrissement de la couche d'ozone, le protocole de Montréal a empêché une augmentation dramatique du rayonnement UV. A condition que l'application du protocole de Montréal ne cesse pas, on prévoit aujourd'hui que l'ozone stratosphérique va augmenter tout au long de ce 21^{ème} siècle. Cette augmentation sera plus importante aux latitudes élevées de l'hémisphère sud, comblant le « trou » dans la couche d'ozone qui était apparu dans les années 1970. L'évolution de la quantité de rayonnement UV dans la région antarctique décroîtra en parallèle avec cette augmentation de l'ozone. Les taux de radiation UV vont retourner à leurs niveaux antérieurs à la grande destruction de l'ozone. Dans d'autres parties du monde, la sur-reconstitution de la couche d'ozone (voir p.23) pourrait entraîner des niveaux de radiation UV inférieurs à ce qu'ils ont pu être dans le passé [1,8]

Cependant, les différences d'exposition aux UV observées aux faibles latitudes qui seraient dues aux variations de la couche d'ozone risquent d'être relativement minimales. D'autres facteurs environnementaux peuvent avoir des effets plus importants sur l'exposition aux UV dans le futur. Parmi ceux-ci, l'évolution de la couverture nuageuse qui est attendue du fait des changements climatiques mondiaux [1]. Dans les grandes villes, l'évolution de la qualité de l'air a des effets importants sur l'exposition aux UV car des polluants comme les microparticules et l'ozone troposphérique absorbent les rayons UV

[1,5]. L'amélioration de la qualité de l'air qui est attendue dans de nombreux pays développés signifiera une baisse des niveaux de ces polluants, et l'on s'attend à une augmentation substantielle des index UV, localement, en comparaison des valeurs actuelles [1,5].

La force du lien de cause à effet entre l'exposition aux rayons UV et les cancers de la peau impose une vigilance constante quant à l'évolution prévisible du rayonnement UV. L'évaluation des effets de l'augmentation, même faible, des UV qui s'est produite depuis les années 1970, en dépit du protocole de Montréal, donne à penser qu'il y aura probablement une augmentation des cancers de la peau, avec un maximum entre 2040 et 2060 [12, 13]. Néanmoins, **il est probable que le comportement des individus sera le plus grand facteur d'influence sur la fréquence du cancer de la peau dans le futur**. Alors qu'il existe des indices d'une stabilisation de la prévalence du mélanome dans certains pays, ceux-ci restent une exception. Il y a même des signes qui tendent à montrer que le public est en général moins conscient des risques liés à l'exposition au soleil qu'il y a quelques années [15].

Des programmes d'éducation et de prévention en faveur de la santé publique, comme INTERSUN (voir l'encadré n° 4) demeurent essentiels pour l'avenir. Sans eux, la prévention des cancers apportée par le succès du protocole de Montréal pourrait être remise en cause par l'incapacité des pouvoirs publics à changer l'attitude du public face au soleil.



“La raréfaction de l’ozone, si on n’y avait pas mis un frein, aurait représenté un danger majeur pour la vision des gens partout dans le monde”

La raréfaction de l'ozone, les rayons UV et les maladies oculaires

Pour que nous puissions voir, la lumière doit passer au travers de l'œil et atteindre les cellules sensibles de la rétine. Chez l'homme, les UV-B comme les UV-A sont absorbés avant d'atteindre la rétine. Cela protège les cellules de la rétine, mais les parties de l'œil qui absorbent les UV peuvent en être endommagées, entraînant l'apparition de maladies oculaires.

A court terme, l'exposition à des UV de forte intensité peut endommager les couches superficielles de l'œil (la cornée

ou la conjonctive : figure 8). Un exemple bien connu de ce phénomène est la cécité des neiges (photokératite). L'effet combiné de la forte réverbération sur la neige et la lumière solaire intense en montagne entraîne une forte exposition aux UV qui nécessite le port de lunettes solaires de haute protection. Des blessures similaires peuvent se produire en présence d'une source artificielle de rayons UV de forte intensité, comme par exemple le « coup d'arc » du soudeur, causé par les UV-C produits par les équipements de soudage.

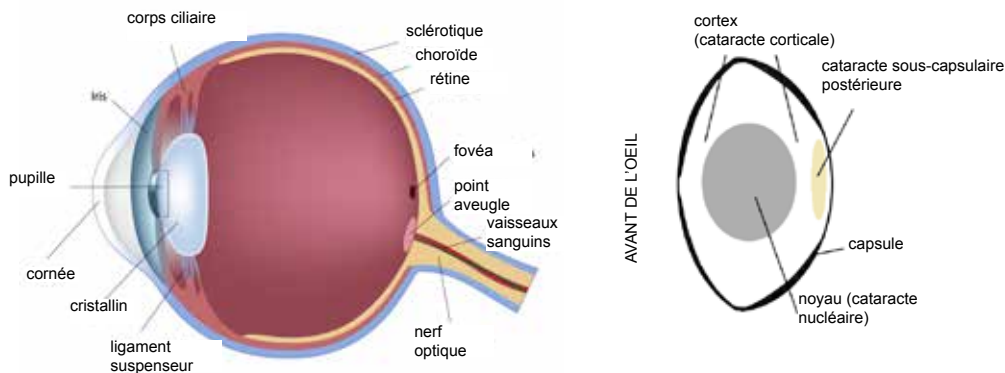


Figure 8 : La structure de l'œil humain. Le diagramme de gauche présente une coupe de l'œil humain montrant sa structure interne. Le diagramme de droite est une illustration agrandie du cristallin, montrant la localisation des trois formes principales de cataracte. Les rayons UV sont particulièrement actifs dans le développement de la cataracte corticale.

A long terme, l'exposition aux UV est liée à de nombreuses maladies oculaires. Parmi celles-ci on compte des cancers de l'œil, qui sont comparables aux cancers de la peau causés par les UV mais qui sont bien plus rares. Mais le plus important des effets à long terme des UV sur l'œil est probablement le risque accru de cataracte. D'après l'OMS, environ 51% des cécités dans le monde sont dues à la cataracte. Chaque année, environ 16 millions de gens perdent la vue parce qu'ils développent une cataracte.

Les rayons UV et la cataracte

La cataracte se caractérise par une opacification du cristallin (figure 8). Dans sa première phase, la vision devient trouble. En l'absence de traitement, le cristallin continue de s'altérer et la perte de vision devient sévère. La cataracte prend des formes différentes, selon la partie du cristallin dans laquelle elle se développe. Le lien entre la cataracte et les UV est évident surtout pour la cataracte corticale. Les UV-B semblent avoir un effet plus important que les UV-A [7].

Comme pour les cancers de la peau, l'Agence américaine de protection de l'environnement a publié une recherche qui permet une estimation de l'évolution possible de la prévalence de la cataracte dans un monde où le Protocole de Montréal n'aurait été mis en œuvre avec succès [14,16]. Le rapport de l'EPA de 2015

[14] arrive à la conclusion que, d'ici à 2100, **l'absence du contrôle de la raréfaction de la couche d'ozone aurait entraîné l'apparition au total de 45 à 50 millions de cas supplémentaires de cataracte, aux seuls Etats-Unis.**

Comme les modèles utilisés pour prédire la fréquence des cancers de la peau, la modélisation permet de produire des estimations larges de la prévalence prévisible dans *le Monde que nous avons évité*. Les auteurs de ce rapport reconnaissent les marges d'incertitude de leur modèle, et qu'ils traitent tous les types de cataracte ensemble, alors que les UV semblent n'affecter qu'un seul type [16]. Même si les méthodes utilisées par l'EPA ont tendance à surestimer les chiffres concernant les Etats-Unis, il faut contrebalancer cela par le fait que la cataracte joue un rôle majeur parmi les causes de cécité dans le monde, et pas seulement aux Etats-Unis. Aucun chiffre mondial n'a été publié concernant la prévalence de la cataracte dans *le Monde que nous avons évité*, mais en s'appuyant sur les indices disponibles, il est raisonnable d'avancer que vers 2100, le protocole de Montréal aura permis d'éviter plusieurs dizaines de millions de cas de cataracte à travers le monde.

La raréfaction de l'ozone, le rayonnement UV et le système immunitaire

Les Humains, comme tous les organismes, sont constamment attaqués par d'autres organismes qui peuvent provoquer des maladies. Nos corps sont protégés des agressions par un éventail de mécanismes qui, ensemble, forment notre système immunitaire (voir encadré n° 6). Au cours des vingt ou trente dernières années, il est devenu évident que le rayonnement UV peut affecter le système immunitaire, mais ces effets sont complexes. Les UV-A et les UV-B ont des effets indépendants sur le fonctionnement du système immunitaire, mais ces effets peuvent avoir des interactions. Les différents composants du système immunitaire peuvent avoir des réactions différentes (voir encadré n°6).

Des études sur l'animal montrent que l'exposition aux UV peut augmenter la sévérité de certaines maladies infectieuses. Il est aussi prouvé qu'une plus grande exposition au soleil peut augmenter la sévérité des éruptions d'herpès (boutons de fièvre) chez les humains et, peut-être, réduire l'efficacité des vaccins [7].

Les maladies auto-immunes sont un groupe d'affections parmi lesquelles on compte le diabète de type 1, la sclérose en plaques, l'arthrite rhumatoïde et certaines colopathies. La prévalence et la sévérité de quelques-unes de ces maladies varient selon les régions du globe, en particulier en fonction de la latitude [7]. Cela a

amené certains chercheurs à suggérer que les maladies auto-immunes peuvent être influencées par l'exposition aux UV. Le cas le plus flagrant de l'influence des UV est celui de la sclérose en plaques [7]. L'examen des éléments dont nous disposons montre que la fréquence et la sévérité de la sclérose en plaques décroît aux latitudes faibles, tout du moins parmi les populations à la peau claire. Les données expérimentales tendent à montrer que l'exposition aux UV pendant la petite enfance, et même pendant la grossesse, pourrait avoir une importante influence sur les risques de développer ensuite une sclérose en plaques [7].

Comme pour les autres effets sur la santé, le fait que le protocole de Montréal ait réussi à limiter l'appauvrissement de la couche d'ozone implique que les changements limités du rayonnement UV qui se sont produits depuis les années 1970, et ceux qui peuvent être attendus dans le cours du 21^{ème} siècle, ont peu de chance d'avoir des effets mesurables sur la fonction immunitaire chez les humains. Néanmoins, la réponse du système immunitaire aux variations de l'exposition aux rayons UV, en fonction de l'endroit où l'on vit, ou des choix que l'on fait quant à son comportement vis-à-vis du soleil, reste pertinente pour la compréhension d'un certain nombre de maladies.

6 : Le système immunitaire et les mécanismes de réponse aux rayons UV

Le système immunitaire humain déclenche un certain nombre de mécanismes pour nous protéger des agressions des micro-organismes et des produits chimiques. Le système immunitaire inné oppose une réponse relativement généralisée et immédiate, qui s'appuie sur des mécanismes comme l'inflammation, un éventail de défenses chimiques (comme les peptides antimicrobiens) et certains types de globule blanc (les phagocytes). Par contraste, les défenses acquises par le système immunitaire adaptatif sont hautement spécifiques et stables dans le temps. L'immunité acquise entraîne la production d'anticorps et une variété de globules blancs qui sont spécifiques pour chaque molécule étrangère. La vaccination apporte une immunité acquise de longue durée contre quelques-unes des infections courantes.

Les UV peuvent affecter le système immunitaire par leur action sur de multiples molécules cibles (le rapport du GEEE en dénombre 5 [7]). Le phénomène est complexe mais il semble que d'une manière générale l'exposition aux rayonnements UV augmente l'activité du système immunitaire inné, mais réduit l'activité du système immunitaire adaptatif.



La raréfaction de l'ozone, le rayonnement UV et la vitamine D

Ces dernières décennies, les scientifiques ont revu complètement la façon dont ils considèrent le rôle des UV solaires dans la santé en intégrant leur rôle dans la production de vitamine D par la peau [7].

Les déformations des os, comme le rachitisme, sont connues depuis des siècles. Une meilleure compréhension du rôle des vitamines dans la santé humaine a rendu évident le fait que le rachitisme est dû à un manque de vitamine D. Dès les années 1920, on savait que les humains peuvent synthétiser la vitamine D au niveau de la peau si celle-ci est exposée au soleil. On sait que c'est la composante UV-B de la lumière solaire qui déclenche le plus la synthèse de la vitamine D.

Quelques aliments, comme les poissons gras, sont des sources naturelles de vitamine D, et certains aliments préparés peuvent en contenir sous forme d'additifs, mais pour la plupart des gens sur la planète, la source principale de vitamine D est celle qui est synthétisée par leur peau. En conséquence, une carence en vitamine D peut se développer si la peau n'est pas capable de synthétiser suffisamment de vitamine D.

Le rayonnement UV et la carence en vitamine D

La production de vitamine D au niveau de la peau dépend de l'exposition au soleil. A des latitudes élevées, pendant

l'hiver, la composante UV-B de la lumière solaire peut devenir trop faible pour une synthèse suffisante de la vitamine D. Les vêtements d'hiver qui laissent une très petite portion de la peau exposée à la lumière, et le temps réduit que les gens passent à l'extérieur en hiver réduisent d'autant la possibilité de synthèse de la vitamine D. Les pigments qui protègent notre peau des dégâts causés par les UV peuvent aussi réduire la quantité de vitamine D synthétisée, aussi les gens à la peau plus foncée sont en général plus facilement sujets à une carence en vitamine D que les individus à la peau plus claire aux mêmes latitudes [7].

De nombreuses études ont montré que la concentration en vitamine D dans le corps est plus faible pendant l'hiver aux latitudes élevées. La concentration à partir de laquelle on peut être considéré comme carencé est moins clairement définie, de même que les conséquences de la carence sur la santé [7].

La carence en vitamine D et la maladie

Depuis quelques années, certains pensent que la vitamine D a un rôle bien plus vaste dans la santé humaine que la seule prévention de la décalcification osseuse [7]. La carence en vitamine D favoriserait une plus grande susceptibilité à toute une variété de maladies [7]. Parmi celles-ci, des infections comme la

tuberculose, des maladies auto-immunes, et en particulier la sclérose en plaque, et un certain nombre de cancers viscéraux, comme les cancers du côlon, du sein, de l'utérus ou de la prostate.

Cette influence bien plus grande de la vitamine D est le sujet d'un débat considérable [7]. En grande partie parce que les arguments en faveur de cette théorie sont basés sur les variations de prévalence de ces maladies en fonction de la latitude. Ces variations peuvent aisément être reliées aux variations d'intensité du rayonnement UV. Cependant, les effets directs des radiations UV sur le système immunitaire, indépendamment de la production de vitamine D, peuvent aussi expliquer ces variations géographiques [7].

Il est maintenant clair que, par le truchement de la vitamine D ou par un éventail de mécanismes, **l'exposition à une certaine quantité de rayonnement UV est bénéfique pour la santé**. Ceci pose un sérieux problème à tout individu et aux responsables de la santé publique. Comment recevoir la quantité d'UV qui nous est nécessaire, sans en recevoir trop ? Au-delà de cette question, est-ce que les variations à venir de la couche d'ozone vont affecter l'équilibre entre les « bons » et les « mauvais » effets des rayons UV ?

Malheureusement, il n'y a pas de règle claire et nette pour calculer la « bonne quantité » d'exposition au soleil. D'un individu à l'autre, la vulnérabilité aux dégâts des UV varie, ainsi que la quantité qui leur est nécessaire pour fabriquer la vitamine D dont ils ont besoin. La latitude sous laquelle on vit est également un facteur important, les niveaux d'UV étant plus hauts aux latitudes plus faibles, réduisant les risques de carence en vitamine D mais augmentant les risques de cancer de la peau.

La baisse des UV qui est attendue du fait de la reconstitution de la couche d'ozone dans les décennies à venir sera vraisemblablement trop faible pour modifier le temps d'exposition nécessaire pour obtenir des effets, que ce soit un coup de soleil ou la quantité suffisante de vitamine D. Une simulation publiée récemment qui prend en compte ces deux aspects de l'action des UV suggère que le temps nécessaire pour un individu à la peau claire pour obtenir un léger coup de soleil, ou pour produire de la vitamine D, augmentera de quelques minutes seulement d'ici à 2100 (figure 9). Le temps nécessaire à une peau claire pour produire de la vitamine D reste inférieur à celui qui causera un coup de soleil. [17].

Le message à faire passer reste le même : les UV en quantité excessive constituent

un risque pour la santé à long terme, en particulier par l'accroissement des risques de cancer de la peau. Des programmes

comme INTERSUN (encadré n° 4) restent un élément important de l'éducation à la santé du grand public pour l'avenir.

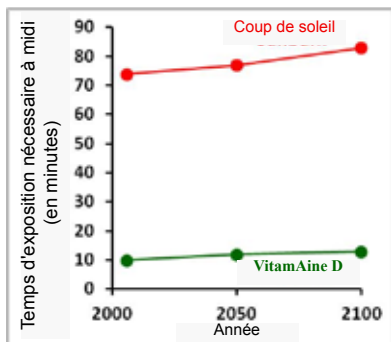


Figure 9 : Evolution prévue du temps nécessaire pour obtenir un coup de soleil léger ou pour synthétiser la vitamine D en fonction de l'évolution prévue du rayonnement UV au cours du 21^{ème} siècle. Le temps d'exposition est calculé pour une latitude de 52° Nord, au printemps, pour un sujet à la peau claire (peau de type II). Le temps requis pour la synthèse de 1000 unités internationales de vitamines D suppose que le sujet expose son visage, ses bras et ses mains. Extrapolé de Correa et al (2013) [17].



D'autres effets potentiels de la raréfaction de l'ozone sur la santé humaine

La prévention d'une augmentation importante des cas de cancer de la peau et de cataracte sont des exemples des bénéfices directs de la protection de la couche d'ozone sur la santé humaine. On peut même tenter de faire des estimations quantitatives de l'ordre de grandeur de ces bénéfices tirés de la réussite de la mise en œuvre du Protocole de Montréal.

En outre, le Protocole de Montréal présente d'autres bienfaits pour la santé. Certaines des substances qui appauvrissent la couche d'ozone sont toxiques pour l'homme, comme le bromure de méthyle. Remplacer des substances nocives pour l'ozone et toxiques par des technologies moins toxiques aura réduit les risques pour la santé des utilisateurs. Certaines des substances qui appauvrissent la couche d'ozone sont aussi des gaz à effet de serre très puissants, comme c'est le cas des CFC en particulier. En remplaçant ces CFC par d'autres produits qui contribuent moins à l'effet de serre, le Protocole de Montréal aura apporté une contribution significative à la protection du climat. Ainsi, il contribuera à réduire les risques de santé liés à l'élévation de la température et aux autres éléments du changement climatique.

Si l'on s'attache au rayonnement UV, les effets d'une hausse du rayonnement UV dans *le Monde que nous avons évité* ne se

limiterait pas aux seuls humains. Les effets de la raréfaction de la couche d'ozone sur d'autres organismes et écosystèmes, et sur les processus environnementaux, auraient eu de nombreux effets induits sur la santé humaine

Notre connaissance des mécanismes par lesquels opèrent les effets indirects de la raréfaction de l'ozone, sur la qualité de l'air et de l'eau ou sur la production des denrées alimentaires, nous montre qu'il n'y aurait pas de décalage dans le temps entre l'évolution de la couche d'ozone et la réaction. Ceci est en contraste avec le décalage qui se compte en années ou en dizaines d'années que l'on observe pour les effets directs, comme le cancer de la peau. Ainsi ces évolutions indirectes auraient pu être les premières à avoir des effets visibles dans *le Monde que nous avons évité*, bien plus tôt que l'augmentation des cancers de la peau ou de la cataracte. Ces changements induits auraient affectés tous les habitants de la planète. Tout le monde a besoin de nourriture, en quantité et de qualité suffisantes, et tout le monde a besoin d'eau et d'air purs.

Il n'est pas encore possible d'être précis quant à l'ordre de grandeur et au temps qu'auraient pris les effets indirects de la raréfaction de l'ozone sur la santé. En dépit des incertitudes concernant ces effets indirects ils doivent certainement entrer



en ligne de compte pour une évaluation des bienfaits du Protocole de Montréal sur les individus et les communautés dans le monde entier.

Altérations dues aux effets de la raréfaction de l'ozone sur le climat

Les recherches portant sur l'impact environnemental de la raréfaction de l'ozone se sont concentrées presque entièrement sur les effets induits par les évolutions du rayonnement UV. Depuis quelques années, il est devenu clair que la raréfaction de l'ozone peut aussi avoir un impact important sur le climat [1, 3, 8] et que cela peut avoir des répercussions sur les gens. Même si le Protocole de Montréal est un succès, le trou dans la couche d'ozone antarctique

provoque des modifications du climat sur de larges étendues de l'hémisphère sud, parmi lesquelles des modifications des températures et des régimes des pluies [3,8].

Altération de la qualité de l'eau

Les UV naturellement présents dans la lumière solaire peuvent tuer des micro-organismes pathogènes dans les plans d'eau et, partant, réduire les risques de maladies transmises par l'eau [2]. Les UV peuvent aussi accélérer la dégradation des polluants organiques [4]. Dans *le Monde que nous avons évité*, ces effets purifiants des rayons UV auraient été augmentés. Cependant, les éventuels effets positifs sur la santé humaine qui auraient pu en découler auraient été bien minces à n'en pas douter, comparés aux effets négatifs.

Altération de la sécurité alimentaire

De nombreuses plantes cultivées s'adaptent aux variations du rayonnement UV avec les saisons sans que cela ait des effets dévastateurs sur la qualité ou l'abondance des récoltes [3]. Mais d'un autre côté, il y a de bonnes raisons d'affirmer que les UV, et en particulier les UV-B, s'ils dépassent les niveaux courants peuvent constituer un danger pour le rendement et la qualité des récoltes [3].

La relation entre l'accroissement des UV-B et la production des denrées alimentaires dans *le Monde que nous avons évité* ne peut pas être quantifiée en l'état actuel de nos connaissances. C'est dû en partie au fait que chaque culture va réagir différemment et que très peu ont fait l'objet d'études spécifiques. Un autre facteur réside dans le niveau de traitement aux rayons UV que l'on fait subir aux plantes dans les études sur le terrain. Par exemple, une des premières études générales des réactions des plantes en plein champ portait du principe qu'une diminution supérieure à 20 pour cent de la couche d'ozone devait être considérée comme « un haut niveau de raréfaction » [18]. Ce qui constituait probablement une bonne estimation de ce que serait le monde en cas de succès partiel du Protocole de Montréal, mais qui est très optimiste en comparaison des pertes d'ozone prédites dans *le Monde que nous avons évité*. Ces prédictions sont de l'ordre de 80 pour cent de perte d'ozone dans certains cas. Cette même étude

des réactions des cultures [18] montrait qu'une « haute » raréfaction de l'ozone (essentiellement 20 à 30 pour cent) réduisait la biomasse des plantes de 16 pour cent en moyenne. Ce chiffre englobe la plupart des cultures alimentaires les plus courantes et donne une idée de l'étendue des effets d'une destruction incontrôlée de l'ozone sur les productions agricoles.

Il est clair que certaines des espèces de poissons qui sont pêchées ou élevées peuvent souffrir de niveaux élevés d'UV au stade adulte ou à d'autres stades de leur développement [2]. Les UV peuvent aussi détruire le plancton qui est la base de la chaîne alimentaire marine, et conséquemment réduire les ressources halieutiques [2]. Néanmoins, la difficulté inhérente aux études expérimentales concernant l'influence des UV en milieu aquatique, et en particulier marin, rend ardue l'estimation de la magnitude des effets d'une destruction incontrôlée de l'ozone sur la pêche.

En résumé, nous ne pouvons pas encore chiffrer l'ampleur des effets indirects de la raréfaction de l'ozone sur la santé humaine. Néanmoins, nous pouvons dire que, si elle n'avait pas été freinée, la raréfaction de l'ozone aurait accru l'insécurité alimentaire, avec tous les effets qui lui sont associés sur la santé de l'Homme.

Au bout du compte : la valeur économique des bienfaits pour la santé du protocole de Montréal

Plusieurs estimations de la valeur financière du Protocole de Montréal ont été effectuées. La plus récente de ces estimations [19] avance que les bienfaits pour la santé publique représentent 80 pour cent du bénéfice total du Protocole de Montréal, estimé à 1 800 milliards de dollars US d'ici à 2060 (figure 10). Une partie de ce bénéfice vient de l'absence du coût des soins qui auraient été associés au traitement des nombreux cas de cancers non mortels et de cataracte qui étaient prévisibles dans *le Monde que nous avons évité*. Un bénéfice financier encore plus grand vient du nombre de vies sauvées en évitant une augmentation conséquente des cancers de la peau, et en particulier de mélanome. Cela représente environ 50 pour cent du bénéfice économique total du protocole de Montréal. Il est intéressant de noter que,

en raison du décalage entre l'exposition aux UV et le développement du cancer de la peau (voir plus haut) ces estimations financières n'englobent pas les effets de l'effondrement global de la couche d'ozone que les modélisations prédisent pour le milieu du 21^{ème} siècle (voir p 24).

Dans *le Monde que nous avons évité*, cet effondrement de l'ozone prévu autour de 2050 aurait causé une augmentation spectaculaire des UV dans la seconde moitié du siècle. Les conséquences sur la santé à l'échelle mondiale n'ont pas encore été quantifiées (voir plus haut). Néanmoins, il semble probable que le bénéfice économique du Protocole de Montréal vers fin du siècle sera largement plus grand que celui qui est envisagé pour la période qui court d'ici à 2060.

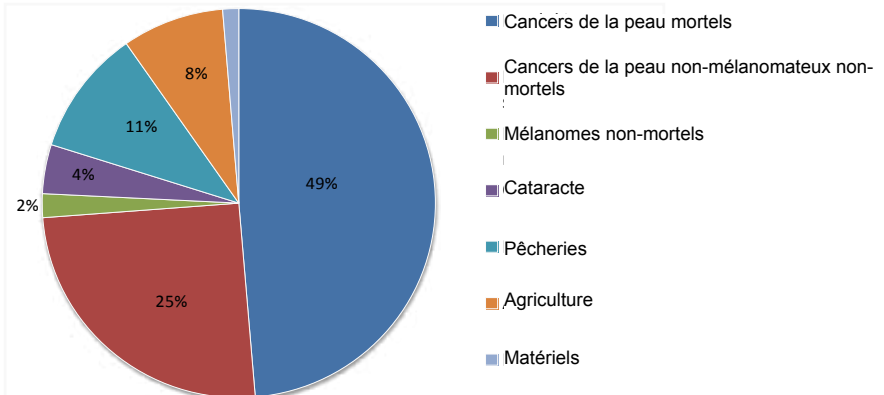


Figure 10 : Les bénéfices financiers estimés du Protocole de Montréal d'ici à 2060. Les chiffres sont exprimés en valeur absolue, en milliards de dollars constants de 1997. Tiré de Markandya & Dale (2012) [19]

Remarques finales

Une grande partie de ce livret a été consacrée aux changements que la santé des hommes aurait subis dans le futur si le protocole de Montréal n'avait pas été appliqué avec succès. Les simulations du *Monde que nous avons évité* nous montrent la vision la plus réaliste que la science puisse nous fournir d'un monde qui, fort heureusement, ne sera pas celui dans lequel nous, nos enfants et nos petits-enfants vivront. Ces modélisations, associées à une connaissance de plus en plus pointue des mécanismes biologiques qui régissent les effets des UV sur la santé des humains, ont confirmé la menace pesant sur la santé humaine qui avait été reconnue par les Parties signataires du Protocole de Montréal dès 1987.

Notre appréhension du Monde que nous avons évité ne va pas cesser de s'affiner et de s'approfondir. Les modèles de prédiction de l'interaction des UV et de l'ozone dans *le Monde que nous avons évité* sont de plus en plus fiables. Peut-être sommes-nous dans une position où nous pouvons adopter une approche d'ensemble, en utilisant de nombreuses modélisations qui, en se recoupant, pourront générer des prédictions encore plus fiables. Cela permettrait de combler les manques qui existent encore dans notre connaissance et qui nous empêchent d'évaluer de façon

exhaustive les bienfaits de la mise en œuvre du Protocole de Montréal. Par exemple, nous sommes pour l'instant incapables de quantifier la façon dont la destruction de l'ozone à la fin de ce siècle aurait pu affecter la santé dans *le Monde que nous avons évité*, au-delà de l'année 2100. Les limites de nos modèles existants nous empêchent également de quantifier de manière détaillée les effets indirects, comme ceux qui affecteraient la production de denrées alimentaires.

Néanmoins, l'étendue des dommages causés à la santé si nous n'avions pas su protéger la couche d'ozone est d'ores et déjà évidente. La santé et le bien-être de centaines de millions de gens, dont beaucoup sont encore à naître, ont été protégés grâce aux efforts concertés des signataires du Protocole depuis 1987. Pourrait-il y avoir une meilleure réponse aux interrogations qui pourraient se faire jour quant aux raisons qui nous ont poussés à protéger la couche d'ozone, ou une meilleure raison de célébrer les bienfaits qui ont découlé de la réussite de cette protection ?

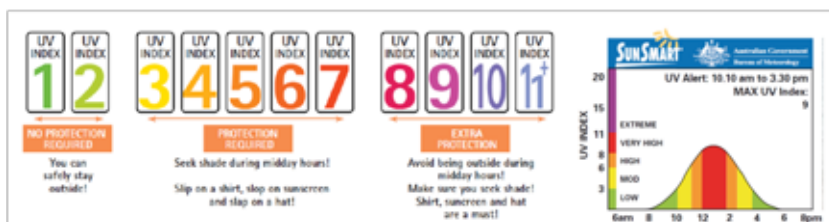
Les rayons UV qui atteignent la surface de la Terre sont communément divisés en UV-A et UV-B. Ces deux composantes du spectre UV sont définies en fonction de leur longueur d'onde. Les UV-B sont compris entre 290 et 315 nm, les UV-A entre 315 et 400 nm.

Il est souvent possible de faire des généralisations en ce qui concerne les effets des UV-A et des UV-B comme, par exemple, « les UV-B sont plus dangereux que les UV-A ». Cependant, ceci est rarement suffisant pour rendre compte des effets des UV sur la santé humaine. Chaque cible potentielle des rayons UV, qu'il s'agisse d'une molécule comme l'ADN ou un processus comme le développement d'un cancer, réagit selon son propre modèle aux différentes longueurs d'onde ultraviolettes.

En utilisant ces réponses caractéristiques aux différentes longueurs d'onde, on peut rendre compte des changements de répartition des différentes longueurs d'onde dans la lumière solaire. Ces changements s'opèrent en fonction de la latitude, de la saison et aussi de la raréfaction de l'ozone.

Pour la santé humaine, la réaction à ces longueurs d'onde qui prend la forme d'un coup de soleil est utilisée comme raccourci pour englober une variété de réponses. Les chercheurs désignent souvent les UV en référence à cette quantité d'UV qui provoque le coup de soleil (ou érythème solaire). C'est cette dose d'UV dite érythémale qui constitue la base de l'index UV.

L'index UV "mesure" ses UV érythémaux selon une échelle simple et standardisée qui peut être utilisée dans les bulletins météo et autres modes d'information du public. Elle fournit un instantané qui permet à chacun de faire le choix de s'exposer ou non, en connaissance de cause, au soleil.



© OMS INTERSUN

Références et suggestions de lecture

(ouvrages et articles en langue anglaise)

1. Bais, A.F., *et al.*, (2015) Ozone depletion and climate change: impacts on UV radiation, p. 1-47 in Environmental effects of ozone depletion and its interactions with climate change: 2014 Assessment. United Nations Environment Programme, Nairobi.
2. Häder, D.-P., *et al.*, (2015) Effects of UV radiation on aquatic ecosystems and interactions with other environmental factors. p. 121-147. In Environmental effects of ozone depletion and its interactions with climate change: 2014 Assessment. United Nations Environment Programme, Nairobi.
3. Bornman, J.F., *et al.*, (2015) Solar ultraviolet radiation and ozone depletion-driven climate change: Effects on terrestrial ecosystems. p. 95-119 In Environmental effects of ozone depletion and its interactions with climate change: 2014 Assessment. United Nations Environment Programme, Nairobi.
4. Erickson, D.J., *et al.*, (2015) Effects of stratospheric ozone depletion, solar UV radiation, and climate change on biogeochemical cycling: Interactions and feedbacks. p. 149-177. In Environmental effects of ozone depletion and its interactions with climate change: 2014 Assessment. United Nations Environment Programme, Nairobi.
5. Madronich, S. *et al.*, (2015) Changes in air quality and tropospheric composition due to depletion of stratospheric ozone and interactions with changing climate: Implications for human and environmental health. p. 179-206. In Environmental effects of ozone depletion and its interactions with climate change: 2014 Assessment. United Nations Environment Programme, Nairobi.
6. Andradý A.L. *et al.*, (2015). Consequences of Stratospheric Ozone Depletion and Climate Change on the Use of Materials p. 207-227. In Environmental effects of ozone depletion and its interactions with climate change: 2014 Assessment. United Nations Environment Programme, Nairobi.
7. Lucas, R.M., *et al.*, (2015) The human health effects of ozone depletion and interactions with climate change, p. 49-94 in Environmental effects of ozone depletion and its interactions with climate change: 2014 Assessment. United Nations Environment Programme, Nairobi.
8. Assessment for Decision-Makers WMO Global Ozone Research and Monitoring Project – Report No. 56. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014, United Nations Environment Programme, Nairobi.
9. Newman, P.A., *et al.*, (2009) What would have happened to the ozone layer if chlorofluorocarbons (CFCs) had not been regulated? Atmospheric Chemistry and Physics, 9: 2113-2128.
10. Egorova, T. *et al.*, (2013) Montreal Protocol Benefits simulated with CCM SOCOL. Atmospheric Chemistry and Physics, 13: 3811-3823.
11. van Dijk, A., *et al.*, (2013) Skin Cancer Risks Avoided by the Montreal Protocol-Worldwide Modeling Integrating Coupled Climate-Chemistry Models with a Risk Model for UV. Photochemistry and Photobiology, 89: 234-246.
12. Slaper, H., *et al.*, (1996) Estimates of ozone depletion and skin cancer incidence to examine the Vienna Convention achievements. Nature, 384: 256-258.

13. Human Health Benefits of Stratospheric Ozone Protection. USA Environmental Protection Agency, Washington (2006)
14. Updating ozone calculations and emissions profiles for use in the atmospheric and health effects framework model. USA Environmental Protection Agency, Washington (2015)
15. Anon (2012), Sunburn and Sun Protective Behaviors Among Adults Aged 18–29 Years — United States, 2000–2010. *Morbidity and Mortality Weekly Report (MMWR)* May 11, 2012. 61(18): 317-322.
16. Protecting the ozone layer protects eyesight. A report on cataract incidence in the United States using the atmospheric and health effects framework model. USA Environmental Protection Agency (2010).
17. Correa, M.d.P., *et al.*, (2013) Projected changes in clear-sky erythemal and vitamin D effective UV doses for Europe over the period 2006 to 2100. *Photochemical & Photobiological Sciences*. 12: 1053-64.
18. Searles, P.S., S.D. Flint, and M.M. Caldwell, (2001) A meta analysis of plant field studies simulating stratospheric ozone depletion. *Oecologia*, 127: 1-10.
19. Markandya, A. and N. Dale, (2012) *The Montreal Protocol and the Green Economy. Assessing the contributions and co-benefits of a Multilateral Environmental Agreement*, United Nations Environment Programme, Nairobi.

A propos du programme ActionOzone du PNUE

Dans le cadre du Protocole de Montréal sur les substances qui appauvrissent la couche d'ozone, les pays du monde entier prennent des mesures spécifiques, selon un calendrier donné pour réduire et éliminer la production et la consommation de produits chimiques synthétiques qui détruisent la couche d'ozone stratosphérique, le bouclier de protection de la Terre.

L'objectif du Protocole de Montréal sur les substances qui appauvrissent la couche d'ozone (SAO), qui comprennent les CFC, les halons, le bromure de méthyle, le tétrachlorure de carbone, le méthylchloroforme et des HCFC. Cent quatre-vingt-dix-sept pays ont signé cet accord environnemental multilatéral et prennent des mesures.

La branche ActionOzone du PNUE DTIE vient en aide aux pays en développement et en transition afin de leur permettre de parvenir à se conformer au protocole de Montréal et à maintenir ces résultats. Avec l'aide de notre programme, ces pays sont en mesure de prendre des décisions éclairées dans leur choix des technologies alternatives, de politiques inoffensives pour la couche d'ozone, et dans les mesures d'application de ces politiques.

ActionOzone travaille essentiellement dans deux domaines :

- L'aide aux pays en développement, dans le cadre du mandat donné au PNUE en tant qu'agence d'exécution du Fonds multilatéral pour la mise en oeuvre du protocole de Montréal, au moyen du Programme d'aide à la mise en conformité.
- Les partenariats avec des agences bilatérales et des gouvernements.

Les partenariats du PNUE dans le cadre du protocole de Montréal contribuent à la réalisation des Objectifs de développement du Millénaire et à la mise en oeuvre du Plan stratégique de Bali.

Pour plus d'informations

Dr. Shamila Nair-Bedouelle, Directrice, Branche ActionOzone,
PNUE DTIE

1 rue Miollis, Batiment VII, 75015 Paris, France

Tel: +331 4437 1455, Fax: +331 4437 1474

Email: shamila.nair-bedouelle@unep.org

Web: <http://www.unep.org/ozonaction/>

A propos de la Division Technologie, Industrie et Economie du PNUE

Etablie en 1975, trois ans après la création du PNUE, la Division Technologie, Industrie et Economie (DTIE) fournit des solutions aux décideurs politiques et aide à transformer le milieu des affaires en offrant des plateformes de dialogue et de coopération, des options politiques innovantes, des projets pilotes et des mécanismes de marché créatifs.

La Division joue un rôle de premier plan dans trois des six priorités stratégiques du PNUE : **le changement climatique, les substances nocives et les déchets dangereux, et l'utilisation efficace des ressources.**

De Paris, le bureau de direction coordonne les activités menées par:

- > **Le Centre international d'éco-technologie** - IETC (Osaka, Shiga), qui assure la collecte et la dissémination des connaissances sur les technologies respectueuses de l'environnement, avec un focus sur la gestion des déchets. L'objectif général est favoriser la conversion des déchets en ressources et de réduire ainsi les impacts sur la santé et sur l'environnement (terre, eau et air).
- > **La Branche Production et Consommation** (Paris), qui encourage des modes de consommation et de production durables afin de contribuer au développement de la société par le marché.
- > **La Branche Substances chimiques** (Genève), qui catalyse les efforts mondiaux destinés à assurer une gestion des produits chimiques respectueuse de l'environnement et à améliorer la sécurité relative à ces produits dans le monde.
- > **La Branche Energie** (Paris et Nairobi), qui favorise des politiques de développement durable en matière énergétique et de transport et encourage les investissements dans les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique.
- > **La Branche Action Ozone** (Paris), qui, dans le cadre du Protocole de Montréal, soutient les programmes d'élimination progressive des substances appauvrissant la couche d'ozone dans les pays en développement et les pays en transition.
- > **La Branche Economie et Commerce** (Genève), qui aide les pays à intégrer les considérations d'ordre environnemental dans les politiques économiques et commerciales et mobilise le secteur financier pour intégrer le développement durable dans ses stratégies. Ce service produit également des rapports sur l'économie verte.

La Division collabore avec de nombreux partenaires (agences et programmes des Nations Unies, organisations internationales, organisations non gouvernementales, entreprises, médias et grand public) pour mener des opérations de sensibilisation, et pour assurer le transfert d'information et de connaissances, le renforcement des capacités, l'appui à la coopération technologique, ainsi que la mise en œuvre des conventions et accords internationaux.

Pour en savoir plus,
www.unep.org/dtie

www.unep.org

United Nations Environment Programme
P.O. Box 30552 Nairobi, Kenya
Tel.: ++254-(0)20-762 1234
Fax: ++254-(0)20-762 3927
E-mail: unepubb@unep.org



Pour plus d'informations, veuillez contacter :
UNEP DTIE
Branche ActionOzone
1 rue Miollis, Batiment VII, 75015 Paris, France
Tel: +331 4437 1450
Fax: +331 4437 1474
ozonaction@unep.org
www.unep.org/ozonaction



Ce livret fait la synthèse de ce que la réussite de la mise en œuvre du protocole de Montréal a fait pour la protection de la santé des Hommes. Il montre comment la raréfaction de l'ozone aurait amené une augmentation radicale du rayonnement UV et, s'appuyant sur la connaissance scientifique des mécanismes par lesquels les UV affectent les processus biologiques, comment cette augmentation aurait entraîné une augmentation dramatique des cas de cancer de la peau et de cataracte, et aurait affecté la santé humaine dans d'autres domaines. Il rend compte également des récents progrès de la science dans la compréhension du *Monde que nous avons évité* – c'est-à-dire le monde dans lequel nous aurions vécu sans le succès du Protocole de Montréal.