

Le Protocole de Montréal un exemple à suivre?

Sophie Godin-Beekmann

LATMOS, Institut Pierre-Simon Laplace

CNRS, Sorbonne Université, UVSQ

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

- Accord international historique signé en 1987 à Montréal
- Objectif: Elimination progressive de la production et la consommation des substances appauvrissant la couche d'ozone (SAO)
- Protocole signé initialement par 24 pays et entré en vigueur en 1989
- Aujourd'hui: protocole ratifié internationalement
- Considéré comme le protocole international sur l'environnement le plus fructueux

Limites planétaires

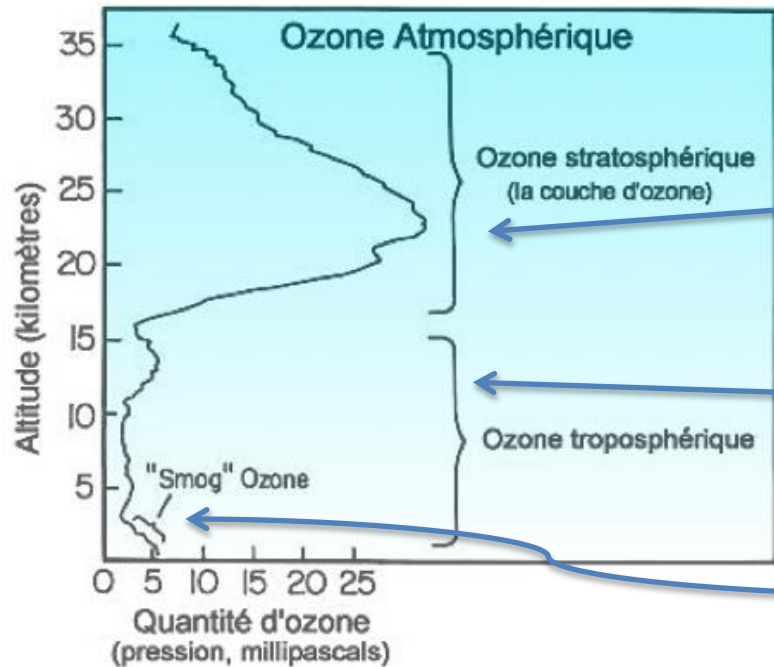


Qu'est ce que la couche d'ozone?

- Ozone: composé atmosphérique formé de 3 atomes d'oxygène
- Gaz très minoritaire : 8 à 10 molécules d'ozone maximum sur 1 million de molécules d'air



La couche d'ozone



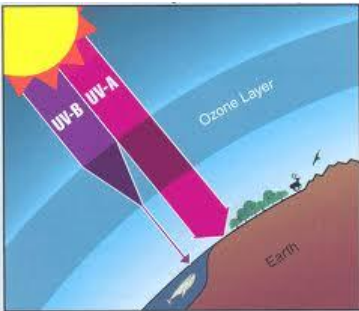
90 % dans la stratosphère
Rôle protecteur

10 % dans la troposphère
Contribue à l'effet de serre

Augmentations épisodiques lors
d'épisodes de pollution

L'ozone : gaz essentiel à la vie sur Terre

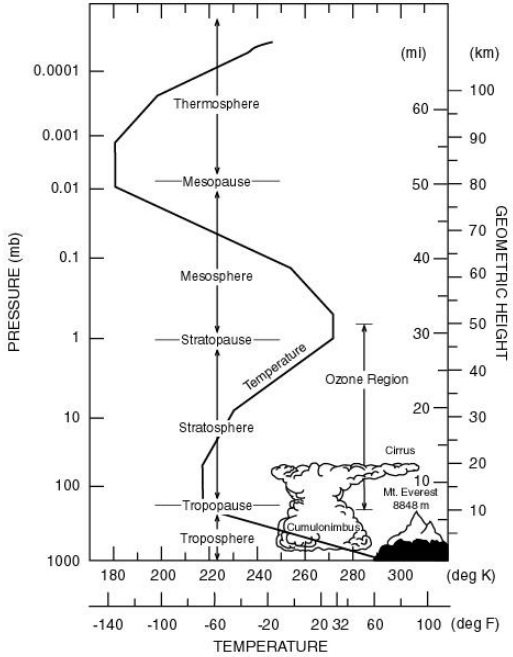
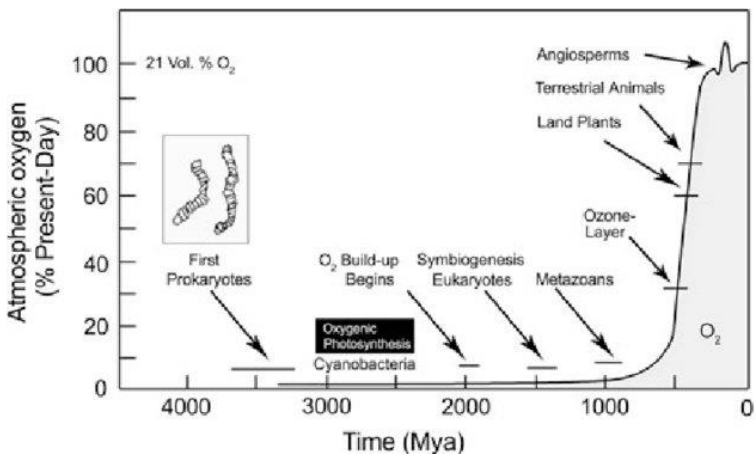
Principal élément atmosphérique filtrant le rayonnement UV-B solaire (280 – 315 nm)



Dangers du rayonnement UV : lésions de l'ADN, cancers de la peau, cataractes oculaires, altération des écosystèmes

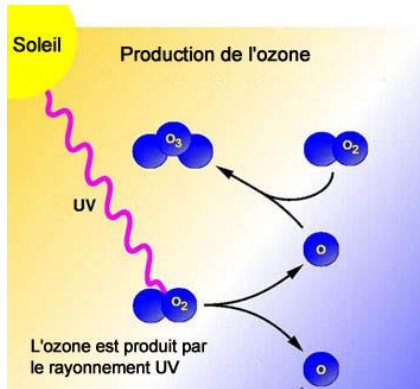
La formation d'ozone dans l'atmosphère a permis à la vie d'émerger des océans et de se déployer sur les continents

Apparition du dioxygène (O₂) il y a ~ 2 milliards d'années
Couche d'ozone : ~ 600 millions d'années



Stratosphère due à la présence de la couche d'ozone

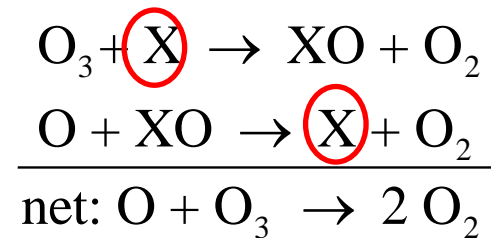
Fragile équilibre de l'ozone dans l'atmosphère



Dans la haute atmosphère, **l'ozone est produit par le rayonnement UV** du soleil. Cette production est compensée par des réactions avec des composés très minoritaires

Cycles catalytiques impliquant des composés très réactifs issus de gaz sources généralement émis à la surface et transportés dans la stratosphère

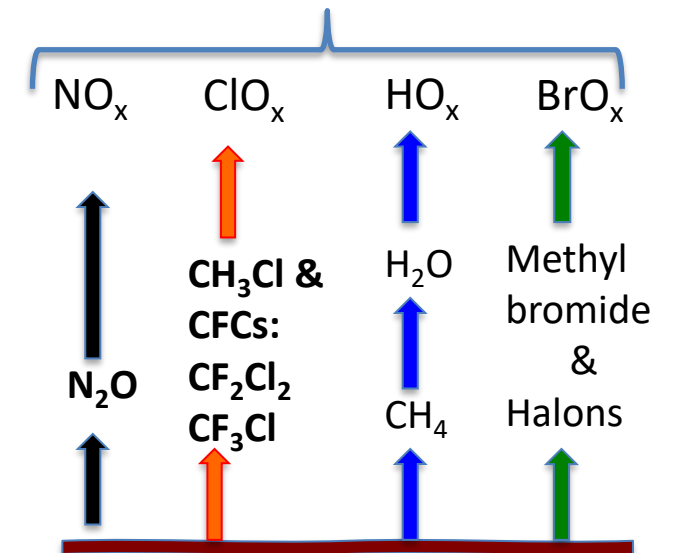
Chaines catalytiques: ~1000
-> Ozone contrôlé par éléments 1000 moins abondants (ppbv=10⁻⁹)!



Gaz sources

N₂O, CH₄, H₂O, CH₃Cl, CH₃Br, CFCs, Halons

La formation d'espèces réservoirs limite l'efficacité des cycles catalytiques



Les premières alertes sur la couche d'ozone

Années 1970: controverse sur l'impact d'une flotte d'avions supersoniques stratosphériques sur l'ozone



Abandon du projet

Sauf le Concorde jusqu'en 1999



1974: article de Molina et Rowland

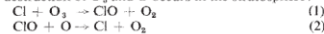
Stratospheric sink for chlorofluoromethanes : chlorine atomic-catalysed destruction of ozone

Mario J. Molina & F. S. Rowland

Department of Chemistry, University of California, Irvine, California 92664

Chlorofluoromethanes are being added to the environment in steadily increasing amounts. These compounds are chemically inert and may remain in the atmosphere for 40–150 years, and concentrations can be expected to reach 10 to 30 times present levels. Photodissociation of the chlorofluoromethanes in the stratosphere produces significant amounts of chlorine atoms, and leads to the destruction of atmospheric ozone.

photolytic dissociation to $\text{CFCl}_2 + \text{Cl}$ and to $\text{CF}_2\text{Cl} + \text{Cl}$, respectively, at altitudes of 20–40 km. Each of the reactions creates two odd-electron species—one Cl atom and one free radical. The dissociated chlorofluoromethanes can be traced to their ultimate sinks. An extensive catalytic chain reaction leading to the net destruction of O_3 and O occurs in the stratosphere:

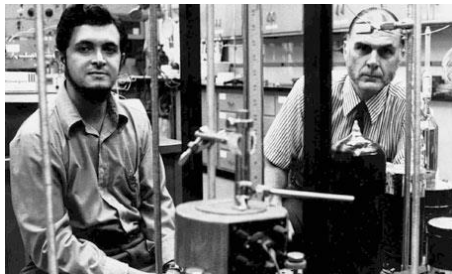


This has important chemical consequences. Under most conditions in the Earth's atmospheric ozone layer, (2) is the slower of the reactions because there is a much lower concentration of O than of O_3 . The odd chlorine chain (Cl, ClO) can



Destruction catalytique de l'ozone par les chlorofluorocarbures (CFC)

1979: Interdiction des spray aérosols par Etats-Unis, Suède, Canada



Substances appauvrissant l'ozone (SAO)

Les chlorofluorocarbures (CFC)

- brevetés en 1928 par DuPont (USA) - Principaux CFC: CFC-11 (CCl_3F), CFC-12 (CCl_2F_2)
- Faible toxicité, stabilité élevée, bon transfert de chaleur
- Applications : réfrigération, climatisation, mousses isolantes, ...
wonder chemicals!
- Très longue durée de vie -> transportés dans la stratosphère par dynamique atmosphérique



Les halons

- Gaz organiques contenant du brome
- Principaux halons: Halon-1211 et halon-1301
- Applications : extincteurs de feu

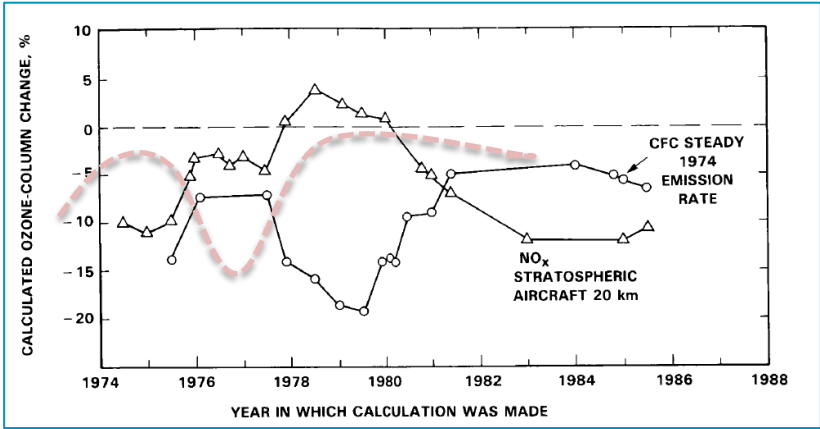
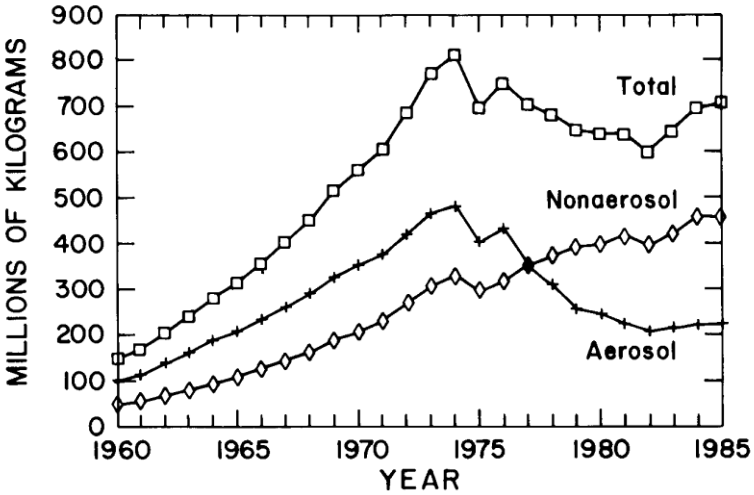


Sources naturelles de chlore et de brome dans la stratosphère:

CH_3Cl (chlorure de méthyle) et CH_3Br (bromure de méthyle): émis par les écosystèmes océaniques et terrestres

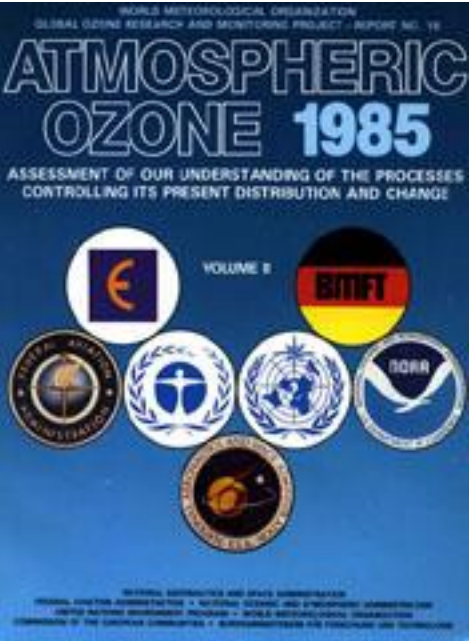
Début des années 1980

Amélioration de la connaissance de l'impact des CFC sur l'ozone



Les émissions de CFC reprennent...

Mais signature de la **Convention de Vienne** pour la protection de la couche d'ozone en 1985

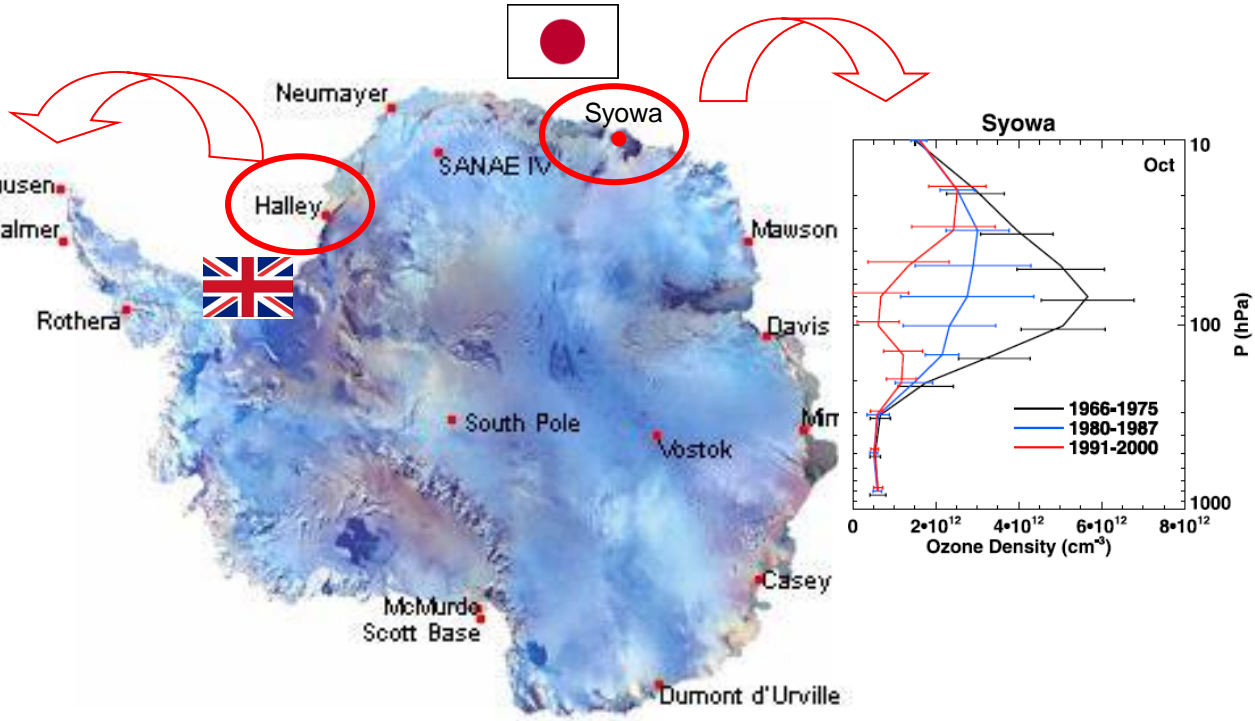
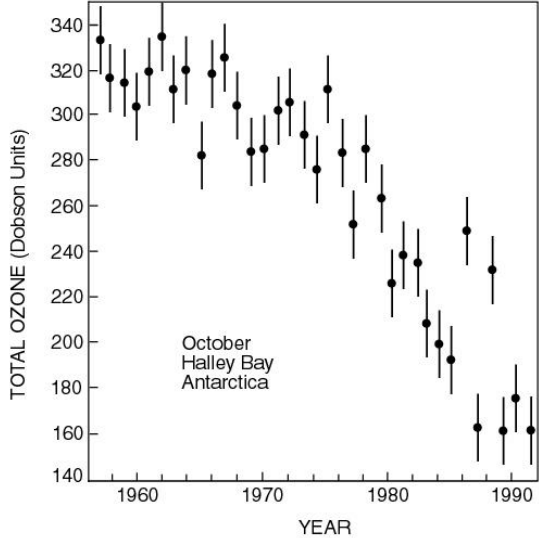


1985 : Un trou dans la couche d'ozone?



10

Découverte du trou d'ozone en Antarctique



Mesures d'ozone à Halley Bay

Farman et al., Nature, 1985

Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction

J. C. Farman, B. G. Gardiner & J. D. Shanklin

British Antarctic Survey, Natural Environment Research Council,
High Cross, Madingley Road, Cambridge CB3 0ET, UK

A Syowa, les mesures par sondes sous ballon montrent de très faibles valeurs entre 16 et 18 km

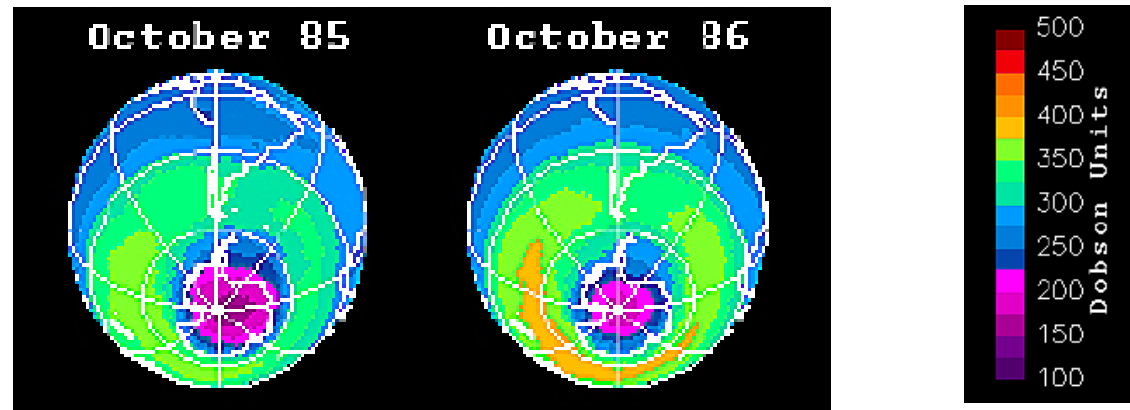
Détection du phénomène par satellite?



Mesures satellite de l'ozone depuis 1979

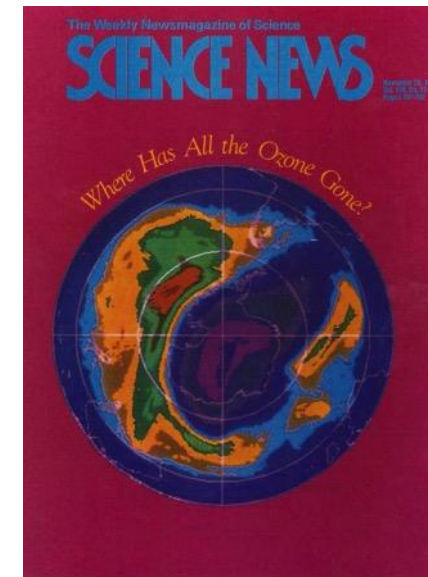
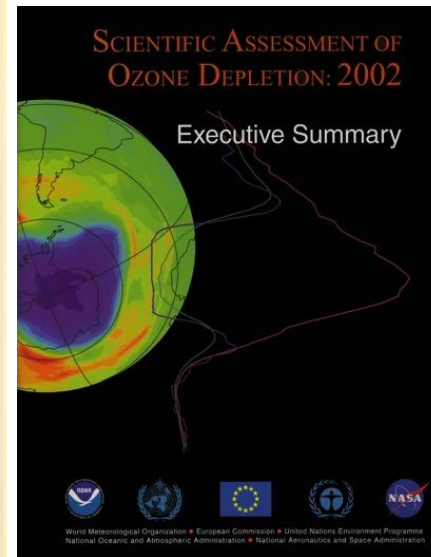
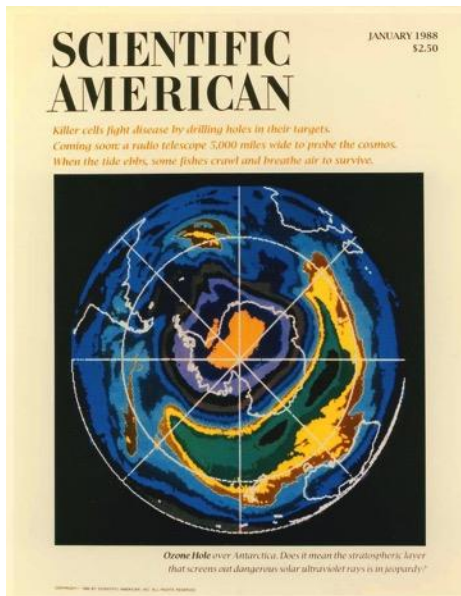
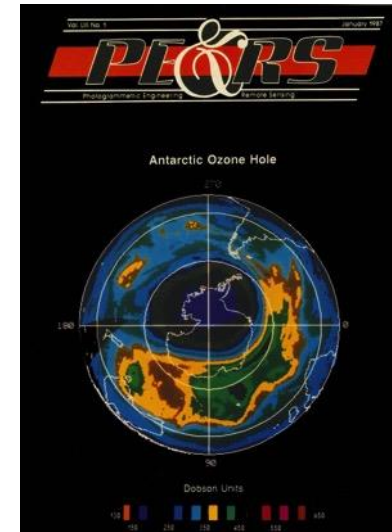
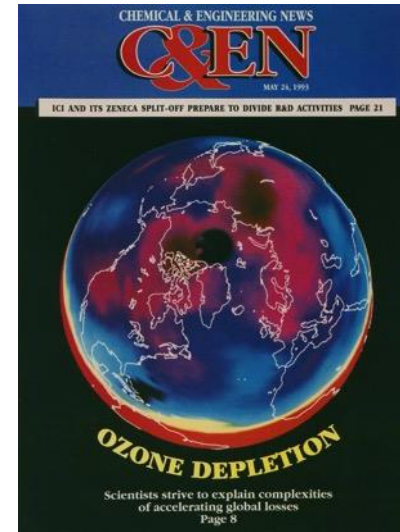
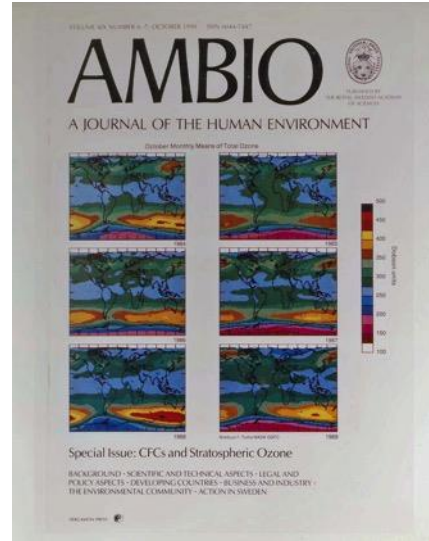
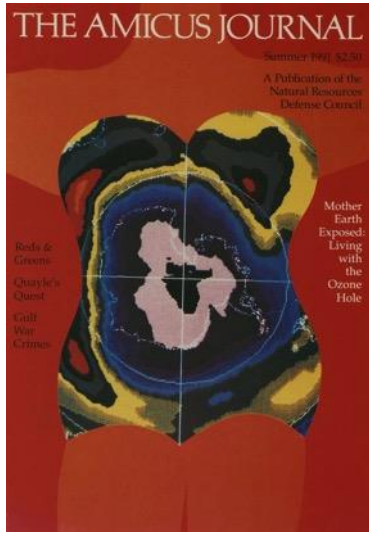
Non: Les données
étaient considérées
comme aberrantes

1^{ères} images satellite du trou d'ozone au-dessus de
l'Antarctique par le satellite TOMS de la NASA
après réévaluation des données



Stolarski *et al.*, Nature, 1986

Mais: fort impact médiatique de l'image du trou dans la couche d'ozone



Elucidation des mécanismes de destruction de l'ozone

Avant 1985 : théorie de l'ozone fondé sur chimie en phase gazeuse

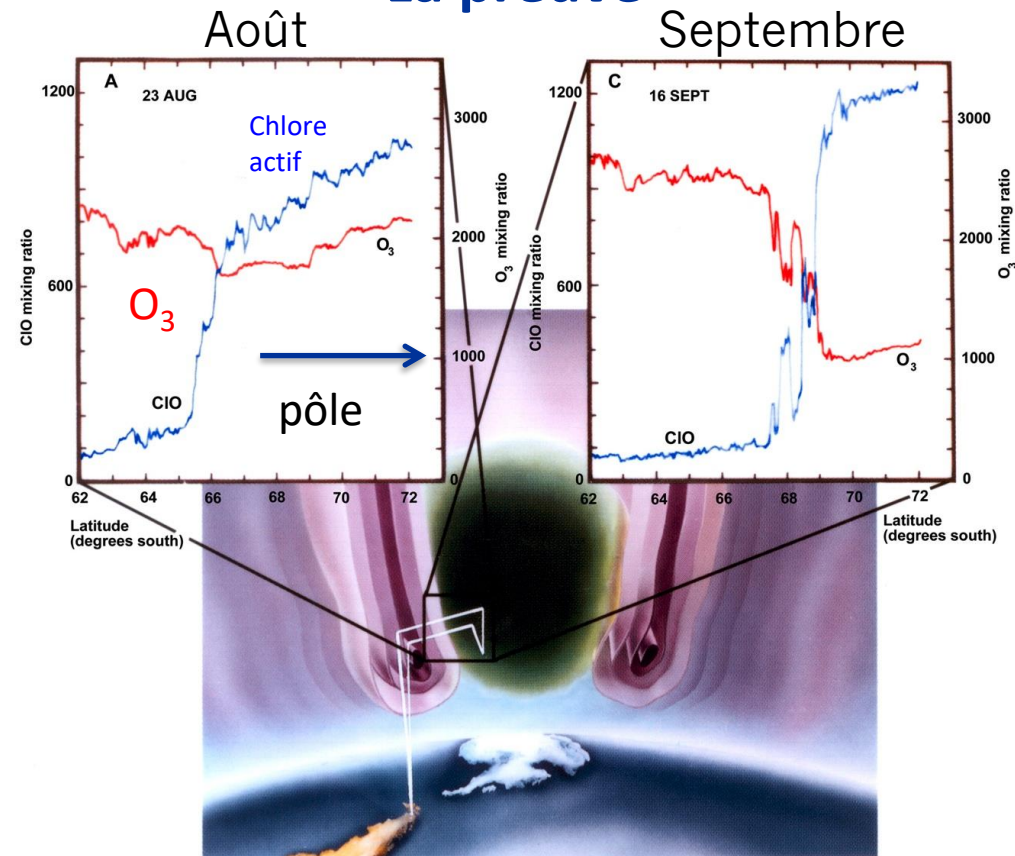
Antarctique : taux de perte de l'ozone : **~5 % par jour** non explicable par la théorie

Hypothèse :

Réactions chimiques à la surface des nuages stratosphériques polaires (PSC):

- **Activation des composés chlorés** (Solomon, 1986)
- **cycles catalytiques très rapides** (Molina & Molina, 1987)

La preuve

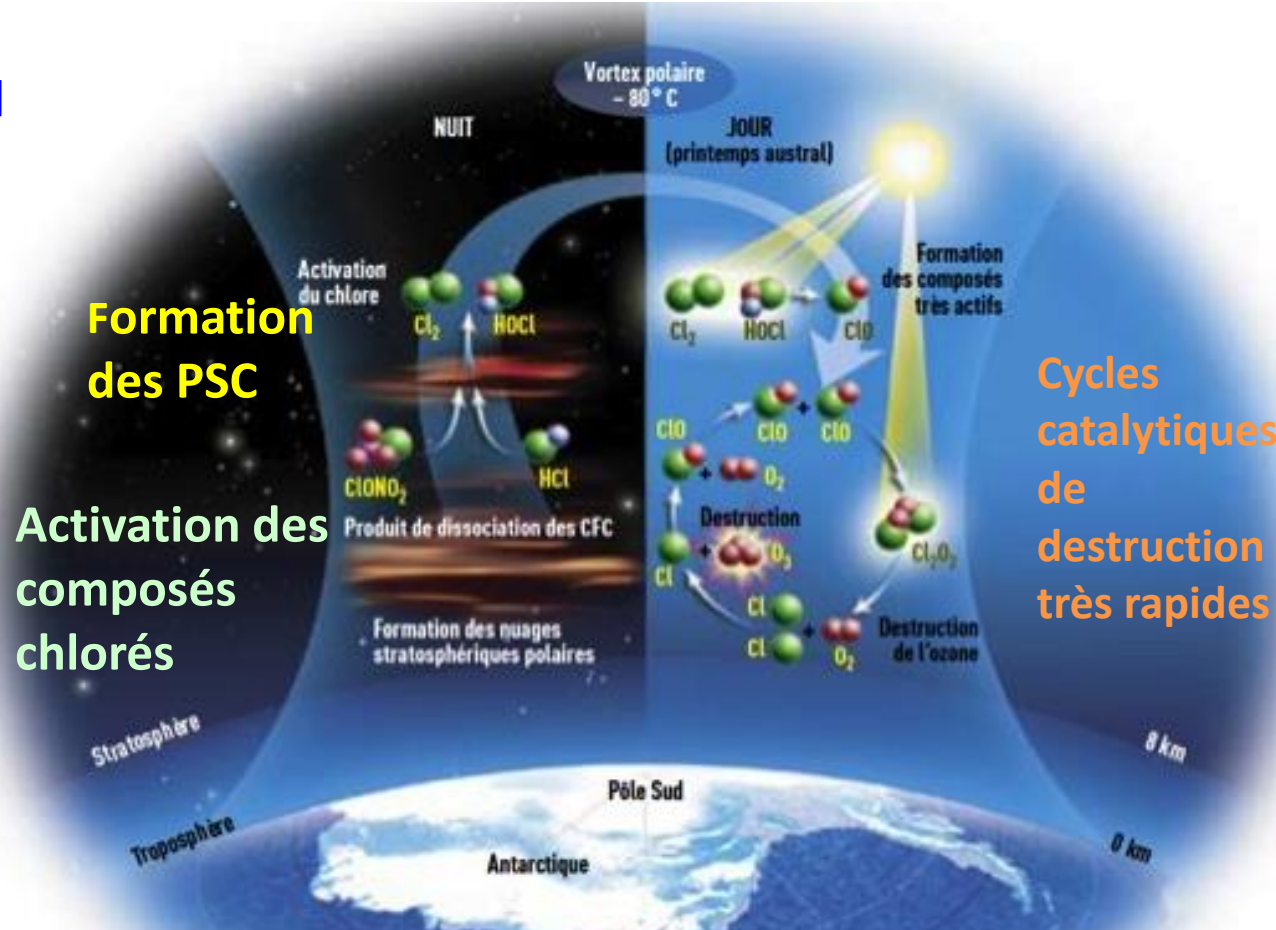


Campagne NASA : Airborne
Antarctic Ozone expedition – 1987
Avion ER-2

Mécanismes de destruction d'ozone au Pole Sud

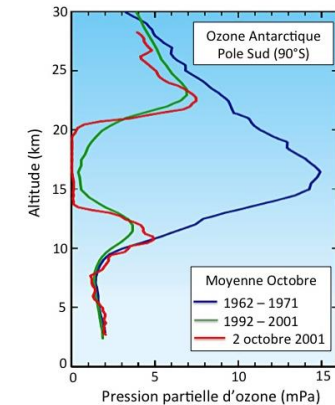
Automne:
Disparition soleil
vortex polaire
 $T < -80^{\circ}\text{C}$

hiver

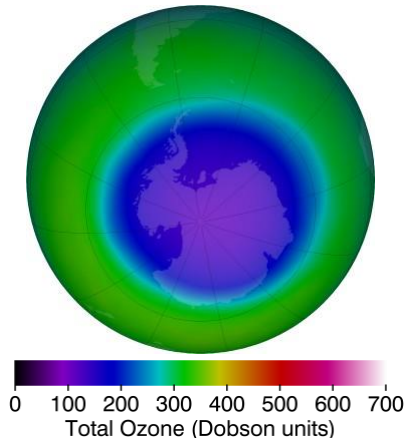


Printemps: le soleil réapparaît

Destruction totale d'ozone entre 14 et 20 km



« Trou » d'ozone maximal en octobre

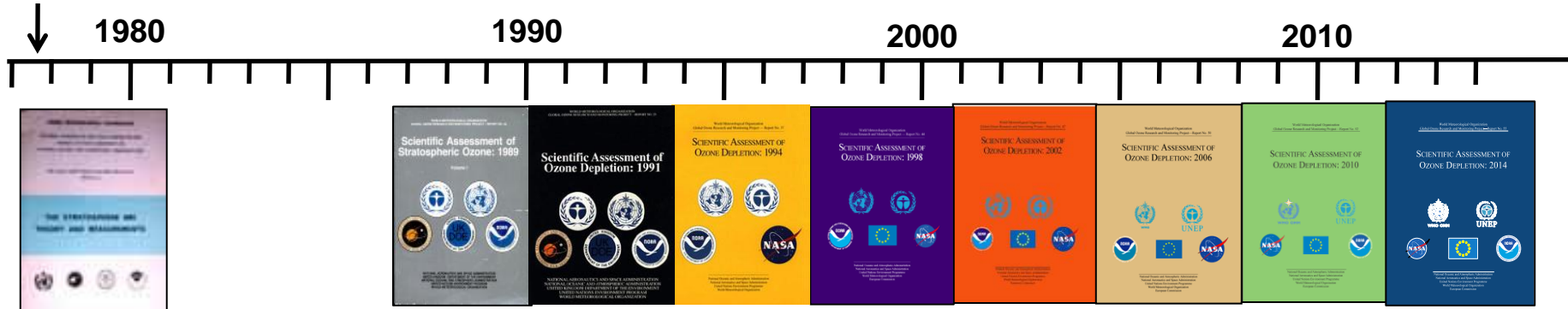


Ingrédients pour la formation du trou d'ozone:

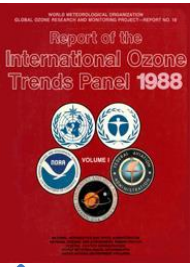
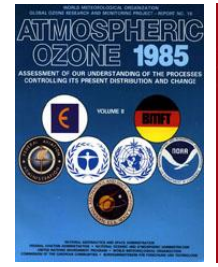
1. Augmentation de l'abondance des composés chlorés et bromés (**x 5**)
2. Masses d'air polaires isolées en hiver(vortex polaire)
3. Températures très basses ($< -80^{\circ}\text{C}$) -> formation de PSC -> activation Cl

Actions pour la protection de la couche d'ozone

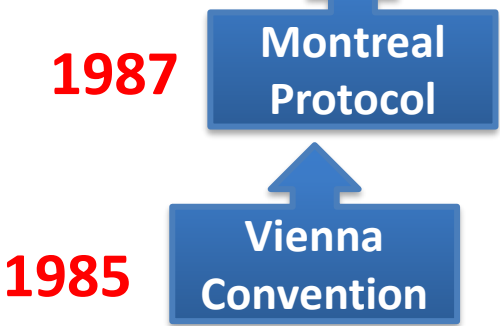
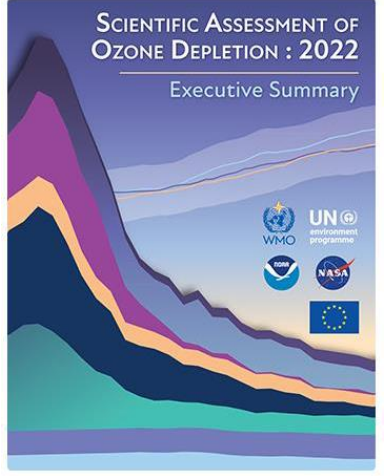
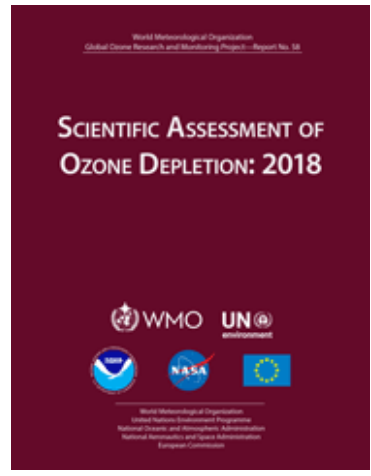
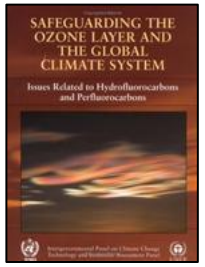
WMO World Plan of Action on the Ozone Layer - 1977



Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1989, 1991, 1994, 1998, 2002, 2006, 2010, 2014, 2018 (WMO/UNEP)



Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System: 2005 (IPCC/TEAP)



Ozone depleting substances regulation and ban

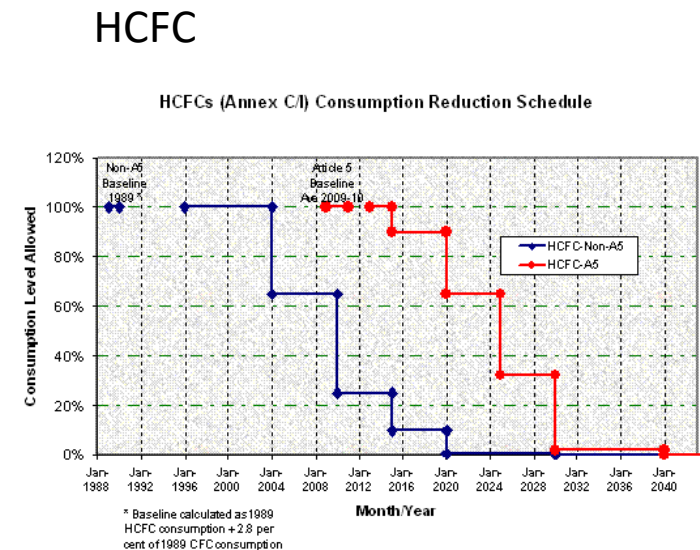
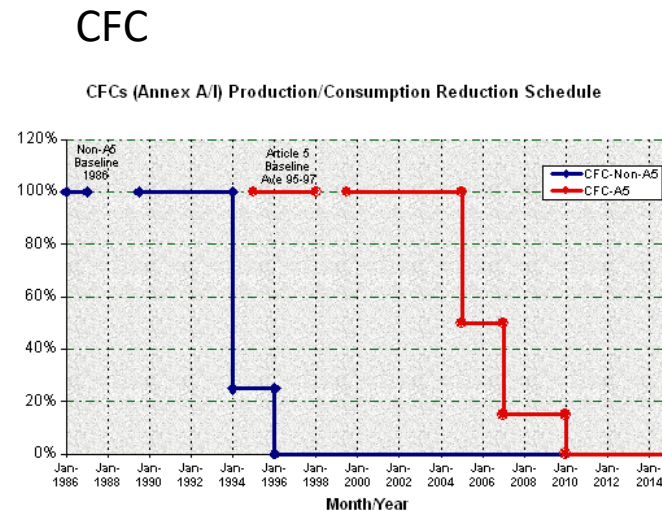
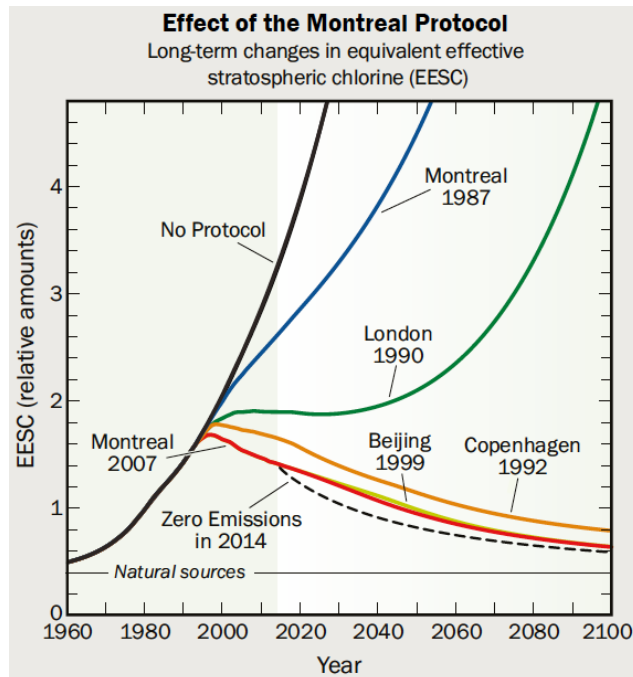
Protection of the ozone layer

Le Protocole de Montréal

Signé en 1987 – entré en vigueur en 1989 – maintenant ratifié internationalement

- Réglementation des émissions de CFC et de halons -> Substituts moins toxiques pour la couche d'ozone (1) HCFC puis (2) HFC ne contenant pas de chlore
- Calendrier d'élimination des SAO différencié selon les pays (article 5 du PM)
- Fond multilatéral pour aider les pays de l'Article 5 du PM à arrêter les émissions de SAO: ~ 4,5 milliards US\$ en 2022
- Rapports réguliers d'évaluation de l'état de la couche d'ozone: évolution de la réglementation suivant les résultats

Le PM a servi d'exemple lors de la création du GIEC (IPCC) en 1988 pour le suivi du changement climatique

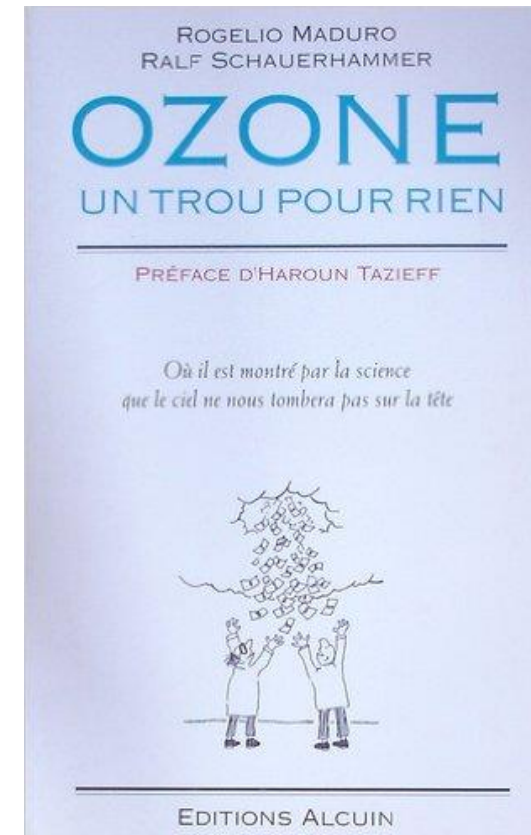
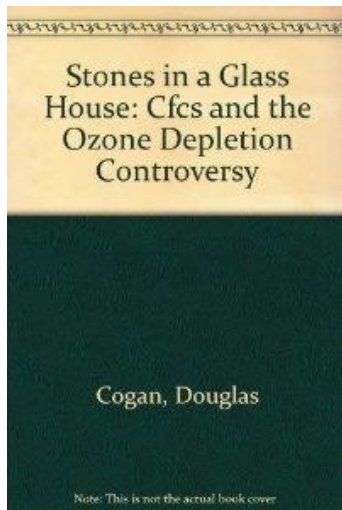


Malgré les preuves, la controverse

Quelques exemples:

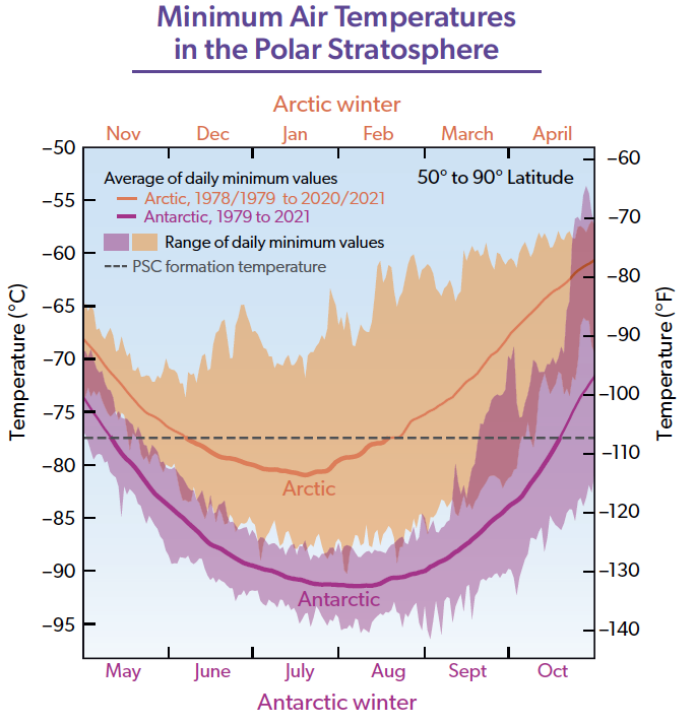
« Gardons notre sang-froid: dans le domaine mystérieux et fugace de la chimie stratosphérique, on reste toujours à la merci d'un renversement de théorie » [Janvier 1989 \(Nouvel Observateur\)](#)

« Ozone: Haroun Tazieff se fâche »
[février 1989 \(Nouvel Observateur\)](#)



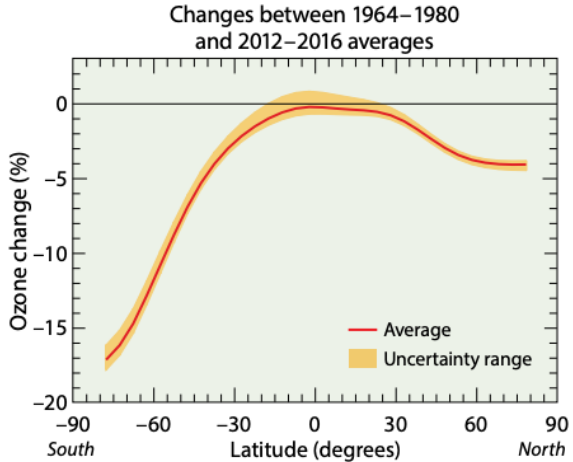
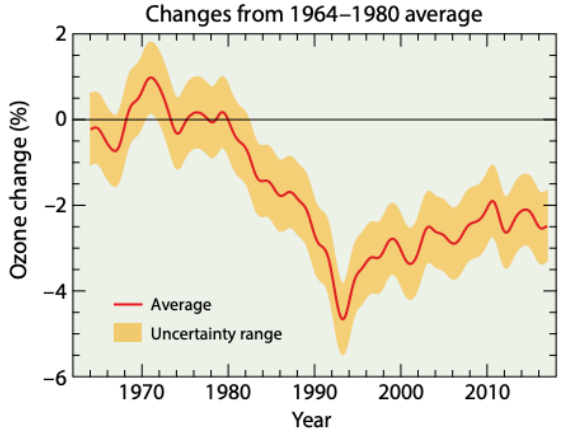
Destruction d'ozone en Arctique et à l'échelle globale

Arctique



Formation de nuages stratosphériques polaires mais vortex polaire moins isolé et plus chaud : destruction d'ozone plus faible et plus variable

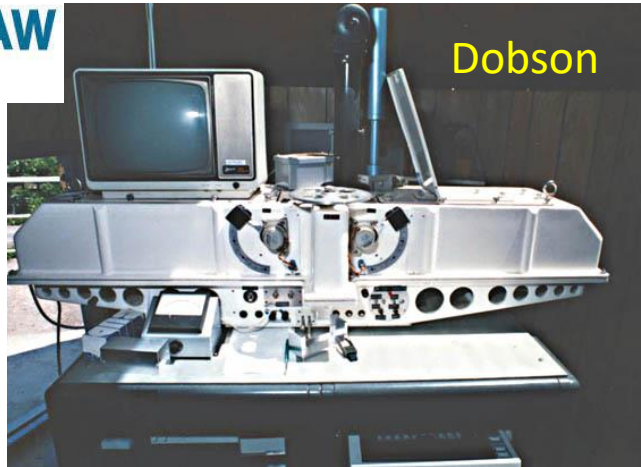
Régions extra-polaires



Programme de surveillance de l'ozone



GAW



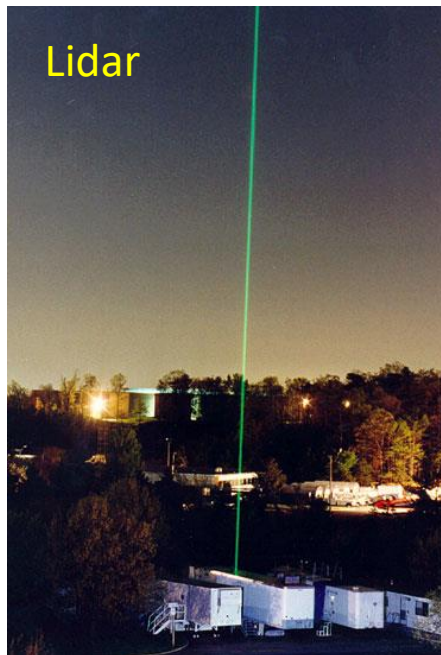
Dobson



satellites



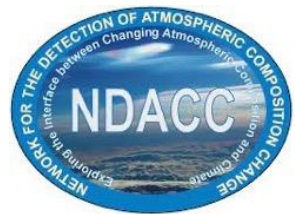
ballons sonde



Lidar

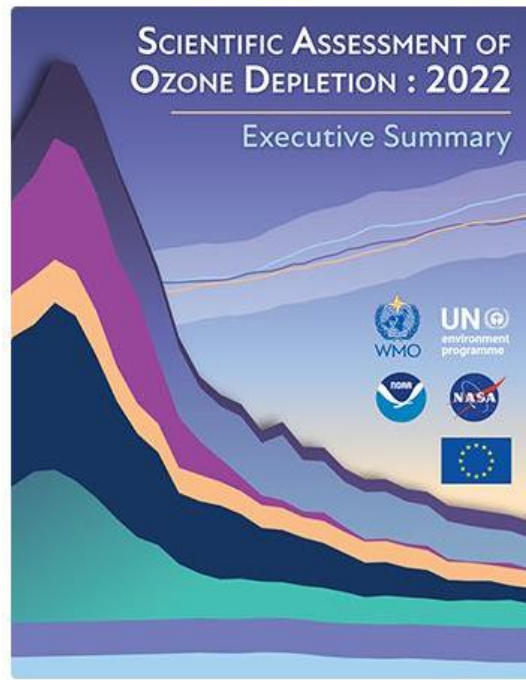


Stations de mesure



Etat de la couche d'ozone 35 ans après la signature du Protocole de Montréal

MONTREAL
PROTOCOL
@35

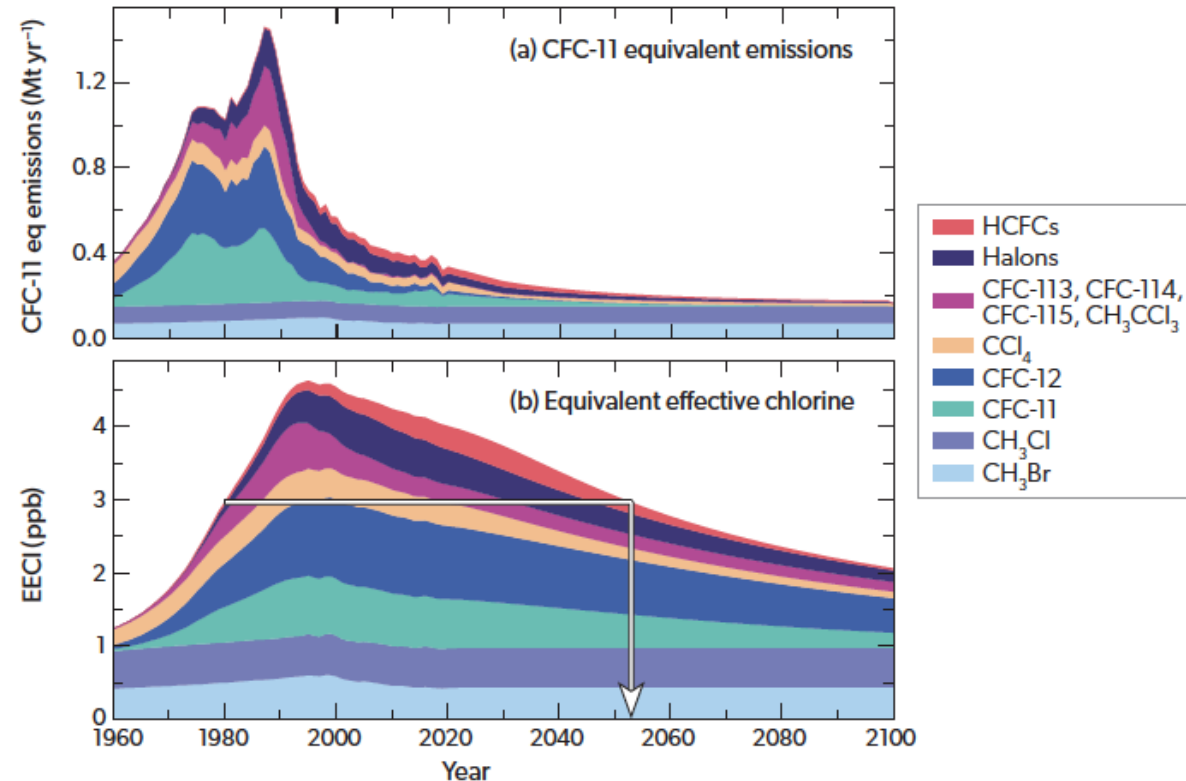


<https://csl.noaa.gov/assessments/ozone/2022/>

L'abondance des SAO décroît

Les actions liées au protocole de Montréal ont conduit à une diminution de l'abondance des SAO et au début de la reconstitution de la couche d'ozone.

CFC-11-eq emissions
(ODP-weighted)



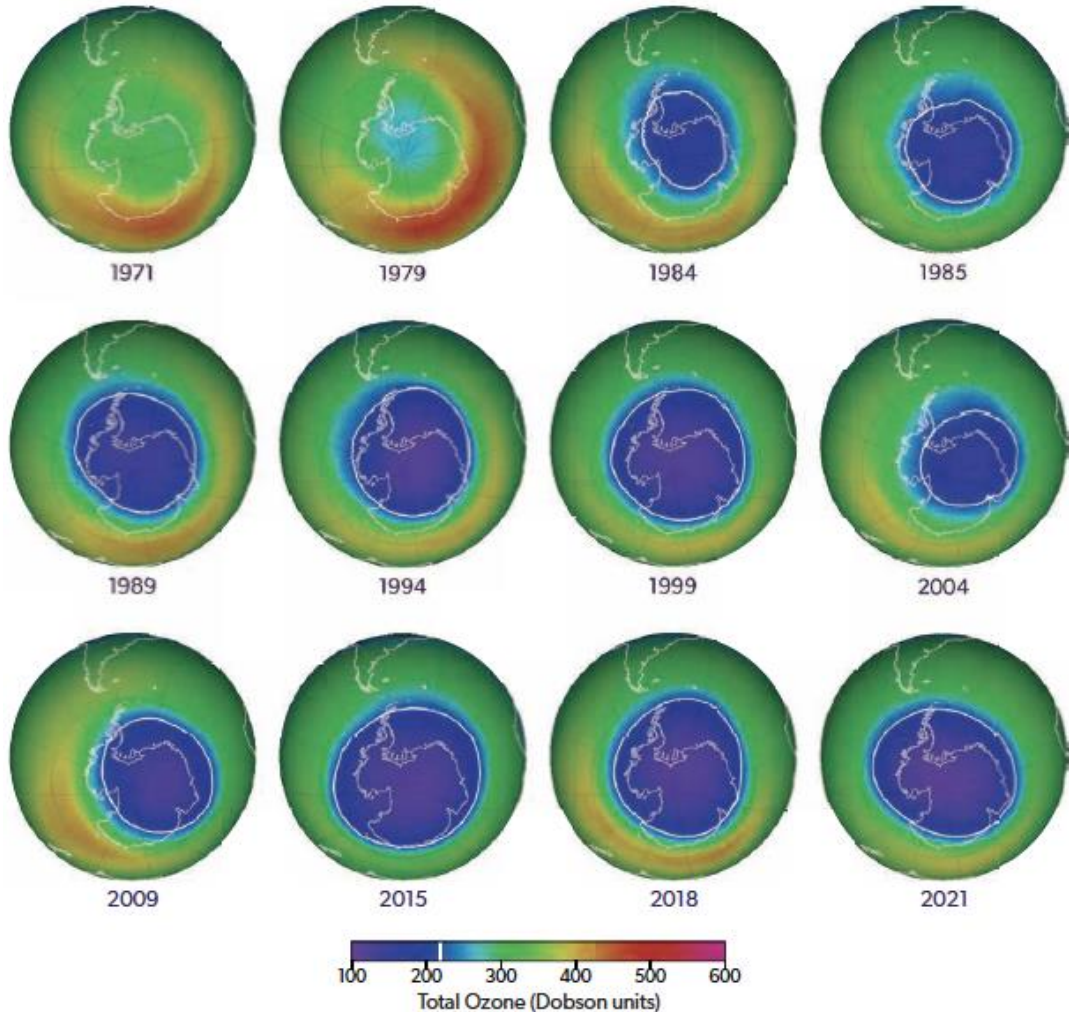
Equivalent effective chlorine (EECI)

La plupart des SAO ont une durée de vie très longue : Il leur faudra beaucoup de temps pour disparaître de l'atmosphère.

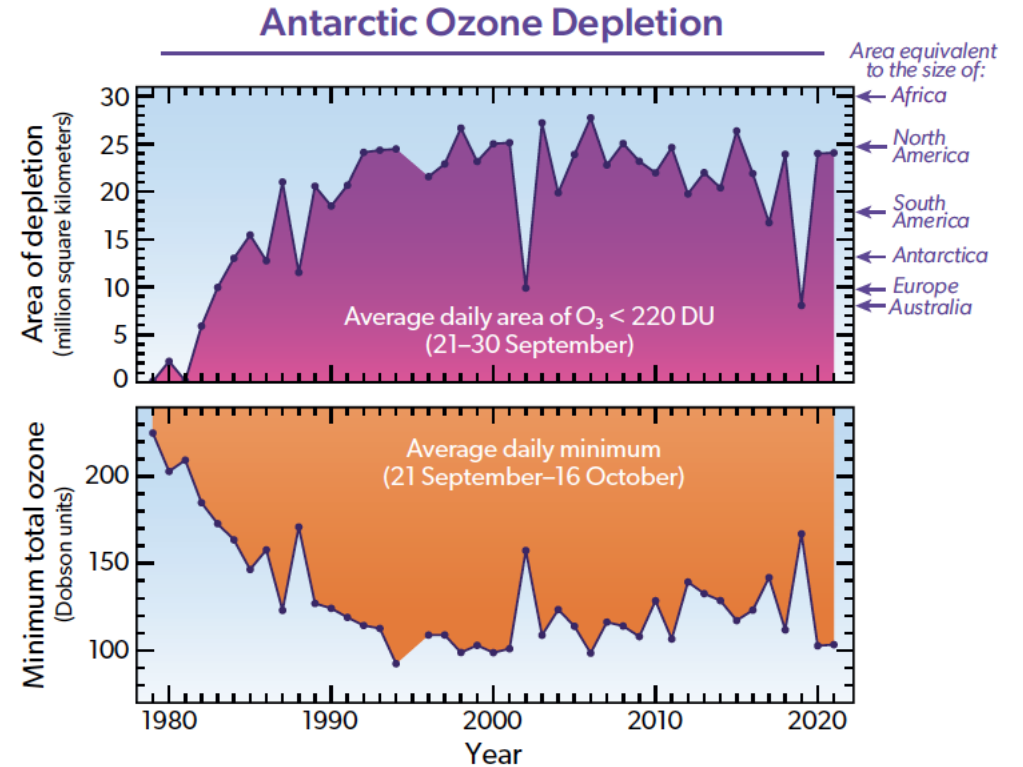
Temps de vie CFC-11: 52 ans
Temps de vie CFC-12: 102 ans

Evolution du trou d'ozone antarctique

Moyennes mensuelles du contenu intégré d'ozone en octobre au-dessus de l'Antarctique



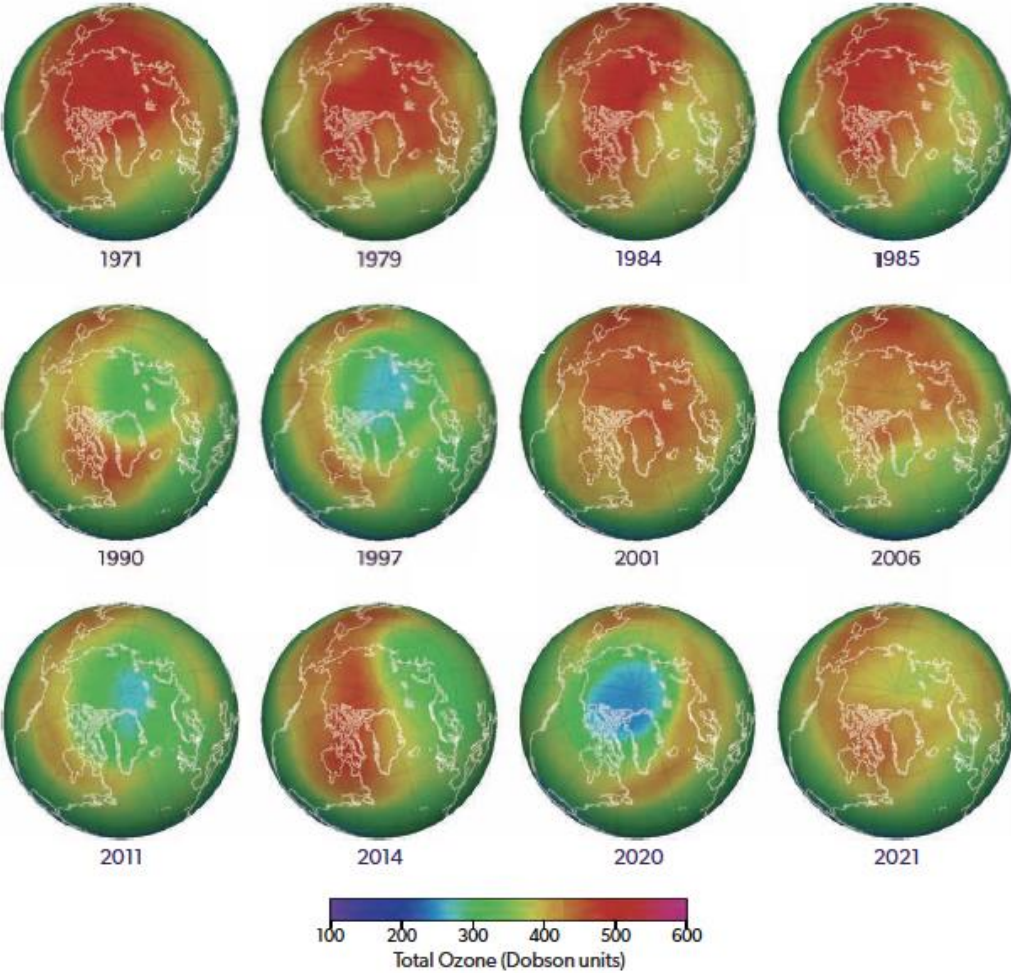
Surface du trou d'ozone (TO3<220 DU) et valeurs minimales d'ozone au-dessus de l'Antarctique



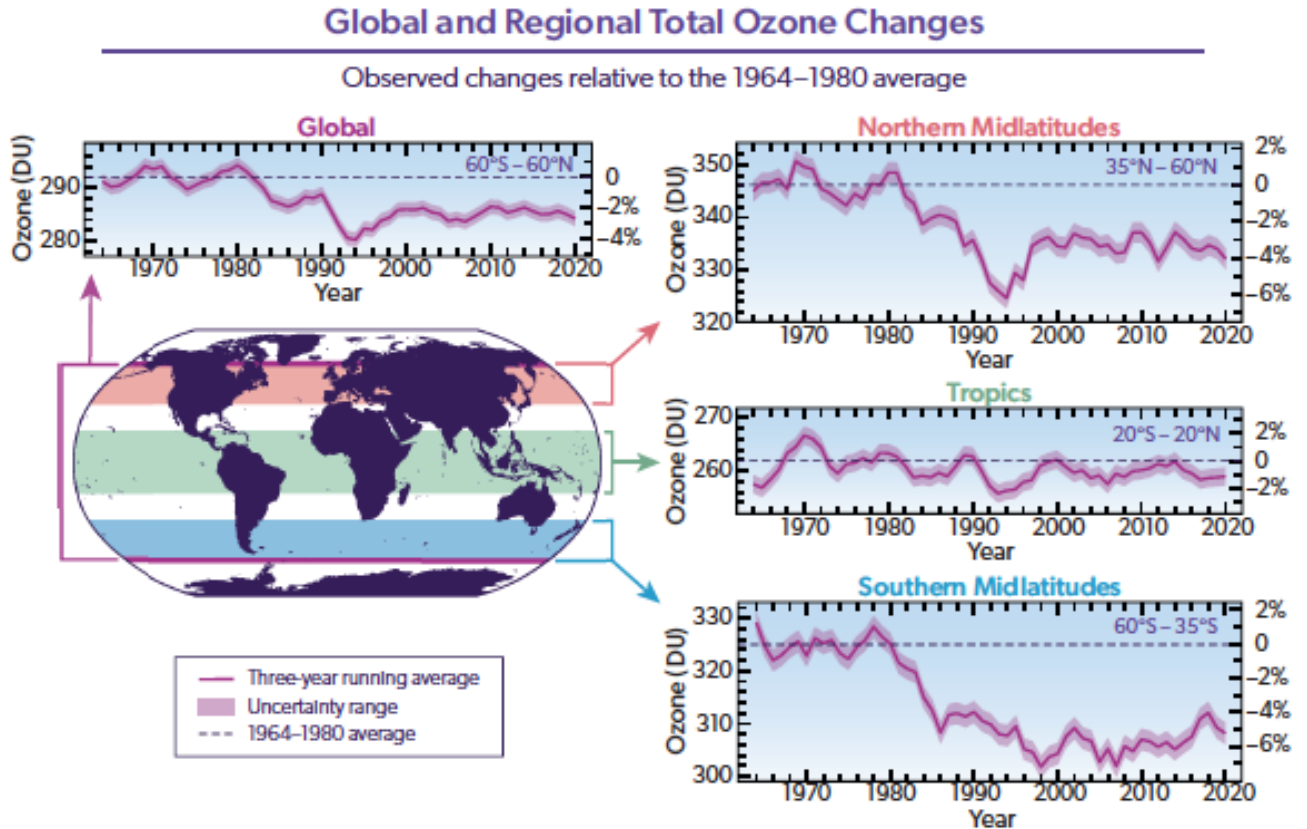
Phénomène saisonnier récurrent dans l'hémisphère sud depuis ~1980

Evolution de l'ozone à l'échelle globale

Moyennes mensuelles du contenu intégré d'ozone en mars au-dessus de l'Arctique

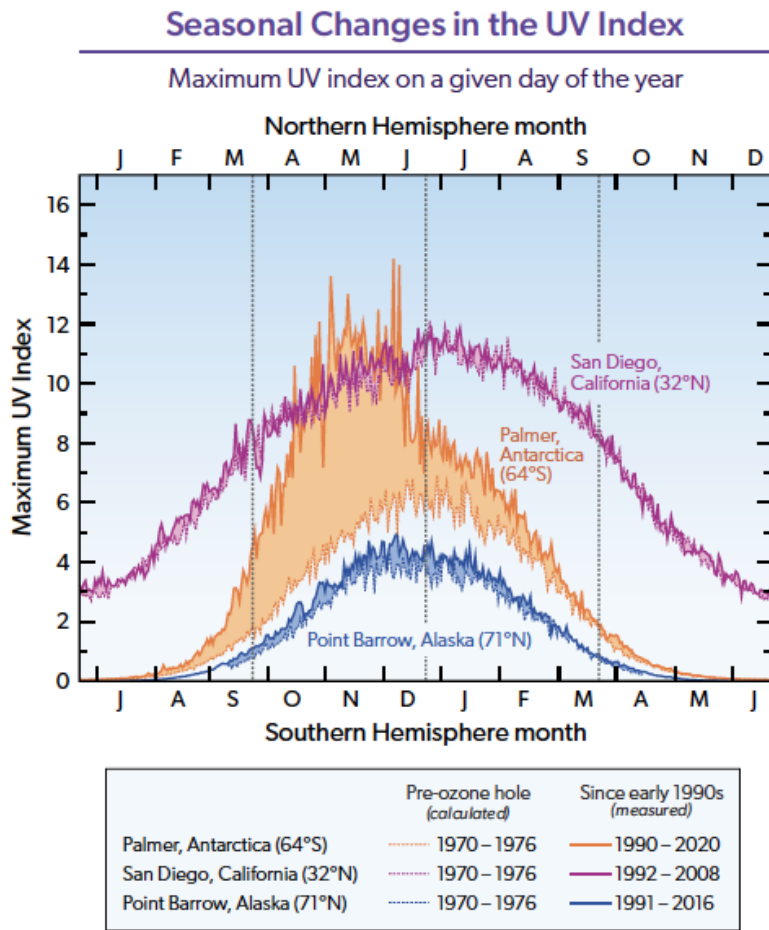


Evolution de l'ozone à l'échelle globale et selon les latitudes

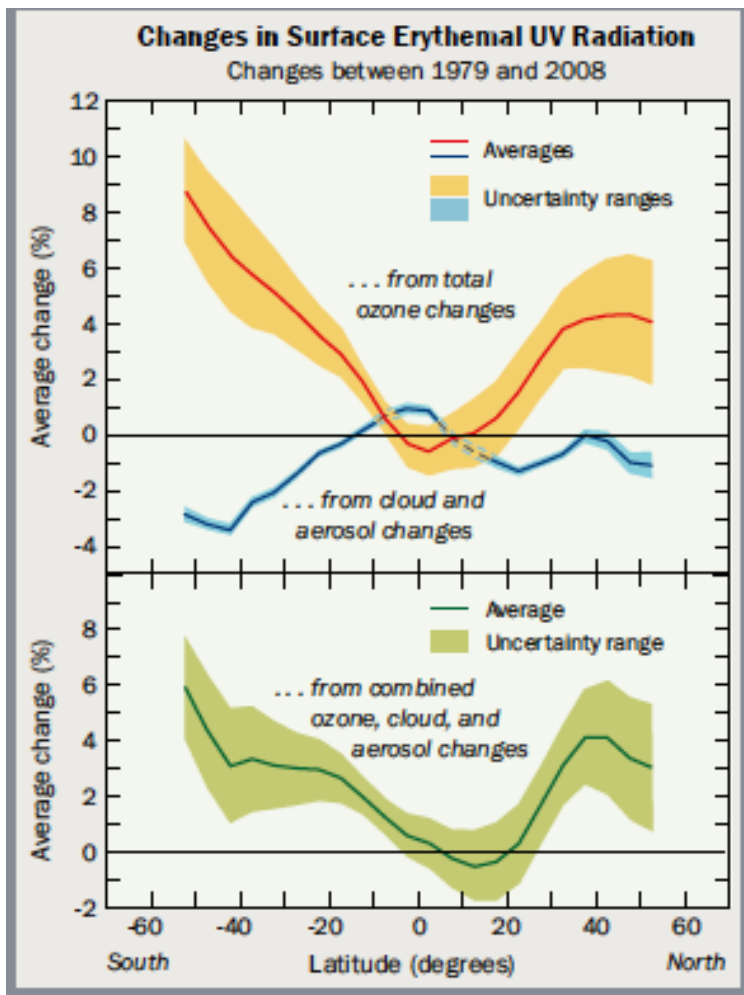


Et le rayonnement UV?

Variation saisonnière de l'indice UV au pôle sud

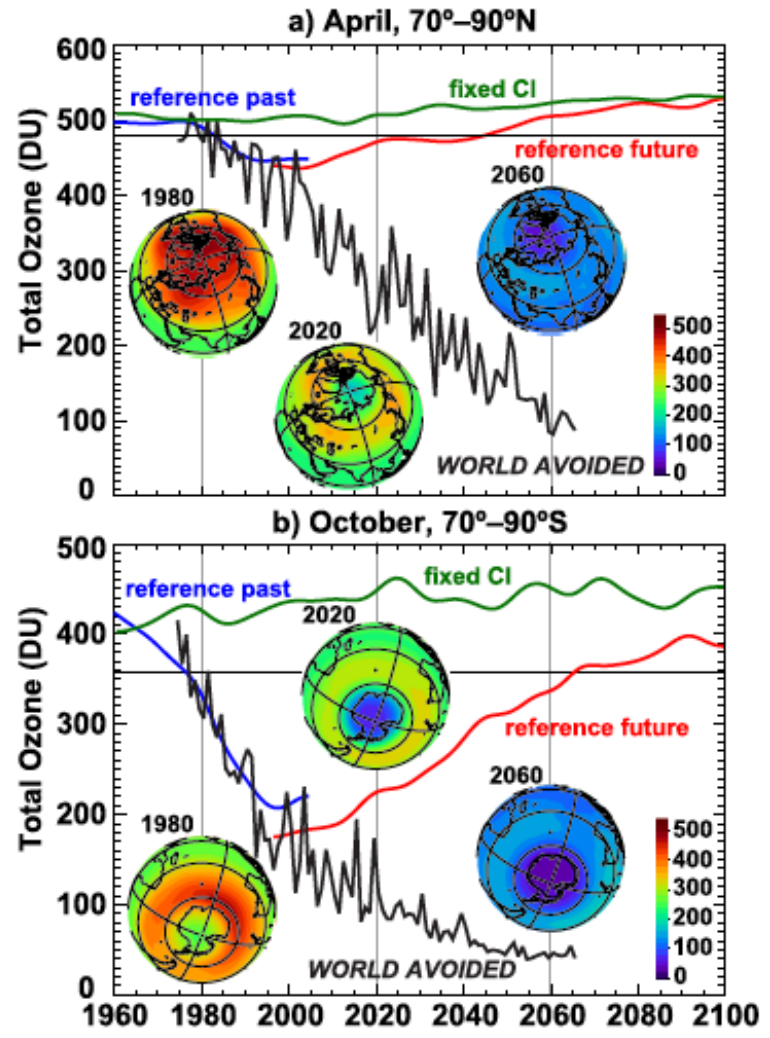


Evolution du rayonnement UV de surface Entre 1979 et 2008

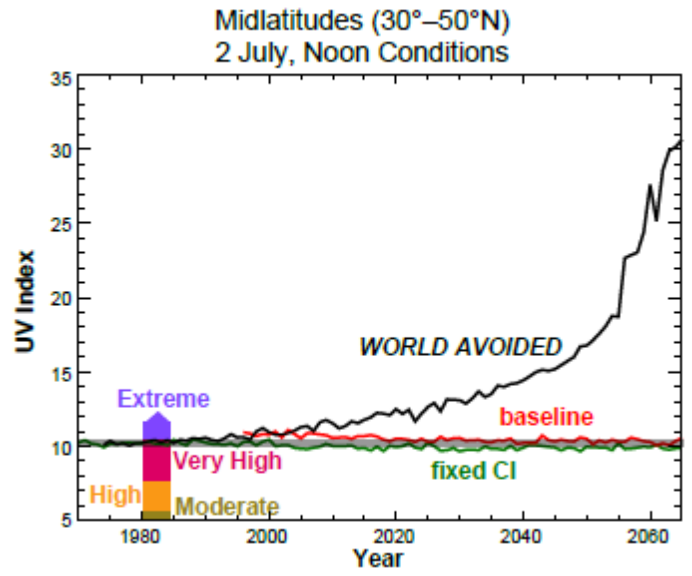


Le monde évité par le Protocole de Montreal

Ozone



Rayonnement UV



Newman et al., 2009

Puits de carbone terrestre

Le Protocole de Montréal a protégé le puits de carbone terrestre

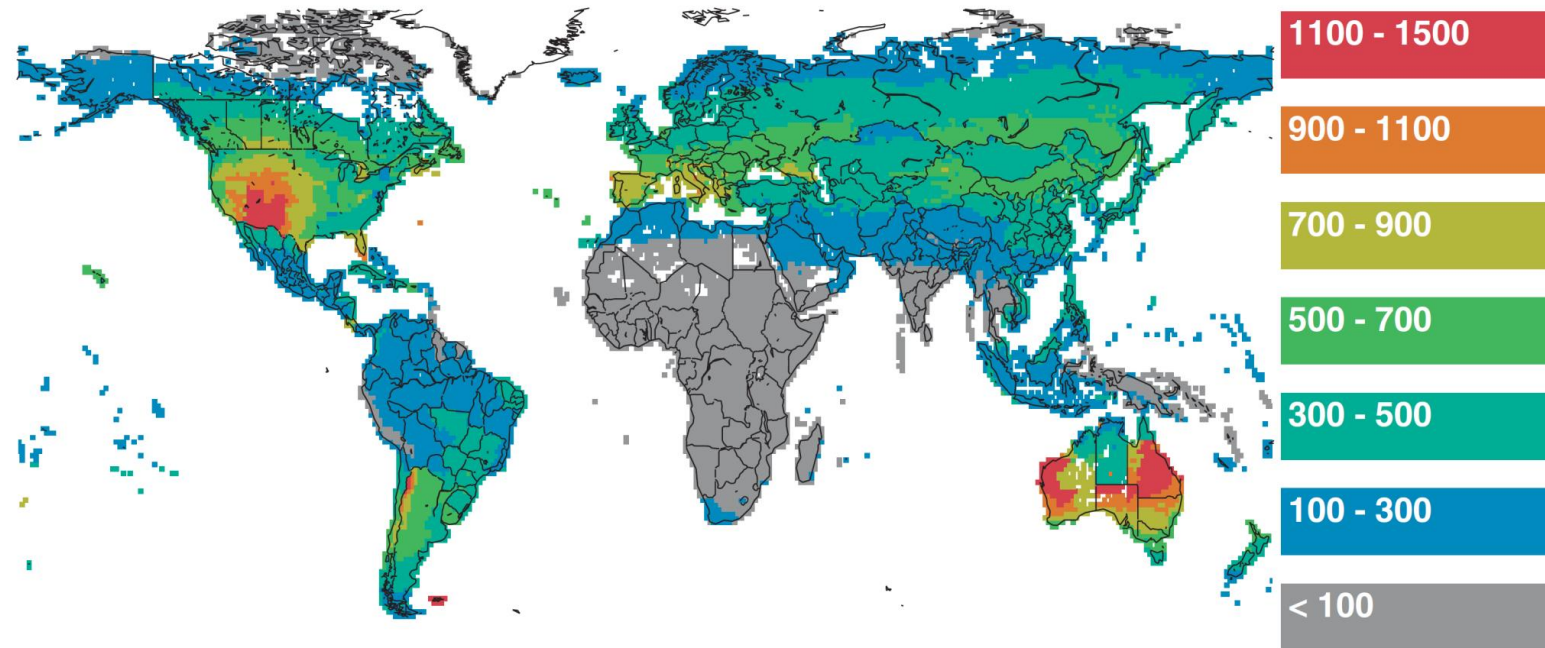
Sans le MP: 325–690 milliards de tonnes en moins de carbone dans les plantes and les sols à la fin du siècle (2080–2099)

115–235 ppm en plus de CO₂
-> réchauffement additionnel de 0.5–1.0°C

Young et al., 2021

Le monde évité par le Protocole de Montréal: santé

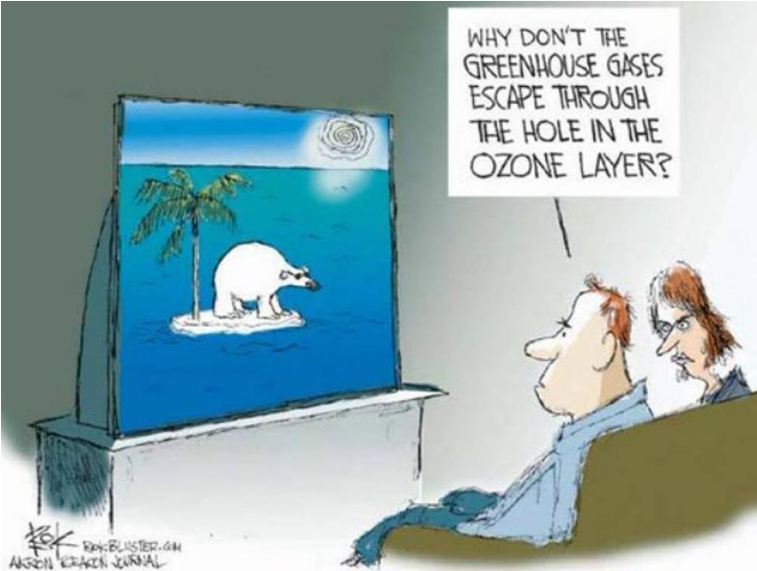
Nombre de nouveaux cas de cancer de la peau par million de personnes et par an en 2030



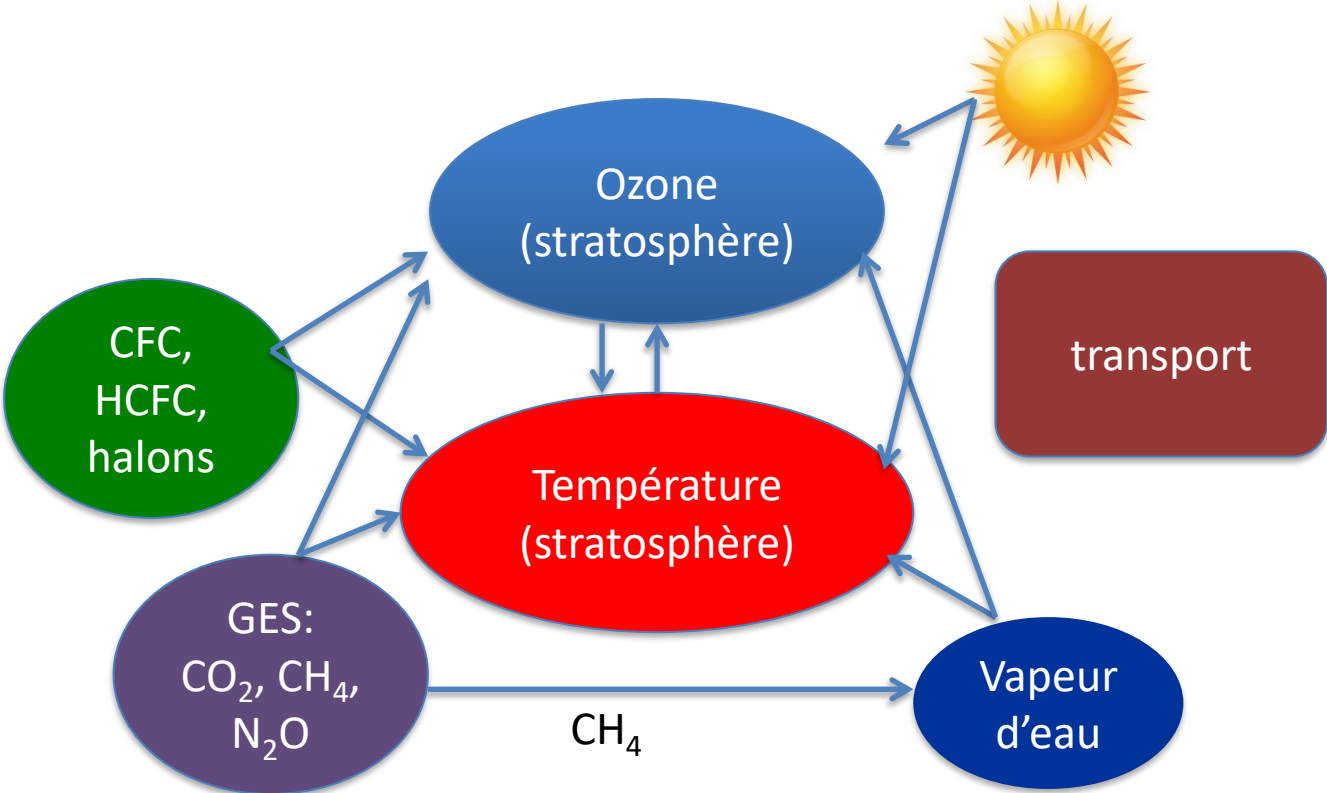
Projection of the total numbers of excess new cases of total skin cancer per million people per year avoided by the Montreal Protocol in 2030 compared with a reference population that takes account of population growth only
In total: 2 million skin cancers avoided per year in 2030

Van Dijk et al., 2013

Interactions ozone – climat

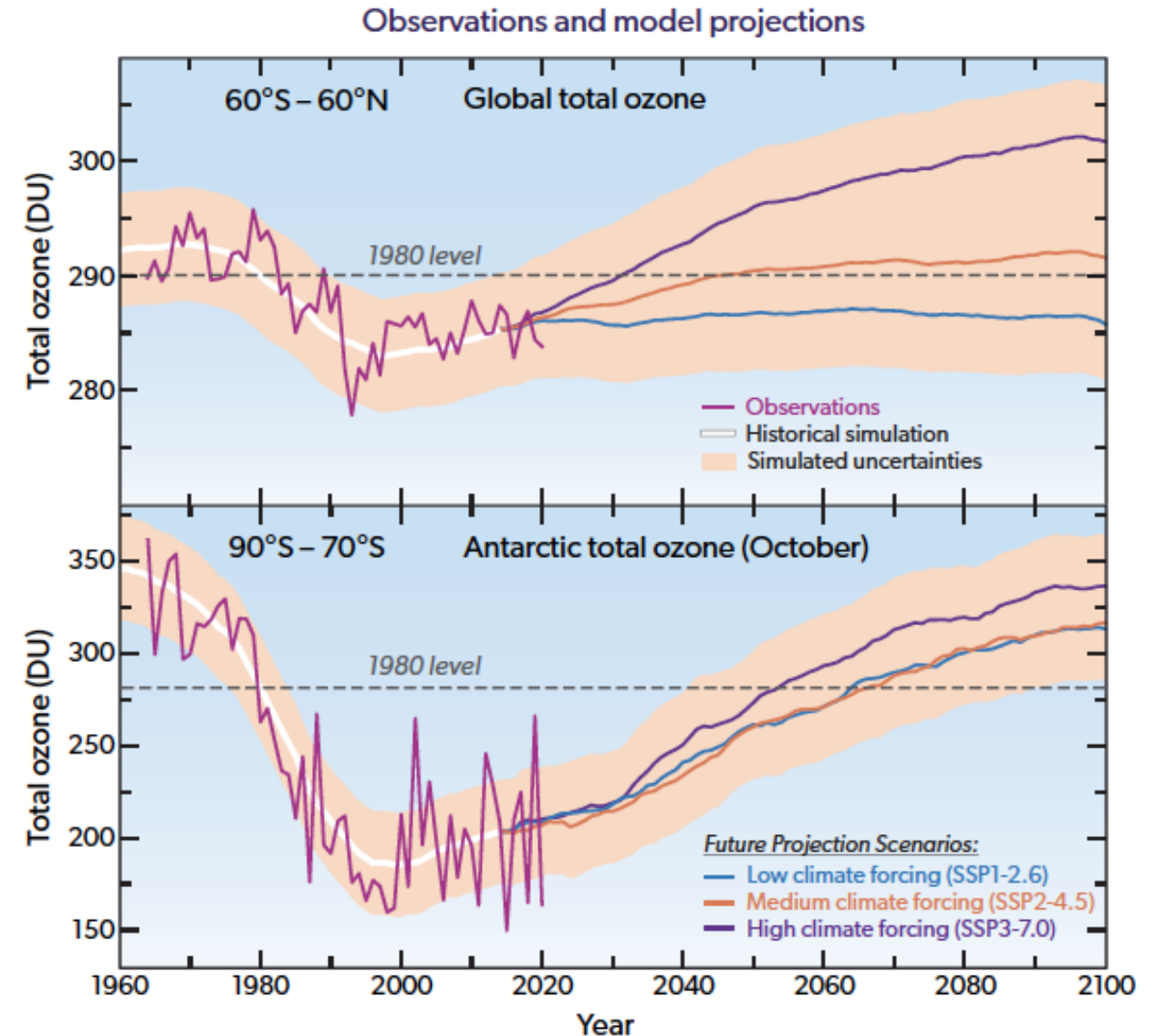


C'est un peu plus compliqué...

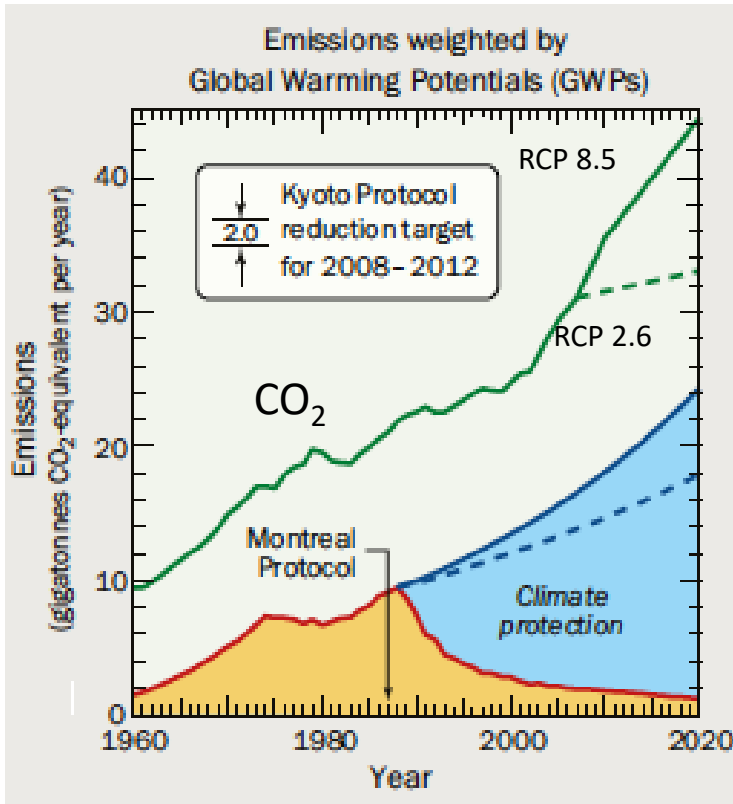


Scénarios de rétablissement de la couche d'ozone

1. Respect du Protocole de Montréal: diminution de l'abondance des SAO
2. Changement climatique:
 - Sous rétablissement aux tropiques
 - Sur-rétablissement aux latitudes moyennes et aux pôles
3. Impact différent suivant l'intensité des émissions de GES



Co-bénéfices du protocole de Montréal: protection du climat



CFCs puissants gaz à effet de serre:

Pouvoir de Réchauffement Global du CFC-12: **10300 fois celui du CO₂**

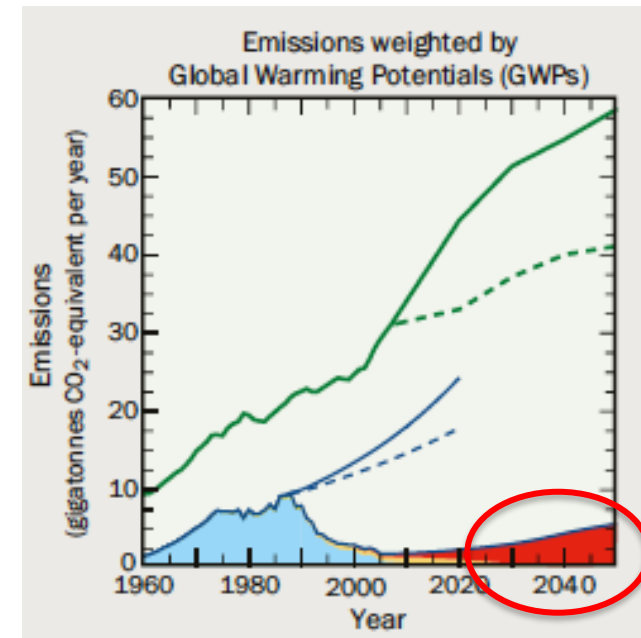
Pondération des émissions de CFC par PRG

Environ **12 Gt équivalent CO₂ évitées par an** par le Protocole de Montréal en 2012

Objectif Kyoto: **réduction de 2 Gt CO₂ en 2012**

Mais... attention aux substituts !

PRG HFC-23: 14800; HFC-134a: 1300



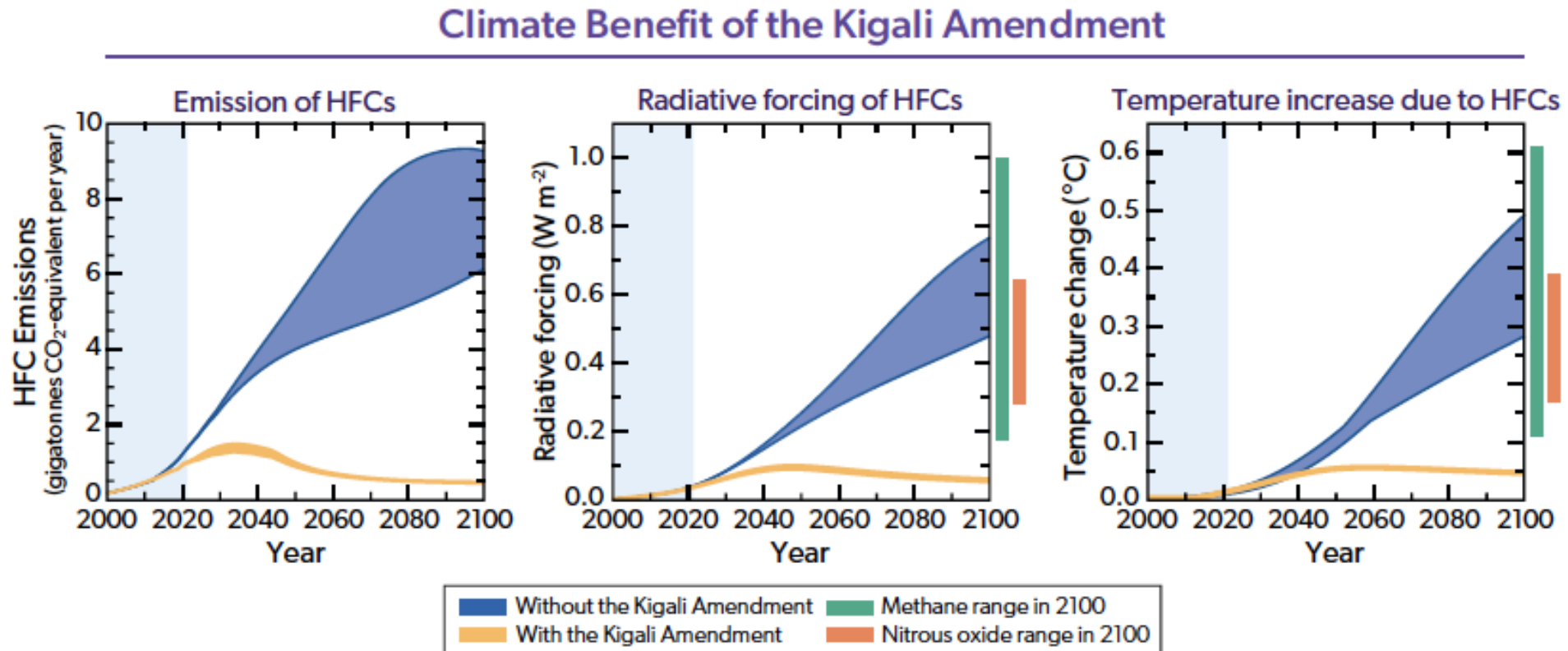
HFC



En octobre 2016, adaption de l'Amendement de Kigali au Protocole de Montreal pour réguler les HFC

Réglementation des hydrofluorocarbures

L'Amendement de Kigali permettra de réduire le réchauffement global dû aux HFC en 2100 de 0.3 - 0.5°C à moins de 0.1°C.

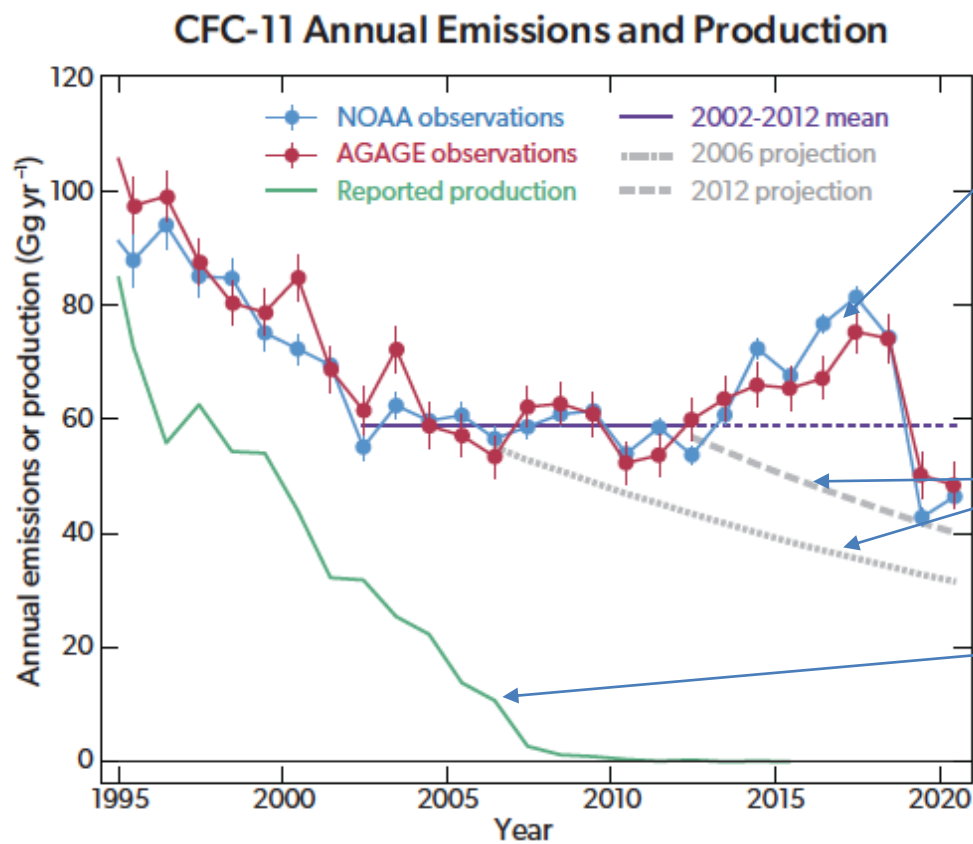


Menaces émergentes sur la couche d'ozone

- Le respect du protocole de Montréal doit faire l'objet d'un suivi attentif (émissions de CFC-11 en 2012 – 2019 malgré l'interdiction).
- Événements exceptionnels pouvant perturber les processus chimiques affectant la couche d'ozone :
 - Injection d'aérosols dans la stratosphère par les éruptions volcaniques et les feux de biomasse. Ces feux sont beaucoup plus fréquents avec le changement climatique (exemple: les feux en Australie en 2019-2020)
 - L'éruption cataclysmique du volcan Hunga Tonga a injecté de très grandes quantités d'aérosols et de vapeur d'eau dans la stratosphère -> destruction locale d'ozone
- Augmentation de l'abondance d'espèces halogénées à courte durée de vie émises par l'industrie et non réglementées par le Protocole de Montréal
- Géoingénierie solaire: injection d'aérosols dans la stratosphère pour refroidir le climat de surface

Emissions de CFC-11 en 2012 – 2019

Production de CFC-11 interdite globalement depuis 2010



Emissions de CFC-11 dérivées des mesures atmosphériques de CFC-11 par les réseaux globaux AGAGE

Projections de la baisse de l'abondance de CFC-11 à partir de 2006 ou 2012

Production rapportée à l'UNEP pour tous les usages

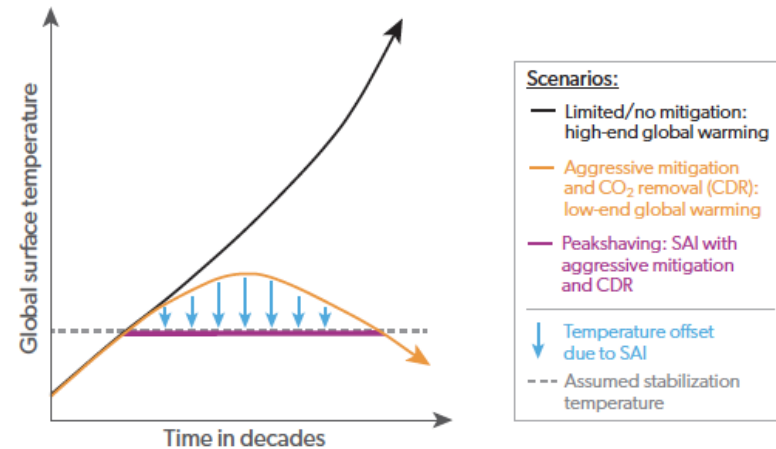
Augmentation des émissions de CFC-11 de 120 – 440 kT en 2012 – 2019 par usines chinoises

Effet sur l'ozone: faible, grâce à l'arrêt rapide des émissions par la Chine et à la surveillance des SAO par les réseaux globaux

Rétablissement de la couche d'ozone retardé de 6 mois à 5 ans suivant les latitudes

Injection d'aérosols stratosphériques et impact sur l'ozone

Peakshaving Scenario for Stratospheric Aerosol Injection (SAI)



Grandes éruptions volcaniques: importantes quantités d'aérosols injectées dans la stratosphère et réduction de la température globale à la surface de la Terre: exemple du Pinatubo (1991) : 15Mt de SO₂ injectées dans la stratosphère et formation d'aérosols sulfatés
Refroidissement: ~0.5°C pendant ~2 ans

Injection d'aérosols dans la stratosphère (SAI) considérée pour réduire le réchauffement de surface à l'échelle globale

- **Incertitudes importantes: grandes différences entre les simulations de SAI sur l'efficacité de refroidissement par unité de soufre injecté**
- **Effet sur l'ozone stratosphérique:** retard à la disparition du trou d'ozone antarctique de 25 à 50 ans
- **Procédé très controversé:** impact sur la localisation des zones de mousson, réchauffement accéléré si arrêt des injections, continuation de l'acidification des océans, problèmes de gouvernance pour gérer les impacts négatifs dans les régions vulnérables, frein à l'action pour la diminution des émissions de CO₂, etc...
- Mais actuellement beaucoup de financements publics et privés (slogan: refreeze the Arctic)

Conclusions

- Grande efficacité du Protocole de Montréal à réduire les émissions de SAO et leur abondance dans l'atmosphère
- Mais très longue durée de vie des SAO: le retour de la couche d'ozone à son niveau pré-1980 prend des décennies: entre 2035 et 2065, suivant les latitudes et le changement climatique.
- Le protocole de Montréal a permis d'éviter une forte diminution de l'ozone et une forte augmentation du rayonnement UV préjudiciable à la survie de l'humanité et des écosystèmes
- Le protocole de Montréal a également réussi à protéger le climat (y compris l'amendement de Kigali)
- Futures menaces sur la couche d'ozone: nécessité de continuer à surveiller la couche d'ozone et la teneur en SAO

Comparaison des problématiques de l'ozone et du climat

Ozone et **climat**: 2 problématiques globales liées aux actions humaines et menaçant la survie de l'humanité

Science

- Mesures Halley Bay (ozone), **courbe de Keeling (CO₂)**
Observations faites par seul intérêt scientifique
- **Phénomènes non perceptibles**
- **Temporalités**: perturbations très longues à évacuer du système Terre
- **Points de rupture**: Apparition du trou d'ozone au-delà d'un certain niveau de chlore dans la stratosphère – **climat?**
- **Preuve**: Expérimentale très rapide dans le cas de l'ozone « smoking gun »: mesures avion stratosphérique ER-2 en 1986 – 1987

Climat: plus long (série de température, utilisation modèles avec ou sans forçage GES, études d'attribution, ...)

Controverses similaires

médias à l'écoute de scientifiques non spécialistes, consensus scientifique non mis en avant ,...
Mais pour l'ozone arrêt de la controverse dans les années 1990 grâce aux preuves expérimentales



Leçons du Protocole de Montréal

Spécificités du protocole

- Seule industrie chimique concernée, dominée par les USA (DuPont de Nemours dans les années 1970). USA à la pointe
- Accompagnement de la science: simulations du modèle DuPont inclus dans les rapports d'évaluation
- 1^{ère} alertes en 1970 -> substituts dans les cartons en 1985
- Problème focalisé et réglé par un petit nombre de nations – Analyse coût-bénéfice jugée intéressante par les USA
- Fond multilatéral: prise en compte de la responsabilité des nations développées. A facilité la ratification universelle du PM et l'établissement d'une communauté d'acteurs sur le long terme

Atouts et caractère pionnier du protocole

- Robustesse: arrêt rapide des émissions interdites de CFC-11 par la Chine malgré l'absence de processus de sanctions – communauté bien intégrée d'acteurs politiques et scientifiques
- Souplesse: amendement de Kigali. Utilisation du protocole pour un objectif (le climat) qui n'est pas l'objectif initial de ce protocole (la couche d'ozone)

Merci de votre attention!



PSC au-dessus de l'Observatoire de Haute-Provence (3/02/2016)