European Journal of Applied Sciences – Vol. 10, No. 4
Date de Publication : 25 août 2022
DOI:10.14738/aivp.104.12689.

Destruction de l'ozone stratosphérique : Rôle du fer des cendres volantes de charbon en aérosol

Mark Whiteside, M.D., M.P.H.
Département de la santé de Floride, Key West, FL 33040 USA
J.Marvin Herndon, Ph.D.
Transdyne Corporation, San Diego, CA 92131 USA

RÉSUMÉ

Nous avons déjà fourni des preuves irréfutables que les particules de cendres volantes de charbon en aérosols, et non les chlorofluorocarbures (CFC), sont la cause principale de l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique [European Journal of Applied Sciences, 2022, 10(3), 586-603]. Nous portons ici notre attention sur le fer, l'un des éléments les plus réactifs parmi les autres éléments présents dans les cendres volantes de charbon qui détruisent l'ozone. Le fer présent dans les aérosols primaires et secondaires joue un rôle crucial dans la formation des cristaux de glace dans les cirrus et les nuages stratosphériques polaires qui sont à l'origine de la destruction de la couche d'ozone. Le fer est associéaux espèces réactives de l'oxygène, comme le radical hydroxyle (OH) qui détruit l'ozone dans la stratosphère. Le fer est connu pour activer les halogènes, notamment le chlore, le brome, et l'iode. L'ozone est détruit par adsorption sur des particules contenant du fer et par des réactions photochimiques avec d'autres constituants des cendres volantes de charbon. L'incapacité de la communauté scientifique à se défaire du paradigme des CFC et à s'attaquer à la véritable cause de l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique est une erreur potentiellement fatale. Nous sommes déjà confrontés à un avenir épouvantable avec des niveaux d'ozone stratosphérique sévèrement réduits et la dévastation causée par les rayons ultraviolets mortels. Toutes les sources d'aérosols de cendres volantes de charbon doivent être réduites ou éliminées ; en premier lieu, la pulvérisation délibérée, secrète et quasi globale par avion de particules de cendres de charbon dans la haute troposphère.

Mots clés : Trou dans la couche d"ozone, géo-ingénierie, chemtrails, troposphère, réchauffement climatique, rayonnement ultraviolet.

AGGRAVATION DE LA DESTRUCTION DE L'OZONE STRATOSPHÉRIQUE

Malgré le récit officiel d'une "récupération progressive de l'ozone" grâce au Protocole de Montréal, qui a conduit à l'élimination progressive puis à l'interdiction des chlorofluorocarbones (CFC), la vérité est que l'ozone stratosphérique continue de diminuer et que les scientifiques de l'atmosphère ne savent ou ne ne veulent pas dire à quel point la couche d'ozone a été endommagée. Les

scientifiques de la l'Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace (NASA) et de l'Administration Nationale Océanique et Atmosphérique (NOAA) ont reconnu en 2018 qu'il y avait une diminution de l'ozone de la basse stratosphère qui contrebalançait le rétablissement global de la couche d'ozone. Ils ont affirmé ne pas connaître les causes de cet appauvrissement et ont souligné que " les causes doivent être établies de toute urgence " [1]. D'autres ont attribué l'appauvrissement de l'ozone de la basse stratosphère à des substances à courte durée de vie contenant du chlore ou du brome [2]. Deux des plus grands trous d'ozone de l'Antarctique jamais enregistrés se sont produits en 2020 et 2021. Le changement climatique, l'activité volcanique et les feux de forêt ont été suggérés comme causes de ces énormes trous d'ozone [3]. Un déplacement du vortex polaire a été accusé d'être à l'origine de l'appauvrissement continu de l'ozone stratosphérique au-dessus du continent eurasien [4].

La pénétration rapidement croissante des rayons ultraviolets B et C à la surface de la Terre laisse présager un appauvrissement potentiellement grave de l'ozone stratosphérique. Les effets destructeurs clairement visibles des UV sur les écosystèmes mondiaux, y compris les forêts et les récifs coralliens, devraient constituer un signal d'alarme indiquant que l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique pourrait être la menace la plus imminente pour la biosphère [5]. Récemment, non seulement un grand trou d'ozone a été observé dans l'Arctique [6], mais aussi sous les tropiques [7]. D'après ces indications, ainsi que des données présentées figure 1 [8] et d'autres données [9, 10], une chose est très claire : le Protocole de Montréal a mal diagnostiqué la cause de l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique, et ses interdictions sur les chlorofluorocarbones n'ont pas été la solution.

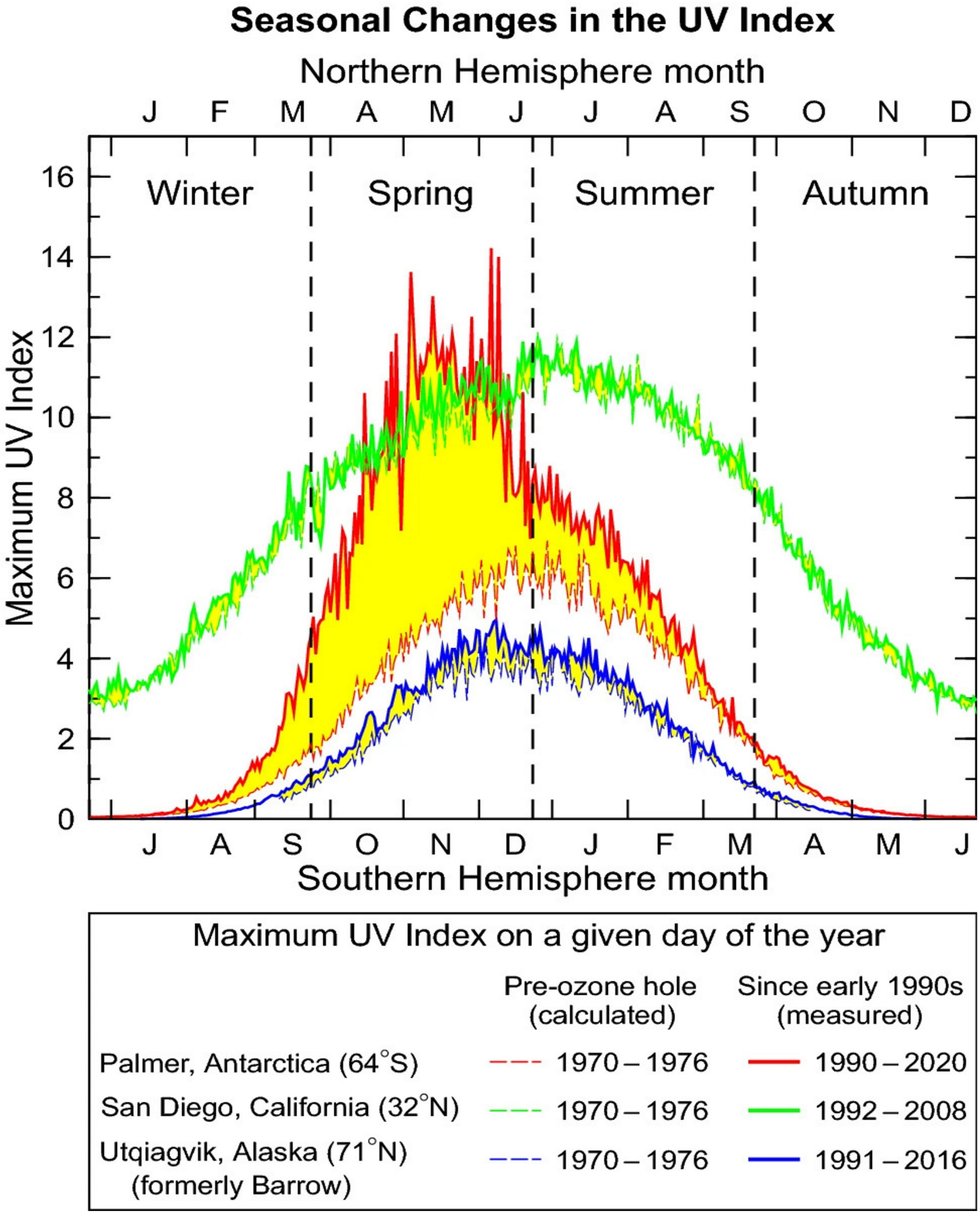

Figure 1. Le statut actuel et historique de l'ozone stratosphérique donné par les mesures de l' Index UV révélant l'aggravation du trou d'ozone en Antarctique.Tiré de [8]

Nous avons récemment publié des preuves irréfutables que les particules en aérosols de cendres volantes de charbon, déchets toxiques de la combustion du charbon, et non les chlorofluorocarbones (CFC), sont la cause principale de l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique [11], comme l'illustre schématiquement la figure 2.

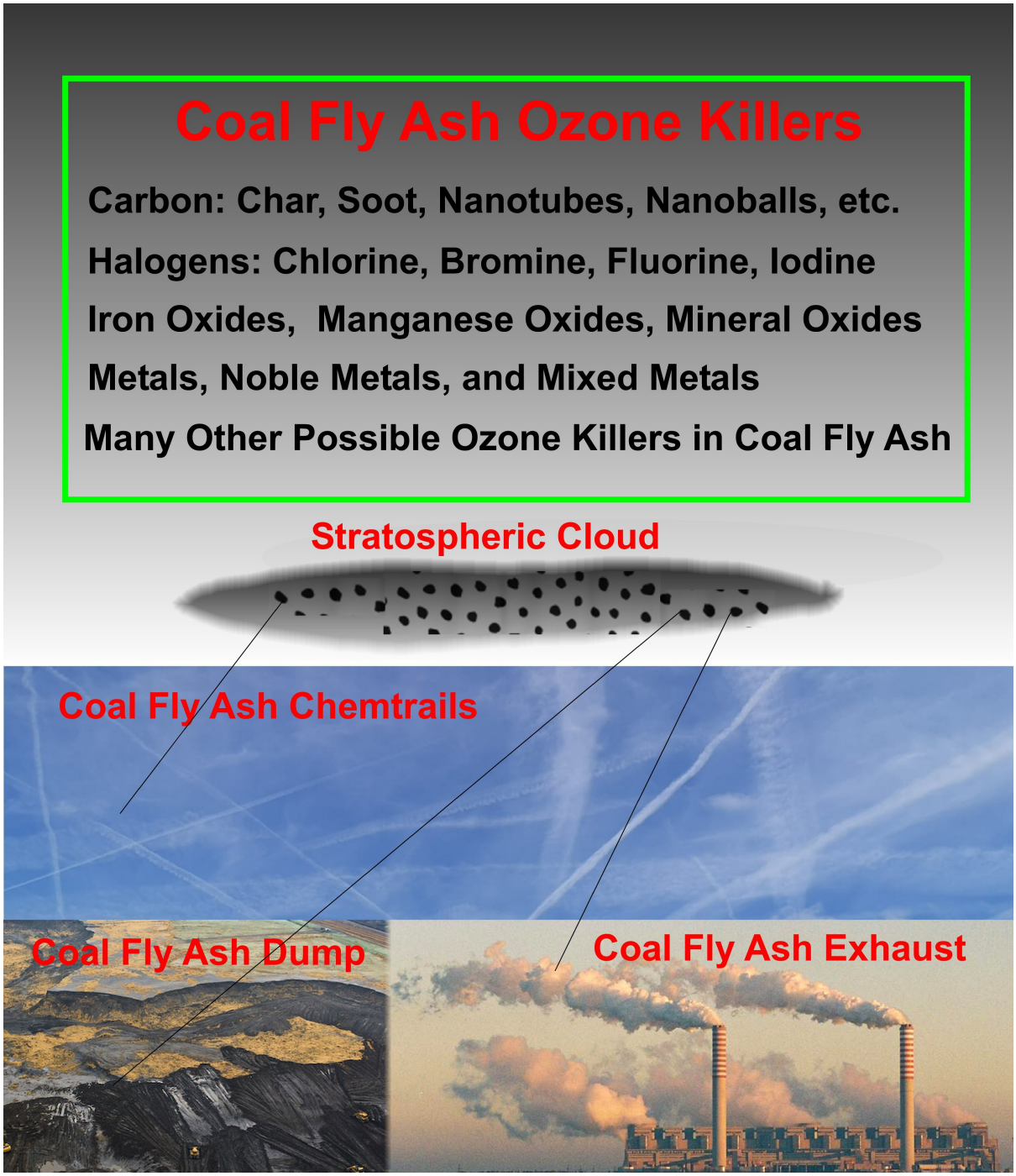

Figure 2. Graphique illustrant les principales sources de cendres volantes de charbon en aérosols dans un nuage stratosphérique polaire chargé de particules, et quelques-uns des nombreux composants des cendres volantes de charbon qui détruisent directement l'ozone [11, 12].

CENDRES VOLANTES DE CHARBON EN AÉROSOLS

Les particules de cendres volantes de charbon en aérosol sont des agents efficaces de nucléation de la glace dans les nuages de haute altitude. Les cirrus stratosphériques se forment autour de poussières minérales et d'oxydes métalliques, les cendres volantes de charbon contribuant largement à ces deux catégories [13]. Dans la troposphère, les particules d'aérosols anthropiques, en particulier les cendres volantes, les métaux et les particules de suie, sont incorporées aux gouttelettes de nuages, puis transportées sur de longues distances et affectent les écosystèmes mondiaux, la santé humaine et l'équilibre thermique de l'atmosphère [14]. La convection profonde et la remontée des cirrus offrent un mécanisme de transport de la troposphère vers la stratosphère [15, 16]. La composition chimique, la taille et la morphologie des particules réfractaires recueillies à l'intérieur de la stratosphère polaire, sont conformes à celles trouvées dans les cendres volantes de charbon. Ces particules comprennent celles qui contiennent du carbone, des silicates, du fer et des mélanges métalliques complexes [17]. Des preuves suggèrent que les nuages stratosphériques capturent et concentrent les particules de cendres volantes de charbon [11]. Au printemps, lorsque les nuages stratosphériques commencent à fondre ou à s'évaporer, ces particules sont libérées, et réagissent avec l'ozone stratosphérique et le détruisent [11].

Les cendres volantes de charbon se forment dans un environnement chimique anhydre et non naturel dans les gaz chauds au-dessus du brûleur de combustion, ce qui rend leur comportement chimique bien différent de celui de particules de taille similaire provenant de la croûte terrestre.
Au moins 39 éléments dans les cendres volantes de charbon peuvent être lessivés ou partiellement extraits par l'eau [18]. Les éléments primaires des cendres volantes de charbon comprennent les oxydes de silicium, d'aluminium, de fer et de calcium, avec des quantités moindres de magnésium, de soufre, de sodium, de chlore et de potassium. Le carbone est souvent présent sous sa forme élémentaire, sous forme de charbon, de suie, de boules nanométriques et de nanotubes [19, 20].
Les nombreux éléments traces présents dans les cendres volantes de charbon comprennent l'arsenic, le baryum, le chrome, le cuivre, le plomb, le manganèse, le mercure, le nickel, le sélénium, le strontium, le thallium, le vanadium et le zinc [21].

Les cendres volantes de charbon peuvent elles-mêmes détruire l'ozone [22-27]. L'ozone stratosphérique peut être détruit par des halogènes réactifs et par le chlore, le brome, le fluor et l'iode, tous présents dans les cendres volantes de charbon [28]. Ironiquement, la combustion du charbon produit même des chlorofluorocarbones que l'on retrouve dans les cendres volantes de charbon [29]. Des données expérimentales montrent que des composants séparés des cendres volantes de charbon peuvent absorber ou détruire l'ozone. Par exemple, il y a une absorption réactive de l'ozone sur les oxydes minéraux incluant ceux d'aluminium, de silicium et de fer, qui sont tous des composants majeurs des cendres volantes de charbon [30]. Les surfaces du carbone des cendres volantes de charbon sont oxydées par l'ozone [24], et l'ozone réagit avec les nanoparticules de carbone [25-27]. On a trouvé que les particules en aérosols de carbone et de fer inférieures au micron détruisent efficacement l'ozone, ce qui implique que ces particules dans la stratosphère peuvent représenter une cause significative de l'appauvrissement de l'ozone [31].

FER EN AÉROSOL DE CENDRES VOLANTES DE CHARBON

Les cendres volantes de charbon sont une source majeure de fer atmosphérique, avec des implications importantes pour le climat et pour les cycles biogéochimiques mondiaux. Le fer est un élément primaire dans les cendres volantes de charbon et est est contenu à la fois dans la phase vitreuse d'aluminosilicate et dans les phases minérales d'oxyde, notamment la magnétite (Fe3O4) et l'hématite (Fe2O3) [32]. La spéciation du fer par spectroscopie Mossbauer indique que le fer ferrique dans la phase vitreuse de l'aluminosilicate est la source de fer bio-disponible dans les cendres volantes de charbon. Cette espèce de fer est associée aux particules de combustion et non pas à la poussière de la croûte terrestre issue des minéraux du sol [33]. Les acides formés à partir de polluants gazeux anthropiques comme le dioxyde de soufre et les oxydes d'azote dissolvent le fer dans les particules en aérosols, augmentant ainsi considérablement la quantité de fer bio-disponible dans l'océan [34] et, probablement de la même manière,rendant le fer plus disponible pour une réaction avec l'ozone stratosphérique.

Le traitement atmosphérique des aérosols de cendres volantes de charbon augmente la solubilité du fer en raison de modifications de la morphologie de l'aluminosilicate vitreux. Par conséquent, le fer est continuellement libéré dans la solution aqueuse au fur et à mesure que les particules de cendres volantes de charbon se brisent en fragments plus petits [35]. Des études récentes suggèrent que la charge atmosphérique de fer provenant de la combustion anthropique (combustibles fossiles) est beaucoup plus importante que ce qui avait été calculé précédemment et qu'elle dépasse celle de la poussière et des sources de combustion de la biomasse. Le fer joue un rôle clé dans les aérosols atmosphériques, y compris dans la rétention de la chaleur en surface [36], la biogéochimie des océans [37], la biogéochimie des océans [37], le cycle global du carbone et les effets de la neige/glace et de l'albédo [38]. Le fer réactif contenu dans les aérosols de cendres volantes de charbon dans la haute atmosphère a la capacité d'appauvrir l'ozone stratosphérique par plusieurs mécanismes différents qui sont abordés ici.

Auparavant, l'origine des ions métalliques dans la haute et la basse ionosphère était attribuée à l'évaporation de petits micro-météores traversant l'orbite de la Terre, et non aux cendres volantes de charbon [39]. Les nuages mésosphériques polaires, également appelés nuages noctilucides, sont de fines couches de particules de glace qui se produisent entre 82 et 87 km d'altitude dans la mésosphère estivale des hautes latitudes. Des mesures Lidar, utilisant les longueurs d'onde spectrales du fer de 372 et 374 nm, montrent que ces nuages chevauchent en altitude une couche de fer, qu'ils absorbent [40]. Ces résultats confirment notre suggestion selon laquelle les particules de cendres volantes de charbon (pas seulement le fer métallique), projetées dans la stratosphère, servent non seulement d'agents de formation de glace, mais sont également piégées par les nuages, y compris les nuages stratosphériques polaires. Au printemps, les nuages stratosphériques glacés fondent ou s'évaporent, libérant les particules de cendres volantes de charbon qu'ils ont piégées et rendant ces particules de cendres volantes de charbon consommatrices d'ozone facilement disponibles pour une réaction de destruction de l'ozone stratosphérique ambiant [11].

On pense que les matériaux réfractaires insolubles, sous la forme d'aérosols primaires et secondaires, jouent un rôle catalytique crucial dans l'activation des cristaux de glace des cirrus dans la troposphère et dans les nuages stratosphériques polaires, ces derniers étant associés à la destruction de l'ozone [41]. Analogues aux particules "météoriques" réfractaires, contenant du fer, du silicium et du magnésium, elles se sont avérées capables de nucléer la glace et les hydrates d'acide nitrique dans les nuages stratosphériques polaires [41, 42]. Les métaux météoriques, qui sont en quelque sorte une métaphore des particules de cendres volantes de charbon, sont reconnus comme des composants importants des aérosols dans les zones mésosphériques, troposphériques et

de la basse stratosphère. Ces aérosols proviennent généralement de sources anthropiques, terrestres et marines [43]. Le transport de l'air de la troposphère vers la stratosphère se produit principalement sous les tropiques, et il est associé à la branche ascendante de la circulation de Brewer-Dobson. La convection atmosphérique profonde [44], y compris la circulation de la mousson, constitue une voie efficace pour que la pollution par les cendres volantes de charbon du continent asiatique pénètre dans la stratosphère mondiale [45].

L'oxyde de fer contenu dans les aérosols peut chimisorber le dioxyde de soufre, le transformant en sulfate à l'interface gaz-solide. Le revêtement de surface des particules d'aérosol insolubles par des matériaux solubles améliore leur capacité de nucléation des nuages [46]. Une augmentation des espèces secondaires par la transformation en nuages augmente la biodisponibilité du fer dans les aérosols et, par voie de conséquence, augmente la destructibilité de l'ozone stratosphérique.

Dans une étude des composés secondaires dans les résidus de nuages (gouttelettes de nuages séchées) au sommet d'une montagne en Chine, les particules riches en fer provenant de sources de combustion, par opposition aux particules de poussière, ont contribué à la majorité de résidus de nuages contenant du fer. Plus de 90 % des particules contenaient déjà des sulfates avant l'apparition des nuages. La transformation en nuages a entraîné une augmentation de la fraction de nitrate, de chlorure et d'oxalate dans les résidus de nuages contenant du fer [47]. Le fer est mobilisé dans des environnements atmosphériques acides, à la fois avant et pendant le dépôt d'aérosols. Les cendres volantes de charbon interagissent avec la couche déliquescente très acide formée autour de leurs particules par l'absorption d'eau et de gaz atmosphériques acides (pH<4). Le processus atmosphérique dissout le fer dans les aérosols par des mécanismes impliquant les protons et des processus de chélation. Dans l'acide chlorhydrique à faible pH, des fractions importantes de fer en phase aqueuse (Fe2+) sont libérées des cendres volantes de charbon. Dans les suspensions d'acide nitrique, une réaction redox de surface supprime la mobilité de Fe2+, ce qui conduit à la formation de nitrites. En présence d'un rayonnement solaire, les processus atmosphériques favorisent la formation de Fe2+ et d'acide nitreux à partir des particules de combustion [48]. Les cendres volantes de charbon non traitées présentent une forte activité de nucléation hétérogène de la glace à des températures inférieures à 235° K dans les dépôts et/ou la condensation et la congélation des pores. Contrairement aux aérosols organiques atmosphériques, les cendres volantes de charbon montrent une diminution de l'activité de nucléation de glace après transformation dans des nuages mixtes et de type cirrus [49].

Le radical hydroxyle (OH) est l'oxydant le plus important dans la troposphère, oxydant les hydrocarbures naturels et anthropiques et produisant de l'ozone de type polluant. Cependant, dans la stratosphère et la mésosphère, OH est un catalyseur clé pour la destruction de l'ozone [50]. Les aérosols organiques secondaires générés en laboratoire et dans l'air ambiant forment des quantités significatives d'OH dans l'eau des nuages qui peut s'expliquer par la décomposition d'hydropéroxydes organiques. La réactivité chimique et le vieillissement des particules d'aérosol organique secondaire (y compris celles des cendres volantes de charbon) sont grandement favorisées par le fer, qui produit de l'OH par la réaction de Fenton entre le fer ferreux (Fe2+) et le péroxyde d'hydrogène (H_2O_2) [51], vraisemblablement produit par l'ozone, O_3 [52]. Le fer atmosphérique, comme les variétés dominantes de métaux de transition dans l'atmosphère, est associé à la génération de radicaux OH dans les extraits de particules ambiantes, notamment celles provenant de sources anthropiques [53]. Les aérosols de cendres volantes de charbon sont une source importante de radical OH en présence d'un donneur d'électron ajouté (ozone) ou de H_2O_2

[54]. Dans les gouttelettes de nuages, la réaction "photoFenton" se produit par la photoréduction rapide de Fe3+ en Fe2+, qui à son tour favorise la réaction classique de Fenton, c'est-à-dire que Fe (II) + H_2O_2 (vraisemblablement produit par l'ozone) donne Fe (III), OH et OH- [55]. Il a été découvert récemment que pendant les premières minutes après la formation des gouttelettes de nuage, la matière des aérosols produit une " explosion " d'hydroxydes, dépendante de lumière et proche des UV, de taille allant jusqu'à cinq fois plus grande que ce qui était connu auparavant.. La source de cette explosion est une chimie jusqu'alors inconnue entre le fer ferreux et les peracides [56].

Les atomes de chlore consomment des composés organiques volatils et influencent les cycles de l'ozone (O_3) et des oxydes d'azote. En plus des réactions hétérogènes, les réactions photochimiques impliquant les HNO_3 et H_2O_2 aqueux sur et dans la surface des nuages stratosphériques polaires pourraient constituer une autre voie importante d'activation des halogènes par les cendres volantes de charbon pour la destruction de l'ozone[57]. La libération de particules de fer réactives avec l'activation associée des halogènes à partir des nuages de glace polaire en dégel au printemps peut expliquer un autre mécanisme par lequel les constituants détruisent l'ozone, produisant des trous dans la couche d'ozone pendant cette période.

On a supposé que la détection récente d'iode dans la stratosphère provenait d'émissions océaniques. [58]. Nous contestons que la source présumée soit uniquement constituée d'émissions océaniques. Les cendres volantes de charbon en aérosol provenant de sources industrielles polluantes et pulvérisées par avion dans la haute troposphère, qui sont ensuite envoyées dans la stratosphère.
contaminent l'atmosphère avec de l'iode, d'autres halogènes, et d'autres éléments, dont le mercure [59-61]. Les restrictions imposées à la production et à l'élimination du mercure n'ont pas diminué sa présence dans l'atmosphère [59]. Il n'est pas surprenant que, comme beaucoup d'autres composants des cendres volantes de charbon, le mercure réagisse avec l'ozone et le consomme [62-64].

Les aérosols de cendres volantes de charbon, en particulier ceux qui se trouvent dans l'atmosphère à haute altitude, expliquent non seulement la composition chimique d'une grande partie des particules stratosphériques, mais fournissent également de nombreuses voies de réaction vérifiées expérimentalement pour détruire l'ozone stratosphérique, y compris, mais sans s'y limiter
les réactions complexes des halogènes qui contribuent à l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique. Dans de nombreuses situations, le fer métallique et les composés du fer non seulement détruisent directement l'ozone mais facilitent d'autres réactions destructrices de l'ozone, ce qui étaye notre affirmation fondée sur des preuves que les cendres volantes de charbon en aérosol sont les principales responsables de la destruction de l'ozone stratosphérique [11].

CONCLUSIONS

L'ozone stratosphérique est l'écran solaire naturel de la Terre, bloquant la plupart des rayons ultraviolets les plus nocifs du soleil et l'atmosphère et protégeant toutes les formes de vie supérieures sur Terre. Le protocole de Montréal, élaboré par l'Organisation météorologique mondiale et le Programme des Nations unies pour l'environnement, est entré en vigueur en 1989.Cet accord international était basé sur ce que l'on pourrait appeler une "science consensuelle", qui rendait les chlorofluorocarbones (CFC) responsables de l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique. Depuis lors, le protocole de Montréal a été salué comme un grand succès, car il

aurait non seulement permis d'empêcher de nouveaux dommages à la couche d'ozone, mais aussi d' améliorer le changement climatique. Cependant, la réalité est que le monde que le protocole de Montréal était censé éviter est déjà là,l'appauvrissement de la couche d'ozone ne cesse de s'aggraver et les rayons ultraviolets B et C mortels pénètrent déjà à la surface de la Terre. Il suffit d'aller dehors, de sentir le soleil brûler sa peau et de voir les signes de la destruction par les UV sur tous les arbres. Nous avons fourni des preuves supplémentaires que les cendres volantes de charbon, et non pas les CFC, sont la cause la plus importante de l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique.Les cendres volantes de charbon elles-mêmes et les multiples éléments et composés contenus dans les cendres volantes de charbon peuvent absorber ou détruire l'ozone. Ici, nous nous sommes concentrés sur le fer, un élément abondant dans les cendres volantes de charbon qui peut à la fois détruire l'ozone et interagir avec de nombreux autres éléments, dont tous les halogènes, pour appauvrir l'ozone dans la stratosphère. L'incapacité (ou le manque de volonté) de la communauté scientifique à sortir du cadre de l'hypothèse de l'appauvrissement de l'ozone par les CFC et de s'attaquer à la véritable cause de l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique sera une erreur fatale pour l'humanité. Toutes les sources de cendres volantes de charbon en aérosol doivent être réduites ou éliminées, surtout la matière pulvérisée par avion dans la haute atmosphère, de façon délibérée, secrète, quasi-mondiale, et contenant des cendres volantes de charbon. Jusqu'à ce que la population se "réveille" aux dommages inimaginables causés à notre planète par ce type de manipulation technologique, l'actuelle "Sixième Grande Extinction" anthropique continuera à se dérouler à une vitesse aveuglante.

Références

1. Ball, W.T., et al., *Evidence for a continuous decline in lower stratospheric ozone offsetting ozone layer recovery.* Atmospheric Chemistry and Physics, 2018. 18(2): p. 1379-1394.

2. Hossaini, R., et al. *Ozone Destruction in the Upper Troposphere/Lower Stratosphere from Short-Lived Halogens and Climate Impacts*. in *EGU General Assembly Conference Abstracts*. 2014.

3. Yook, S., D.W.J. Thompson, and S. Solomon, *Climate Impacts and Potential Drivers of the Unprecedented Antarctic Ozone Holes of 2020 and 2021.* Geophysical Research Letters, 2022. 49(10): p. e2022GL098064.

4. Zhang, J., et al., *Stratospheric ozone loss over the Eurasian continent induced by the polar vortex shift.* Nat Commun, 2018. 9(1): p. 206.

5. Herndon, J.M., R.D. Hoisington, and M. Whiteside, *Deadly ultraviolet UV-C and UV-B penetration to Earth's surface: Human and environmental health implications.* J. Geog. Environ. Earth Sci. Intn., 2018. 14(2): p. 1-11.

6. Witze, A., *Rare ozone hole opens over Arctic--and it's big.* Nature, 2020. 580(7801): p. 18-20.

7. Lu, Q.-B., *Observation of large and all-season ozone losses over the tropics.* AIP Advances, 2022. 12(7): p. 075006.

8. Bernhard, G.H., et al., *Updated analysis of data from Palmer Station, Antarctica (64° S), and San Diego, California (32° N), confirms large effect of the Antarctic ozone hole on UV radiation.* Photochemical & Photobiological Sciences, 2022. 21(3): p. 373-384. http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

9. Cordero, R.R., et al., *Persistent extreme ultraviolet irradiance in Antarctica despite the ozone recovery onset.* Scientific reports, 2022. 12(1): p. 1-10.

10. Takahashi, T., et al., *Measurement of solar UV radiation in antarctica with collagen sheets.* Photochemical & Photobiological Sciences, 2012. 11(7): p. 1193-1200.

11. Herndon, J.M. and M. Whiteside, *Aerosolized coal fly ash particles, the main cause of stratospheric ozone depletion, not chlorofluorocarbon gases.* European Journal of Applied Sciences, 2022. 10(3): p. 586-603.

12. Herndon, J.M. and M. Whiteside, *Chemtrails are not Contrails: The Face of Evil*2022: Amazon Kindle Direct Publishing https://www.amazon.com/dp/B09X49TGWB?ref_=pe_3052080_397514860.

13. Cziczo, D.J., et al., *Clarifying the dominant sources and mechanisms of cirrus cloud formation.* Science, 2013. 340(6138): p. 1320-1324.

14. Liu, L., et al., *Cloud scavenging of anthropogenic refractory particles at a mountain site in North China.* Atmospheric Chemistry and Physics, 2018. 18(19): p. 14681-14693.

15. de Reus, M., et al., *Particle production in the lowermost stratosphere by convective lifting of the tropopause.* Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1999. 104(D19): p. 23935-23940.

16. Corti, T., et al., *The impact of cirrus clouds on tropical troposphere-to-stratosphere transport.* Atmospheric Chemistry and Physics, 2006. 6(9): p. 2539-2547.

17. Ebert, M., et al., *Chemical analysis of refractory stratospheric aerosol particles collected within the arctic vortex and inside polar stratospheric clouds.* Atmospheric Chemistry and Physics, 2016. 16(13): p. 8405-8421.

18. Moreno, N., et al., *Physico-chemical characteristics of European pulverized coal combustion fly ashes.* Fuel, 2005. 84: p. 1351-1363.

19. Das, T., B.K. Saikia, and B.P. Baruah, *Formation of carbon nano-balls and carbon nano-tubes from northeast Indian Tertiary coal: value added products from low grade coal.* Gondwana Research, 2016. 31: p. 295-304.

20. Alam, J., et al., *Recent advances in methods for the recovery of carbon nanominerals and polyaromatic hydrocarbons from coal fly ash and their emerging applications.* Crystals,

2021. 11(2): p. 88.

21. Fisher, G.L., *Biomedically relevant chemical and physical properties of coal combustion products.* Environ. Health Persp., 1983. 47: p. 189-199.

22. Chen, X., et al. *FLY ASH BENEFICATION WITH OZONE: MECHANISM OF ADSORPTION SUPRESSION*. in *ABSTRACTS OF PAPERS OF THE AMERICAN CHEMICAL SOCIETY.* 2002. AMER CHEMICAL SOC 1155 16TH ST, NW, WASHINGTON, DC 20036 USA.

23. Alebic-Juretic, A., T. Cvitas, and L. Klasinc, *Ozone destruction on solid particles.* Environmental monitoring and assessment, 1997. 44(1): p. 241-247.

24. Pedersen, K.H., et al., *Post-treatment of fly ash by ozone in a fixed bed reactor.* Energy & fuels, 2009. 23(1): p. 280-285.

25. Cataldo, F., *Ozone reaction with carbon nanostructures 1: reaction between solid C60 and C70 fullerenes and ozone.* Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2007. 7(4-5): p. 1439-1445.

26. Cataldo, F., *Ozone reaction with carbon nanostructures 2: The reaction of ozone with milled graphite and different carbon black grades.* Journal of nanoscience and nanotechnology, 2007. 7(4-5): p. 1446-1454.

27. Razumovskii, S., et al., *Carbon nanostructure reactivity: reactions of graphite powders with ozone.* Fullerenes, Nanotubes, and Carbon Nonstructures, 2007. 15(1): p. 53-63.

28. NRC, *Trace-element Geochemistry of Coal Resource Development Related to Environmental Quality and Health*1980: National Academy Press.

29. Jiaxi, L., et al., *The production and release of CFCs from coal combustion.* Acta Geologica Sinica-English Edition, 2003. 77(1): p. 81-85.

30. Michel, A., C. Usher, and V. Grassian, *Heterogeneous and catalytic uptake of ozone on mineral oxides and dusts: A Knudsen cell investigation.* Geophysical research letters, 2002. 29(14): p. 10-1-10-4.

31. Fenidel, W., et al., *Interaction between carbon or iron aerosol particles and ozone.* Atmospheric Environment, 1995. 29(9): p. 967-973.

32. Tishmack, J.K. and P.E. Burns, *The chemistry and mineralogy of coal and coal combustion products.* Geological Society, London, Special Publications, 2004. 236(1): p. 223-246.

33. Veranth, J.M., et al., *Mössbauer spectroscopy indicates that iron in an aluminosilicate glass phase is the source of the bioavailable iron from coal fly ash.* Chemical Research in Toxicology, 2000. 13(3): p. 161-164.

34. Li, W., et al., *Air pollution–aerosol interactions produce more bioavailable iron for ocean ecosystems.* Science Advances, 2017. 3(3): p. e1601749.

35. Chen, H., et al., *Coal fly ash as a source of iron in atmospheric dust.* Environmental Science & Technology, 2012. 46(4): p. 2112-2120.

36. Herndon, J.M. and M. Whiteside, *Geophysical consequences of tropospheric particulate heating: Further evidence that anthropogenic global warming is principally caused by particulate pollution.* Journal of Geography, Environment and Earth Science International, 2019. 22(4): p. 1-23.

37. Whiteside, M. and J.M. Herndon, *Role of aerosolized coal fly ash in the global plankton imbalance: Case of Florida's toxic algae crisi.* Asian Journal of Biology, 2019. 8(2): p. 1-24.

38. Matsui, H., et al., *Anthropogenic combustion iron as a complex climate forcer.* Nature communications, 2018. 9(1): p. 1593.

39. Kopp, E., *On the abundance of metal ions in the lower ionosphere.* Journal of Geophysical Research: Space Physics, 1997. 102(A5): p. 9667-9674.

40. Plane, J.M., et al., *Removal of meteoric iron on polar mesospheric clouds.* Science, 2004. 304(5669): p. 426-428.

41. Saunders, R., et al., *An aerosol chamber investigation of the heterogeneous ice nucleating potential of refractory nanoparticles.* Atmospheric Chemistry and Physics, 2010. 10(3): p. 1227-1247.

42. James, A.D., et al., *Nucleation of nitric acid hydrates in polar stratospheric clouds by meteoric material.* Atmospheric Chemistry and Physics, 2018. 18(7): p. 4519-4531.

43. Adachi, K., et al., *Meteoritic materials within sulfate aerosol particles in the troposphere are detected with transmission electron microscopy.* Communications Earth & Environment, 2022. 3(1): p. 1-9.

44. Nielsen, J.K., et al., *Solid particles in the tropical lowest stratosphere.* Atmospheric Chemistry and Physics, 2007. 7(3): p. 685-695.

45. Randel, W.J., et al., *Asian monsoon transport of pollution to the stratosphere.* Science, 2010. 328(5978): p. 611-613.

46. Kopcewicz, B. and M. Kopcewicz, *Iron-containing atmospheric aerosols.* Hyperfine interactions, 1998. 111(1): p. 179-187.

47. Lin, Q., et al., *In-cloud formation of secondary species in iron-containing particles.*

Atmospheric Chemistry and Physics, 2019. 19(2): p. 1195-1206.

48. Kim, D., et al., *Atmospheric processing of anthropogenic combustion particles: Effects of acid media and solar flux on the iron mobility from fly ash.* ACS Earth and Space Chemistry, 2020. 4(5): p. 750-761.

49. Kilchhofer, K., F. Mahrt, and Z.A. Kanji, *The role of cloud processing for the ice nucleating ability of organic aerosol and coal fly ash particles.* Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2021. 126(10): p. e2020JD033338.

50. Avallone, L.M., *Observations for chemistry (in situ) – Resonance Fluorescence.* Encyclopedia of Atmospheric Sciences, 2003.

51. Tong, H., et al., *Hydroxyl radicals from secondary organic aerosol decomposition in water.* Atmospheric Chemistry and Physics, 2016. 16(3): p. 1761-1771.

52. Heikes, B.G., *Aqueous H2O2 production from O3 in glass impingers.* Atmospheric Environment (1967), 1984. 18(7): p. 1433-1445.

53. Ma, S., et al., *Production of hydroxyl radicals from Fe-containing fine particles in Guangzhou, China.* Atmospheric Environment, 2015. 123: p. 72-78.

54. Alaghmand, M. and N.V. Blough, *Source-dependent variation in hydroxyl radical production by airborne particulate matter.* Environmental science & technology, 2007. 41(7): p. 2364-2370.

55. Zepp, R.G., B.C. Faust, and J. Hoigne, *Hydroxyl radical formation in aqueous reactions (pH 3-8) of iron (II) with hydrogen peroxide: the photo-Fenton reaction.* Environmental science & technology, 1992. 26(2): p. 313-319.

56. Paulson, S.E., et al., *A light-driven burst of hydroxyl radicals dominates oxidation chemistry in newly activated cloud droplets.* Science advances, 2019. 5(5): p. eaav7689.

57. Jiao, X., et al., *Photo-generated hydroxyl radicals contribute to the formation of halogen radicals leading to ozone depletion on and within polar stratospheric clouds surface.* Chemosphere, 2022. 291: p. 132816.

58. Koenig, T.K., et al., *Quantitative detection of iodine in the stratosphere.* Proceedings of the National Academy of Sciences, 2020. 117(4): p. 1860-1866.

59. Herndon, J.M. and M. Whiteside, *Contamination of the biosphere with mercury: Another potential consequence of on-going climate manipulation using aerosolized coal fly ash* J. Geog. Environ. Earth Sci. Intn., 2017. 13(1): p. 1-11.

60. Wei, Z., et al., *Mobility and contamination assessment of mercury in coal fly ash,*

atmospheric deposition, and soil collected from Tianjin, China. Environmental Toxicology and Chemistry, 2011. 30(9): p. 1997-2003.

61. Sanei, H., S.E. Grasby, and B. Beauchamp, *Latest Permian mercury anomalies.* Geology, 2012. 40(1): p. 63-66.

62. Hall, B., *The gas phase oxidation of elemental mercury by ozone*, in *Mercury as a Global Pollutant*1995, Springer. p. 301-315.

63. Wen, Z., et al., *Mechanism and kinetic study on elemental mercury oxidation in flue gas by ozone injection.* Ozone: Science & Engineering, 2018. 40(1): p. 29-36.

64. Saiz-Lopez, A., et al., *Boundary layer halogens in coastal Antarctica.* Science, 2007. 317(5836): p. 348-351.