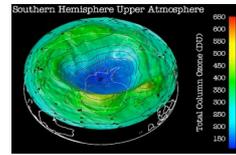
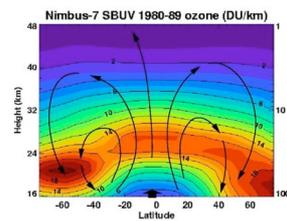


2. L'ozone stratosphérique



Introduction : Stratosphère v.s. Troposphère

1. La distribution de l'ozone stratosphérique
2. Cycles de destruction de l'ozone stratosphérique
3. L'ozone polaire
4. Evolution de la couche d'ozone



UVSQ – INSTN - ENSTA

Ozone stratosphérique - 1

Introduction

	STRATOSPHERE	TROPOSPHERE
profil thermique	bilan radiatif + ondes	bilan radiatif + convection
Humidité	+++	---
Chauffage	base	intérieur

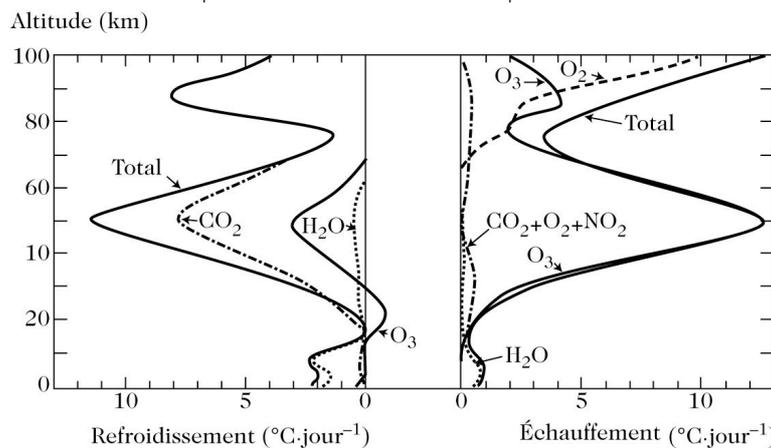


Fig. 1 : Taux d'échauffement et de refroidissement de la stratosphère

UVSQ – INSTN - ENSTA

Ozone stratosphérique - 2

1. Distribution de l'ozone stratosphérique
1.1 Distribution verticale de l'ozone

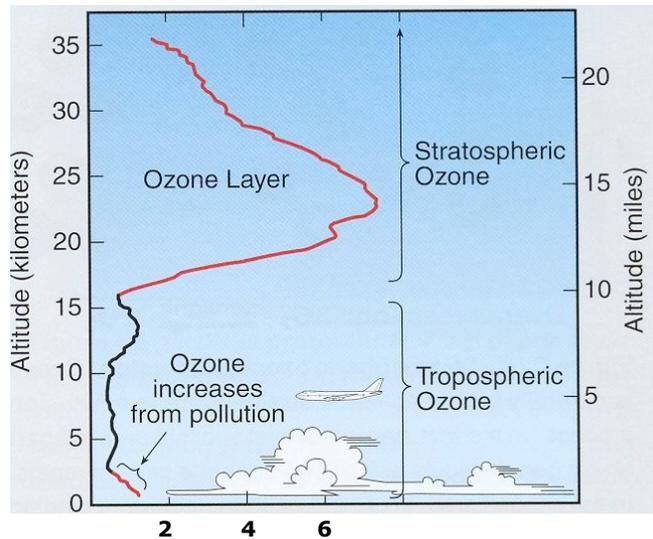


Fig. 1 : Profil vertical de l'ozone dans l'atmosphère (10^{12} molec. cm^{-3}).

1. Distribution de l'ozone stratosphérique
1.1 Distribution de l'ozone stratosphérique

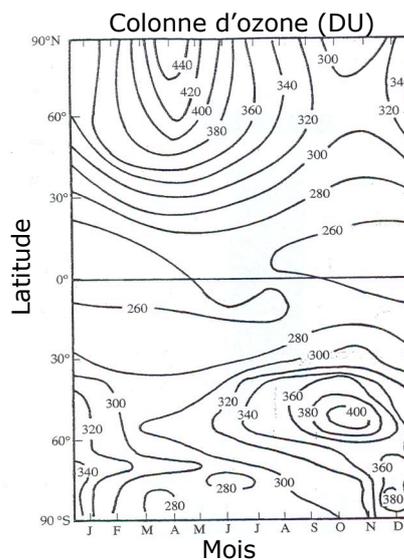


Fig. 1 : Variation saisonnière de la colonne d'ozone avant les années 1980.

1. Distribution de l'ozone stratosphérique

1.1 Distribution verticale de l'ozone

SAGE O₃ Profile 940911 (40°S, 105°E)

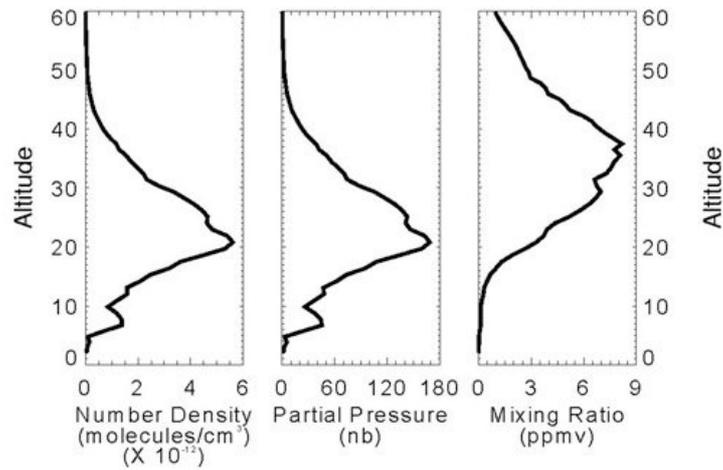


Fig. 2 : Profil vertical de l'ozone mesuré par SAGE.

1. Distribution de l'ozone stratosphérique

1.1 Distribution verticale de l'ozone

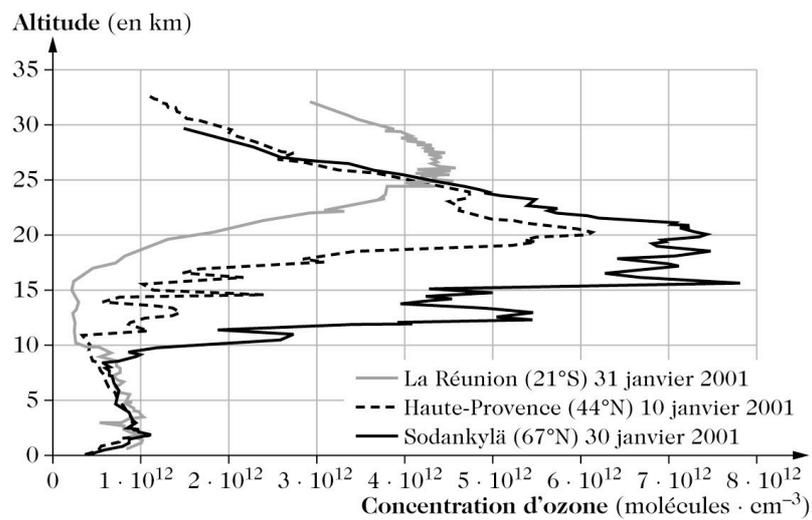


Fig. 3 : Profil vertical de l'ozone mesuré depuis le sol

1. Distribution de l'ozone stratosphérique
1.1 Distribution verticale de l'ozone

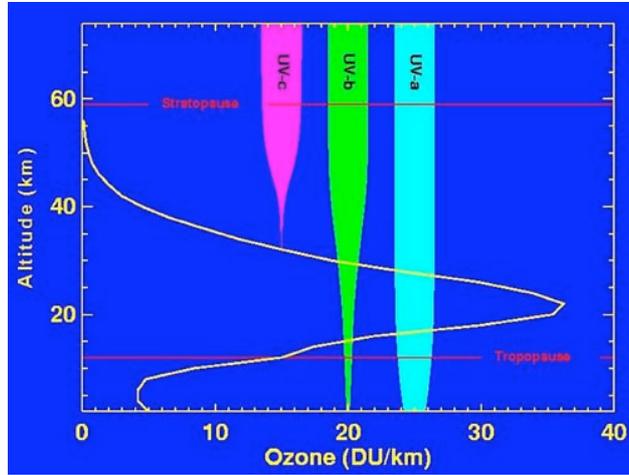


Fig. 4 : Pénétration du rayonnement UV dans l'atmosphère.

1. Distribution de l'ozone stratosphérique
1.1 Distribution verticale de l'ozone

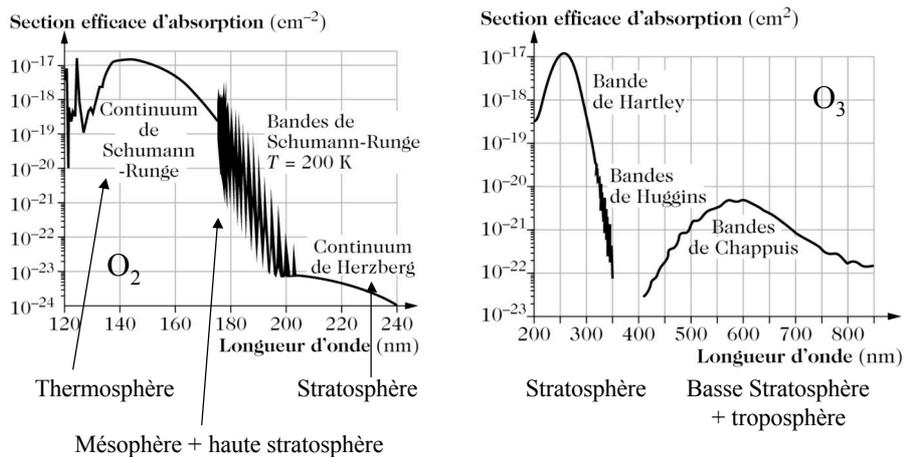


Fig. 4bis : Absorption par l'oxygène et l'ozone

1. Distribution de l'ozone stratosphérique
1.2 Le cycle de *Chapman*

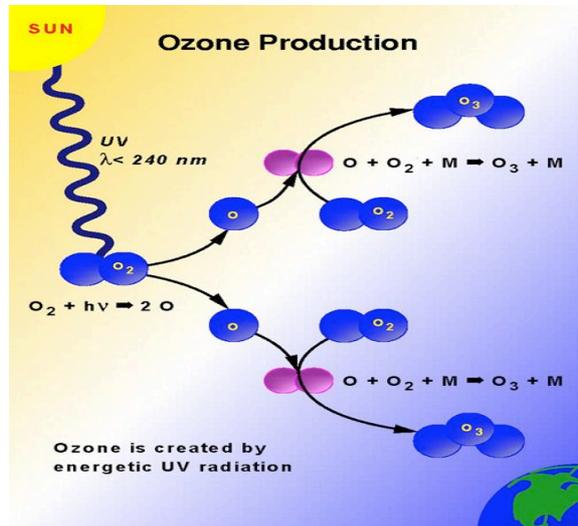


Fig. 5 : Schéma de production de l'ozone.

1. Distribution de l'ozone stratosphérique
1.2 Le cycle de *Chapman*

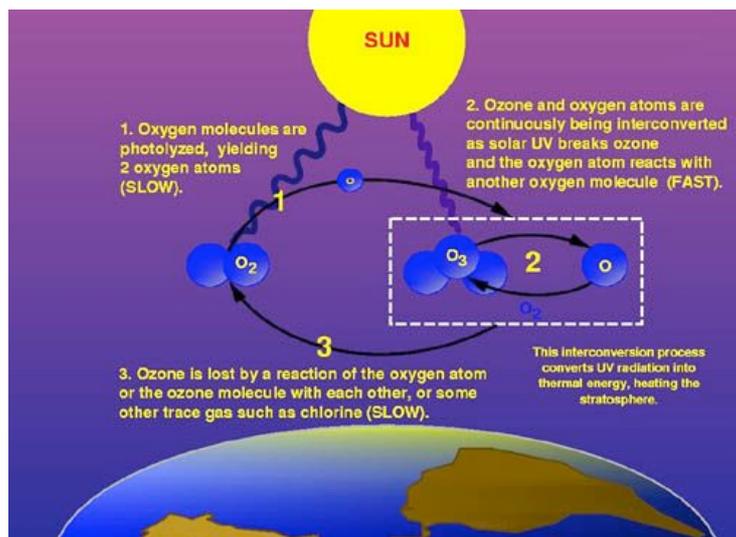


Fig. 6 : Schéma du cycle de *Chapman*.

1. Distribution de l'ozone stratosphérique
1.2 Le cycle de Chapman

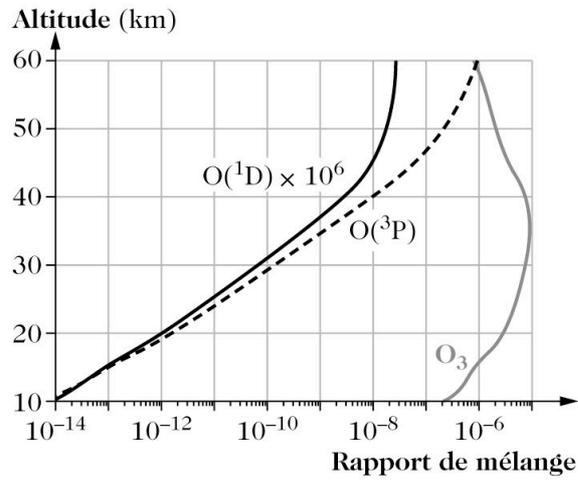


Fig. 6 : Profils verticaux des rapports de mélange des Ox.

1. Distribution de l'ozone stratosphérique
1.2 Le cycle de Chapman

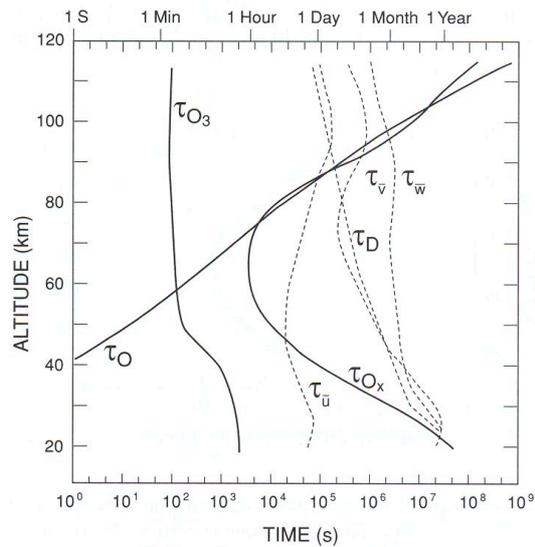


Fig. 7 : Temps de vie des composés de l'oxygène en fonction de l'altitude.

1. Distribution de l'ozone stratosphérique
1.2 Le cycle de Chapman

Cycle de Chapman dans les tropiques

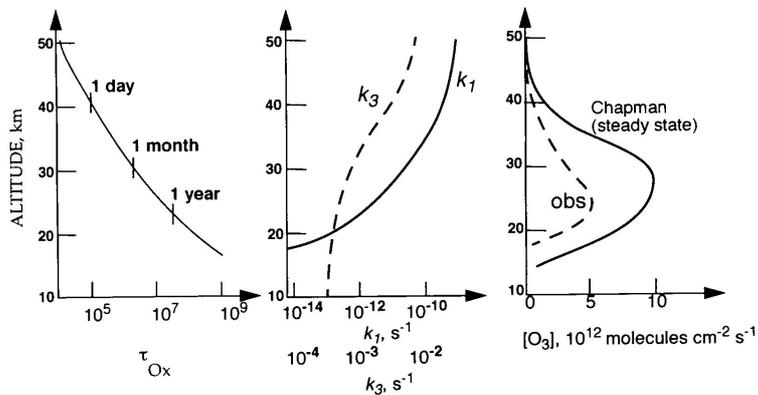


Figure 10-5 Chapman mechanism at low latitudes. Left panel: Lifetime of O_x . Center panel: O_2 and O_3 photolysis rate constants. Right panel: calculated and observed vertical profiles of O_3 concentrations.

Fig. 7bis : Temps de vie des composés de l'oxygène en fonction de l'altitude. *Jacob, introduction to Atmospheric Chemistry, 1999*

1. Distribution de l'ozone stratosphérique
1.3 Le rôle du transport atmosphérique

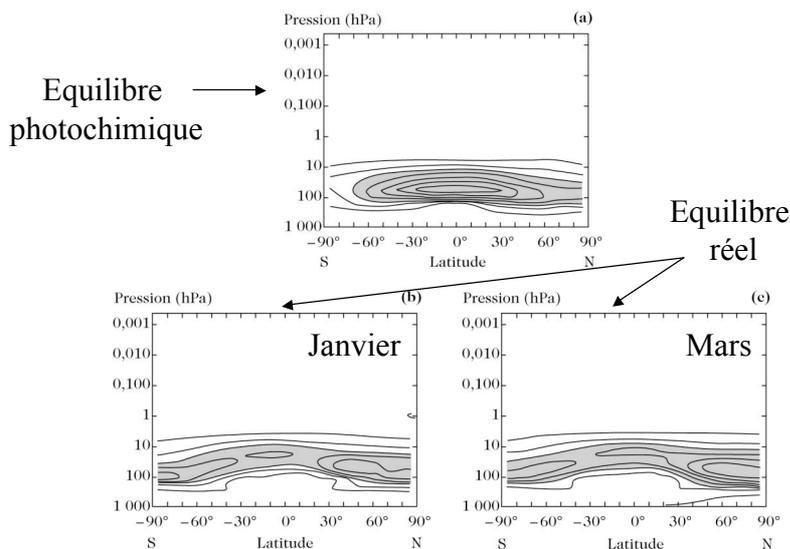
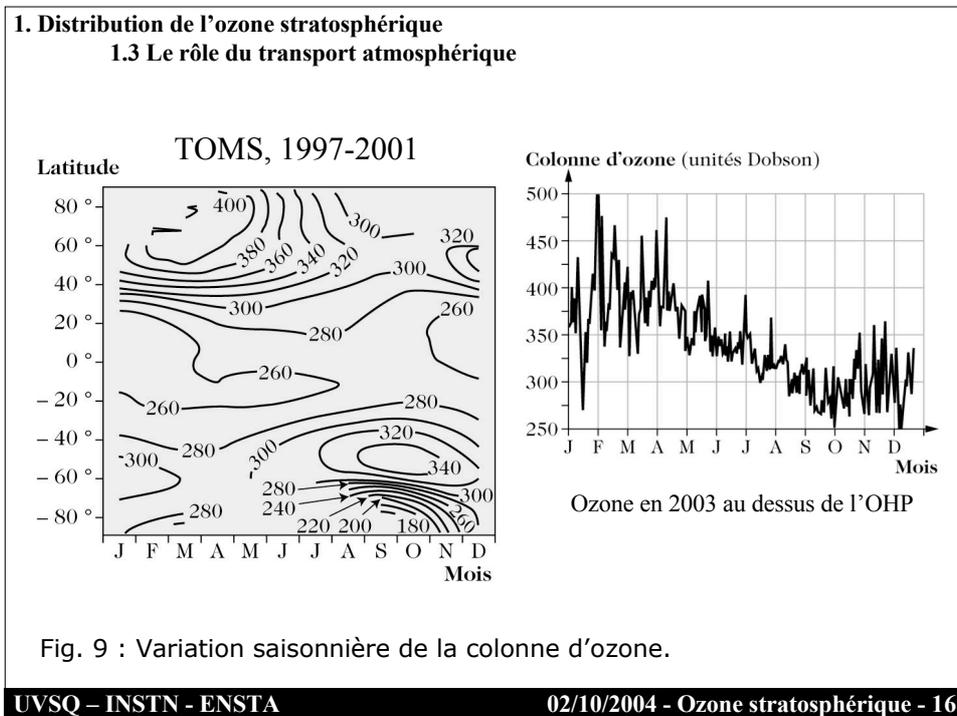
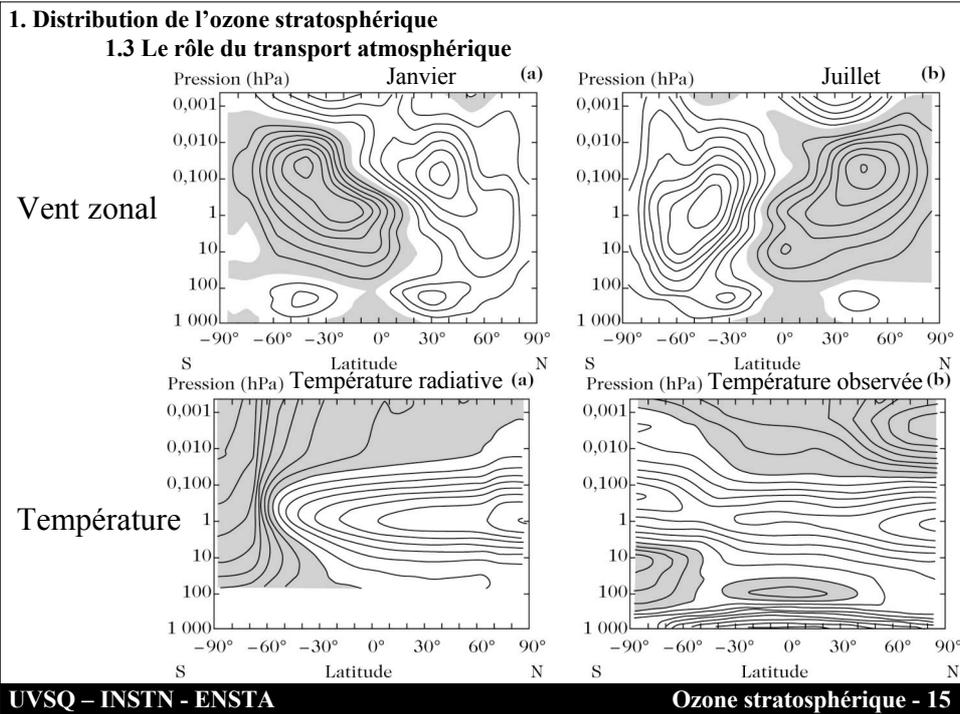


Fig. 8 : Coupe zonal de l'ozone stratosphérique. Gris $> 3 \times 10^{18} \text{ m}^{-2}$



1. Distribution de l'ozone stratosphérique
 1.3 Le rôle du transport atmosphérique

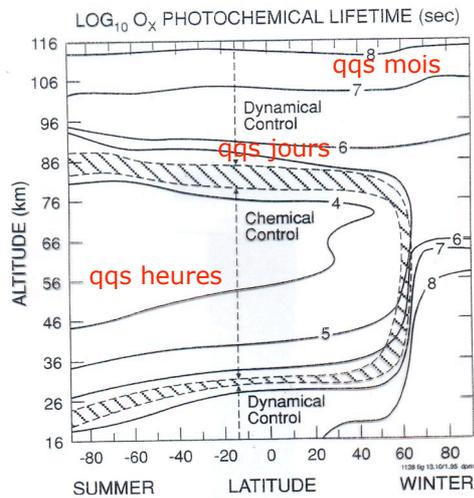
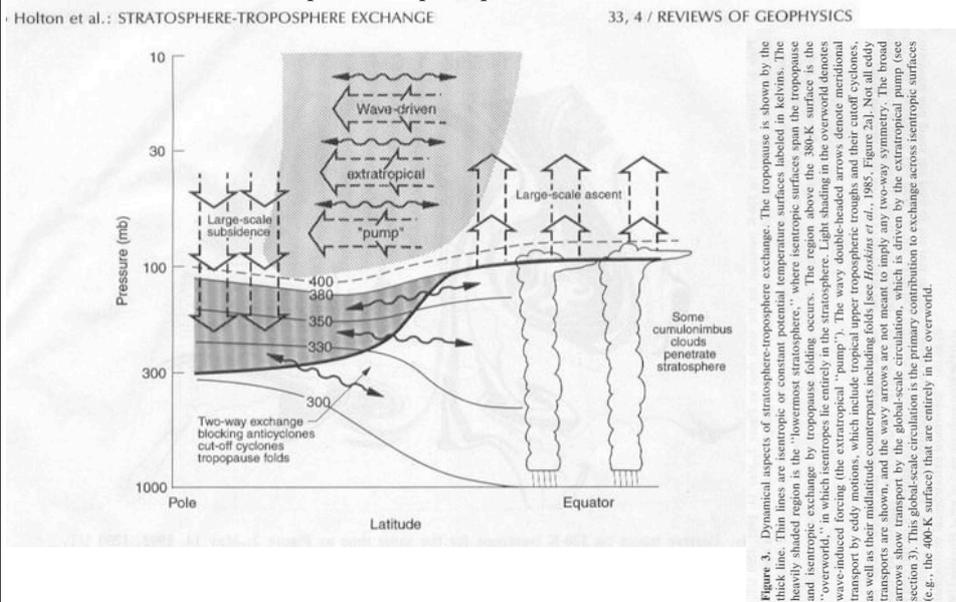


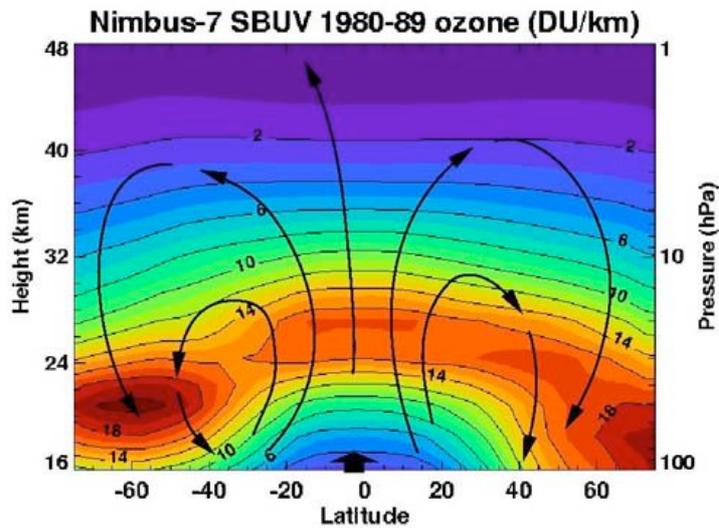
Fig. 10 : Régimes contrôlant l'ozone dans l'atmosphère.

1. Distribution de l'ozone stratosphérique
 1.3 Le rôle du transport atmosphérique



1. Distribution de l'ozone stratosphérique

1.3 Le rôle du transport atmosphérique



1 DU/km = $2,7 \times 10^{17}$ molécules d'O₃ /m³ = $2,1 \times 10^{-8}$ kg O₃ /m³.
Moyenne sur 10 ans des mesures effectuées par l'instrument SBUV porté par le satellite Nimbus 7. Les flèches schématisent la circulation stratosphérique (dite de « Brewer-Dobson »), extrêmement lente (~10 m/jour), qui transporte l'ozone de sa zone de production, les basses latitudes, vers les hautes latitudes.

Fig. 11 : Coupe zonale de l'ozone mesurée par SBUV.

1. Distribution de l'ozone stratosphérique

1.3 Le rôle du transport atmosphérique

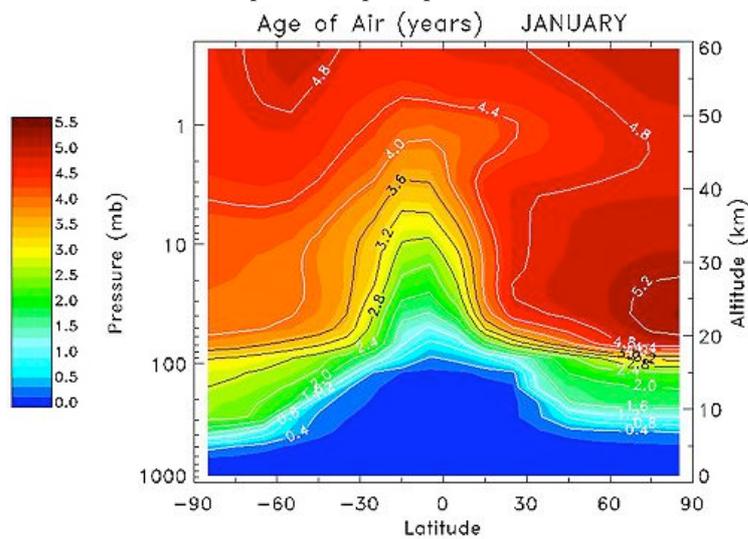


Fig. 12 : Age de l'air.

2. Cycles de destruction de l'ozone stratosphérique

2.1 Cycle de l'hydrogène, de l'azote, du chlore et du brome

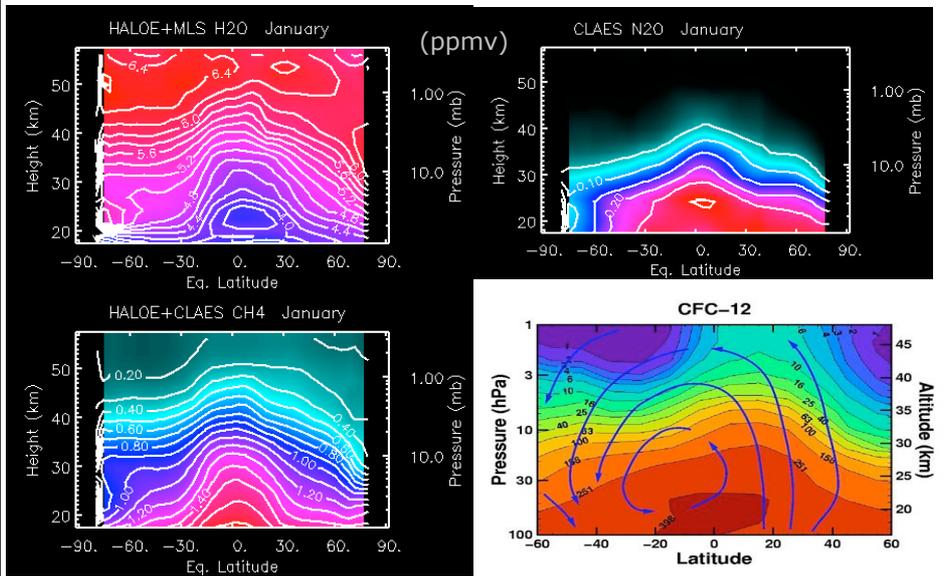


Fig. 13 : Coupe zonale de H_2O , CH_4 (HALOE), N_2O et CFC12 (CLAES)

UVSQ – INSTN - ENSTA

02/10/2004 - Ozone stratosphérique - 21

2. Cycles de destruction de l'ozone stratosphérique

2.4 Cycles catalytiques et Espèces réservoirs

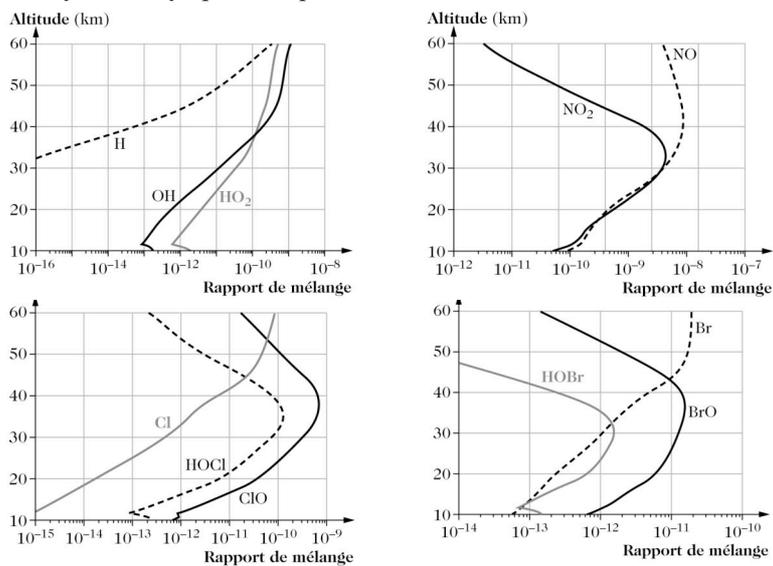


Fig. 17 : Espèces intervenant dans les cycles catalytiques

UVSQ – INSTN - ENSTA

Ozone stratosphérique - 22

2. Cycles de destruction de l'ozone stratosphérique
 2.4 Cycles catalytiques et Espèces réservoirs

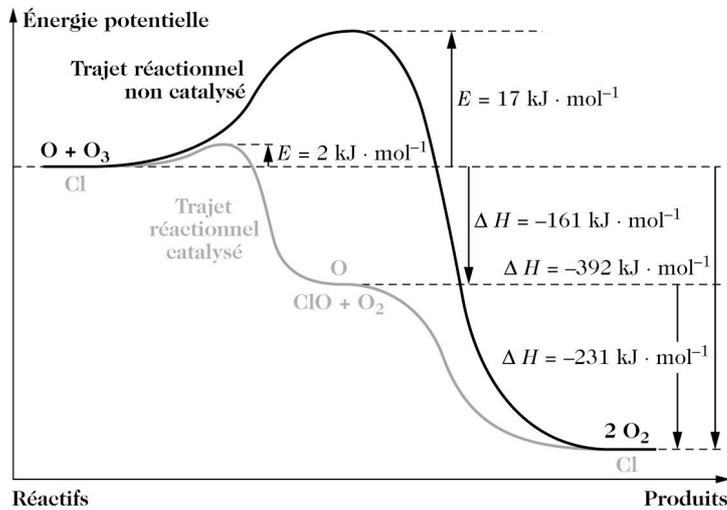


Fig. 17 : Variation d'énergie potentielle avec et sans catalyseurs

2. Cycles de destruction de l'ozone stratosphérique
 2.4 Cycles catalytiques et Espèces réservoirs

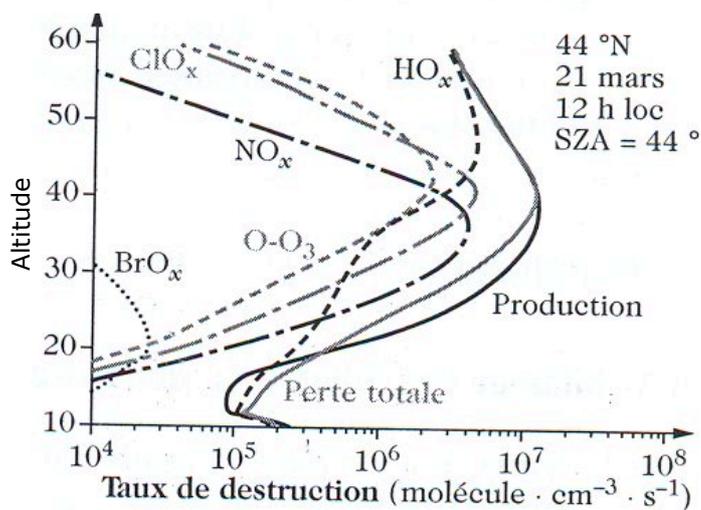


Fig. 17 : Distribution verticale du taux de destruction de l'ozone.

2. Cycles de destruction de l'ozone stratosphérique
2.4 Cycles catalytiques et Espèces réservoirs

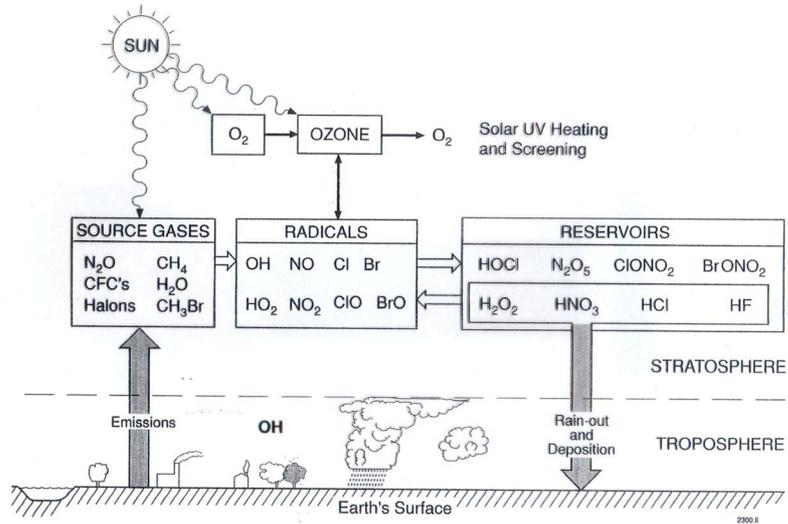


Fig. 18 : Schéma des processus de chimie dans la stratosphère.

3. L'ozone polaire

3.1 Le trou d'ozone Antarctique

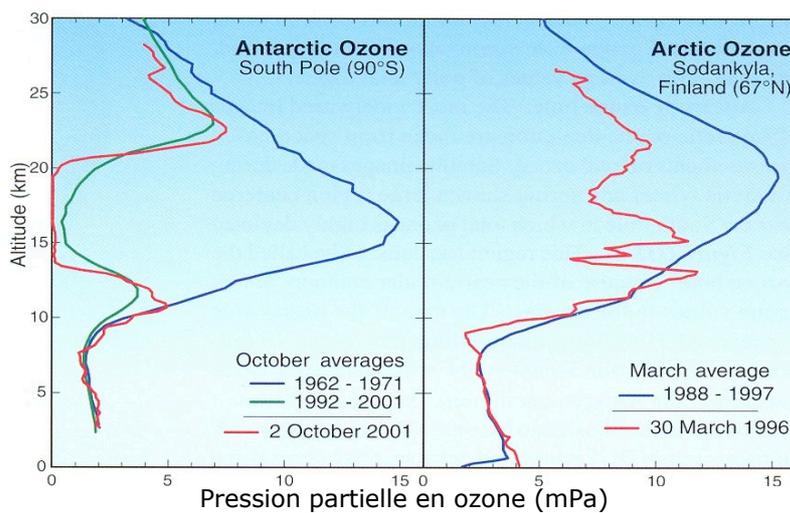


Fig. 19 : Profils d'ozone mesurés en Antarctique et Arctique.

3. L'ozone polaire

3.1 Le trou d'ozone Antarctique

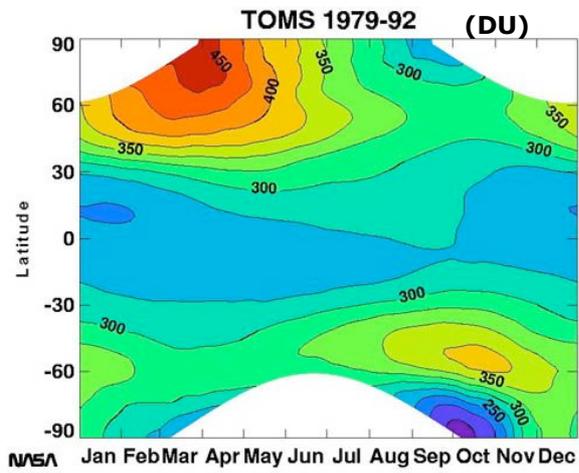


Fig. 20 : Variation saisonnière de la colonne d'ozone mesurée par TOMS.

3. L'ozone polaire

3.1 Le trou d'ozone Antarctique

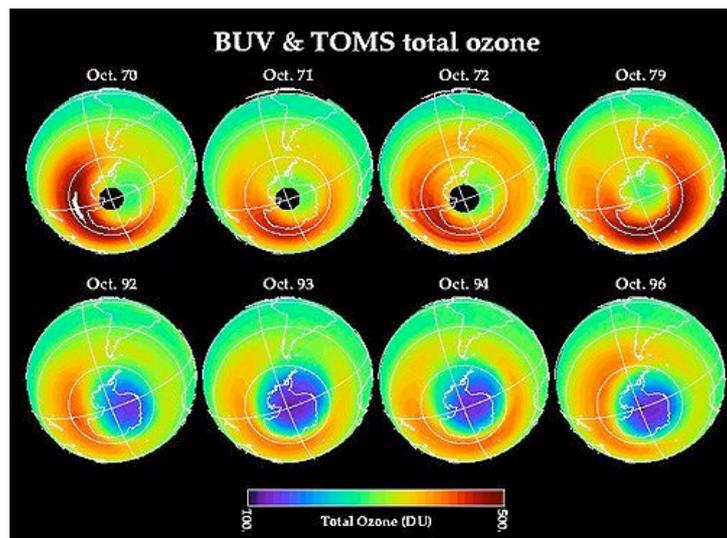


Fig. 21 : Colonne d'ozone mesurée dans les années 1970 et 1990.

3. L'ozone polaire

3.1 Le trou d'ozone Antarctique

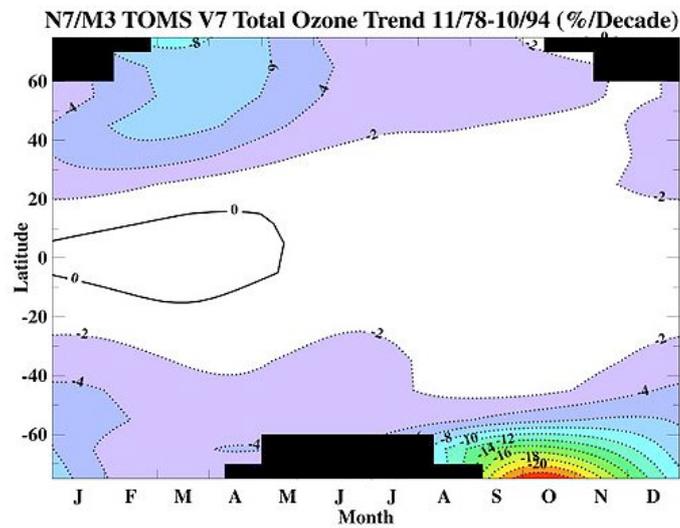


Fig. 22 : Tendence d'ozone mesurée par TOMS sur la période 1978-1994.

3. L'ozone polaire

3.1 Le trou d'ozone Antarctique

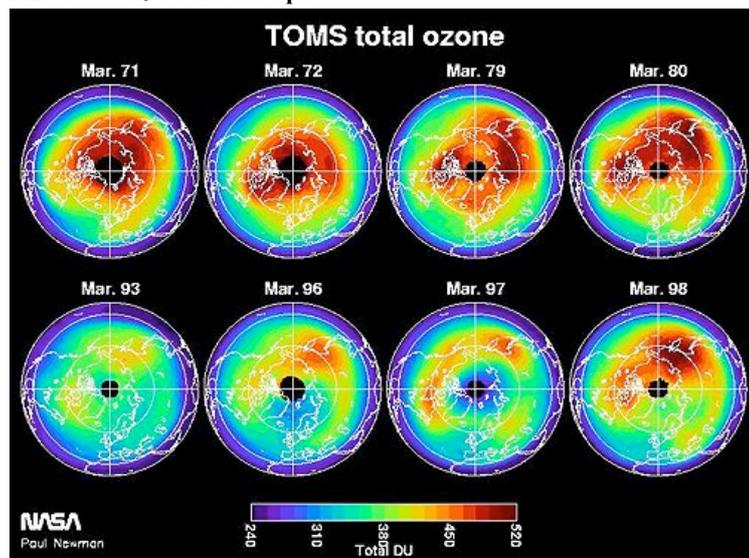


Fig. 23 : Colonne d'ozone mesurée par TOMS dans l'hémisphère nord.

3. L'ozone polaire

3.1 Le trou d'ozone Antarctique

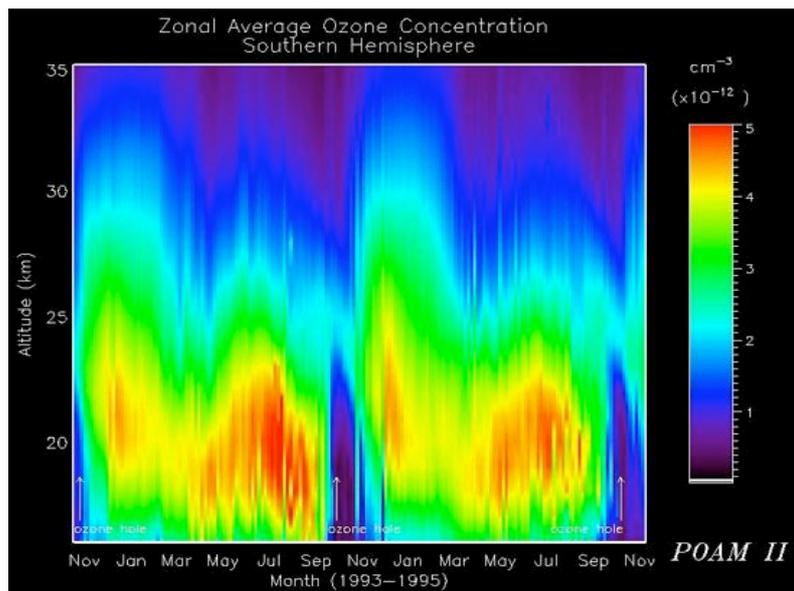


UVSQ – INSTN - ENSTA

Ozone stratosphérique - 31

3. L'ozone polaire

3.1 Le trou d'ozone Antarctique



Source : An Electronic book (see gfc.nasa.gov/edu/SEES/strat/class/S_class.htm)

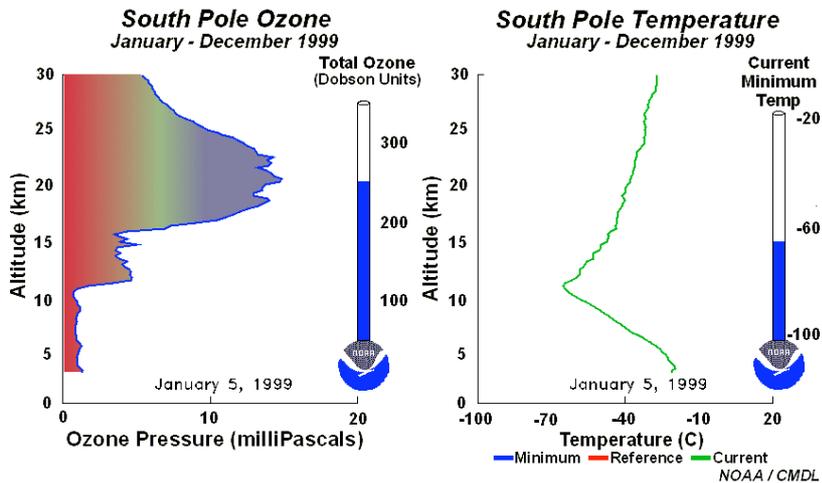
UVSQ – INSTN - ENSTA

Ozone stratosphérique - 32

3. L'ozone polaire

3.1 Le trou d'ozone Antarctique

Evolution du profil vertical d'ozone en 1999 (pôle sud)



Source : NOAA/CMDL

3. L'ozone polaire

3.1 Le trou d'ozone Antarctique

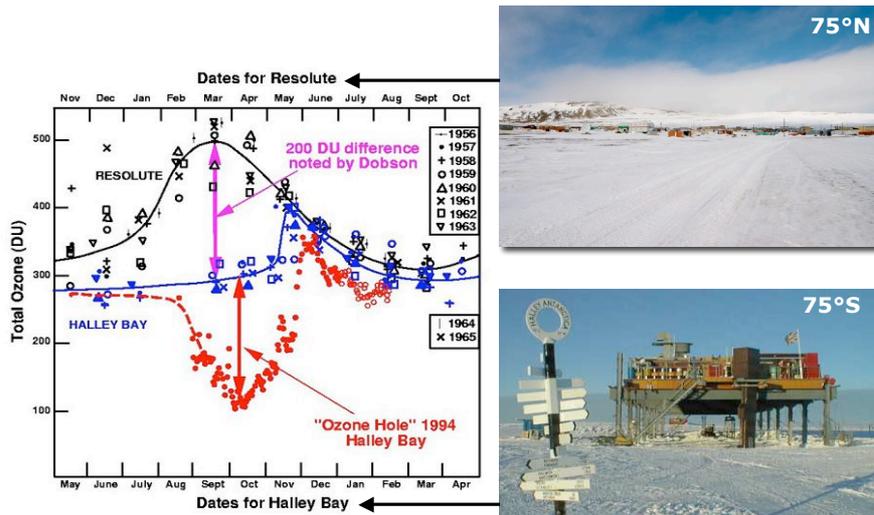


Fig. 24 : Evolution saisonnière de l'ozone total à Resolute et Halley Bay.

3. L'ozone polaire

3.2 Le rôle de la chimie hétérogène

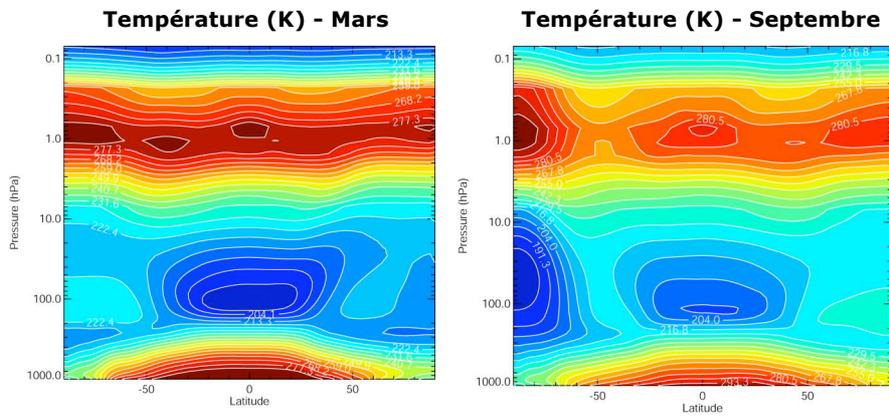


Fig. 25 : Coupe zonale de la température (K).

3. L'ozone polaire

3.2 Le rôle de la chimie hétérogène

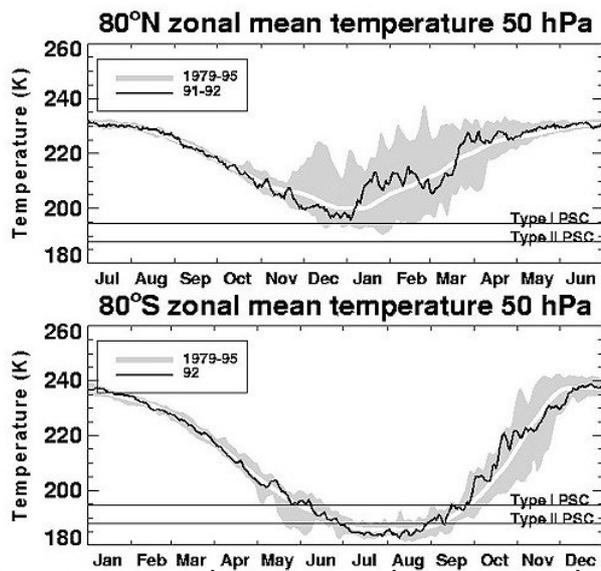


Fig. 26 : Evolution saisonnière de la température polaire à 50 hPa.

3. L'ozone polaire

3.2 Le rôle de la chimie hétérogène

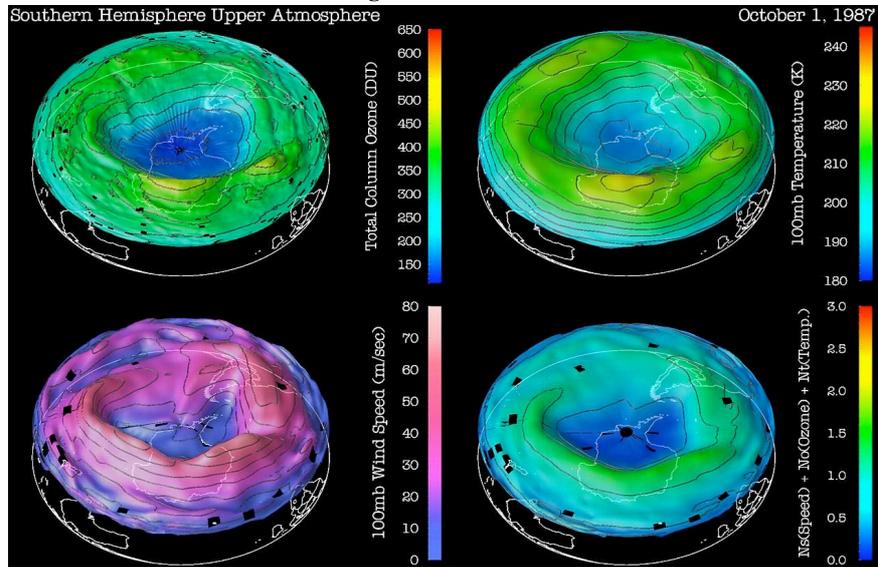


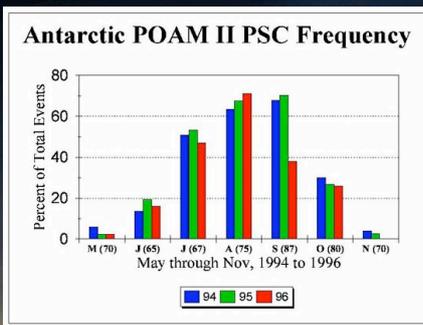
Fig. 27 : Le vortex polaire dans l'hémisphère sud.

UVSQ – INSTN - ENSTA

Ozone stratosphérique - 37

3. L'ozone polaire

3.2 Le rôle de la chimie hétérogène



Type I PSC:	Nitric acid trihydrate ($\text{HNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) Ternary solution (H_2O , H_2SO_4 , HNO_3)
Formation Temp:	195 K
Particle diameter:	1 μm
Altitudes:	10-24 km
Settling rates:	1km/30 days
Type II PSC:	Water Ice
Formation Temp:	188 K
Particle diameter:	> 10 μm
Altitudes:	10-24 km
Settling rates:	> 1.5 km/day

UVSQ – INSTN - ENSTA

Ozone stratosphérique - 38

3. L'ozone polaire

3.2 Le rôle de la chimie hétérogène

PSC :

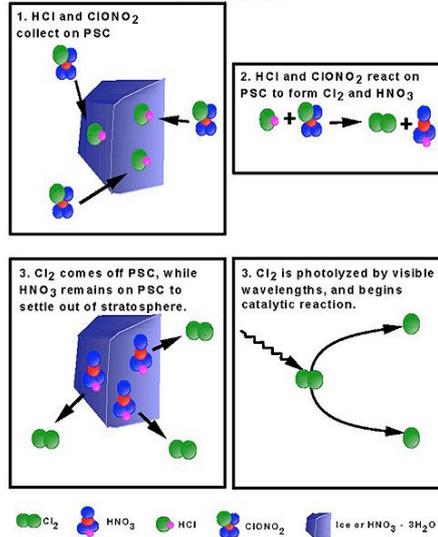
Libération de chlore actif Cl_2

Dénitrification de la stratosphère

\implies moins de ClONO_2

Fig. 29 : Réactions hétérogènes à la surface des nuages stratosphériques polaires.

Polar Stratospheric Cloud Surface Reaction



3. L'ozone polaire

3.2 Le rôle de la chimie hétérogène

Polar Ozone Destruction

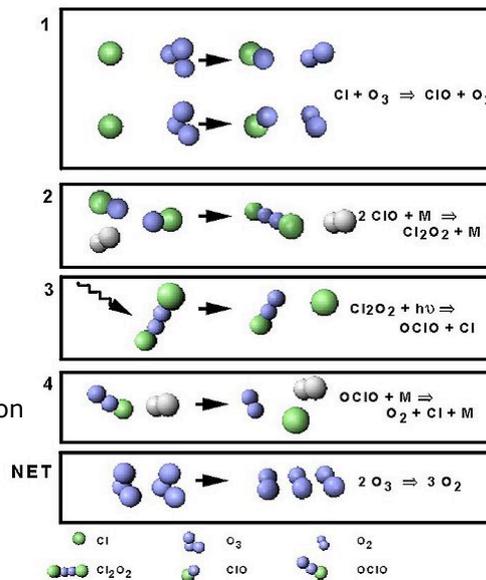


Fig. 30 : Cycle de destruction de l'ozone polaire.

3. L'ozone polaire

3.2 Le rôle de la chimie hétérogène

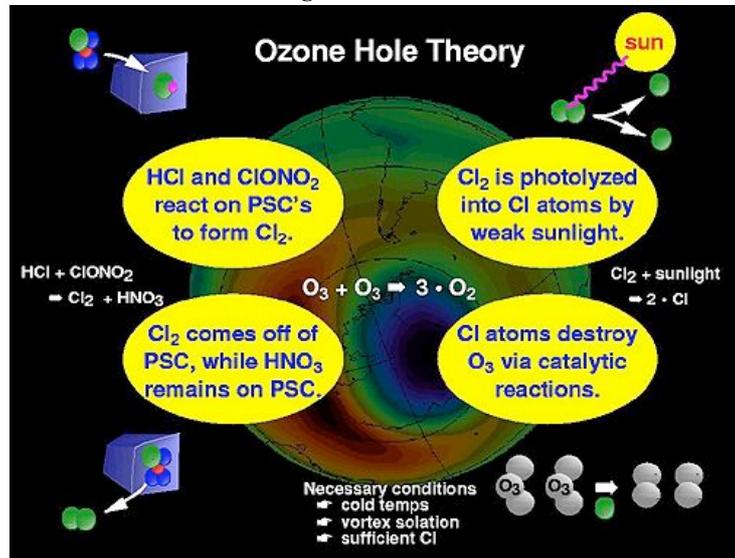


Fig. 31 : Schéma de la théorie de formation du trou d'ozone.

3. L'ozone polaire

3.2 Le rôle de la chimie hétérogène

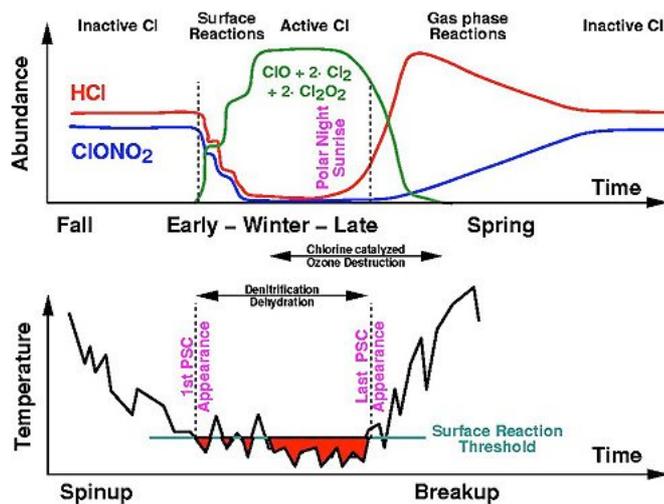
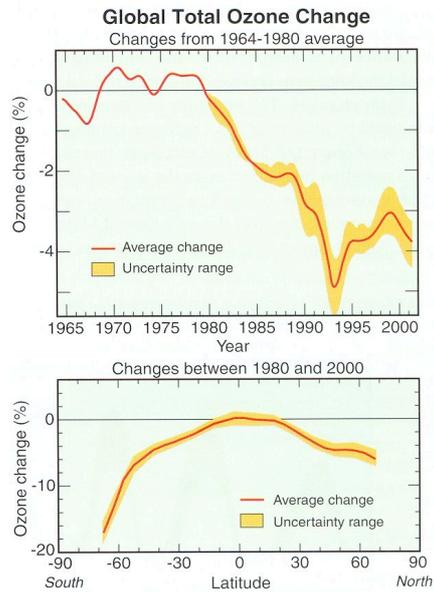


Fig. 32 : Evolution dans le temps de la destruction d'ozone polaire.

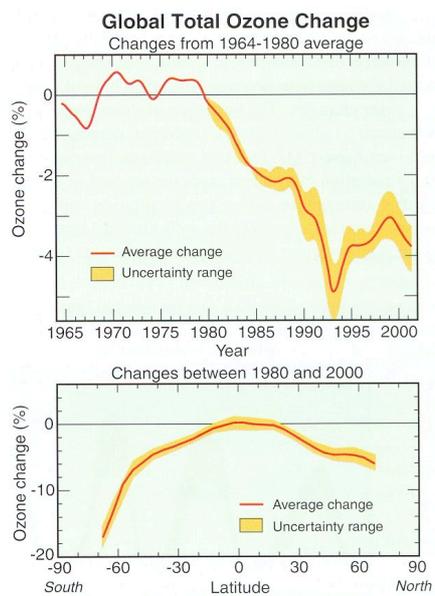
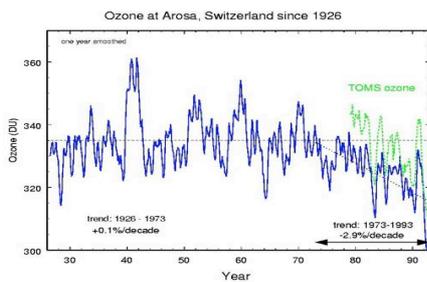
4. Evolution de la couche d'ozone
4.1 Evolution passée

Fig. 33 : Evolution de la colonne d'ozone depuis les années 1960.



4. Evolution de la couche d'ozone
4.1 Evolution passée

Fig. 33 : Evolution de la colonne d'ozone depuis les années 1960.



4. Evolution de la couche d'ozone

4.1 Evolution passée

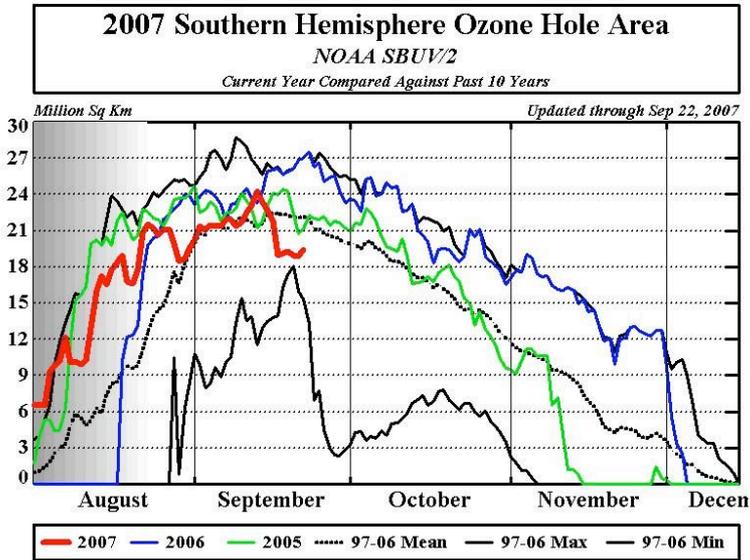


Fig. 34 : Superficie du trou d'ozone Antarctique.

4. Evolution de la couche d'ozone

4.1 Evolution passée

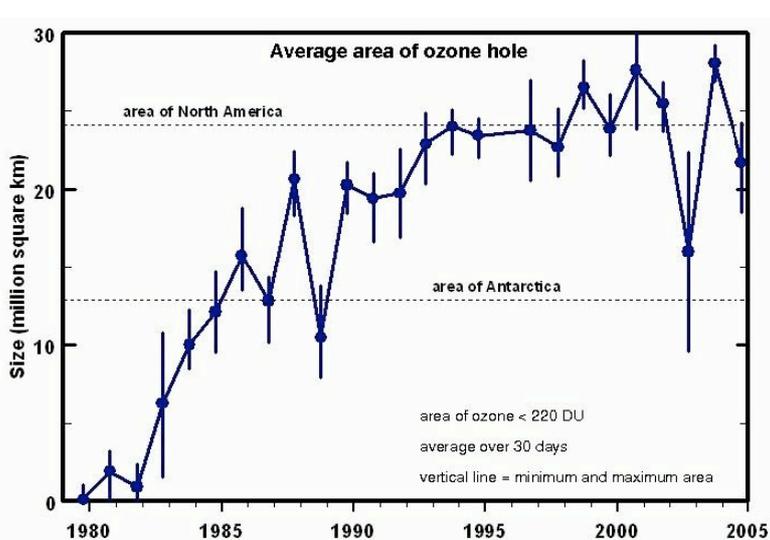
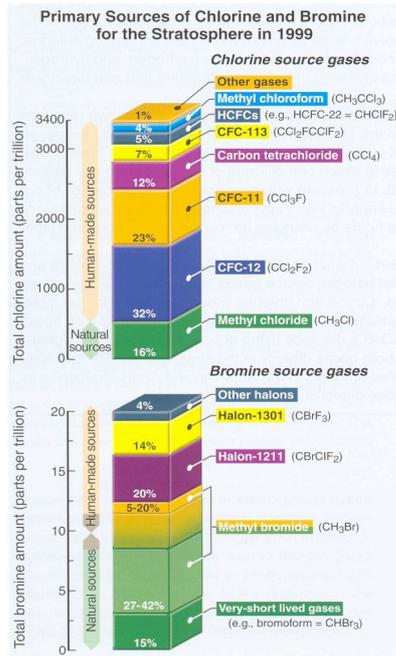


Fig. 34 : Superficie du trou d'ozone Antarctique.

4. Evolution de la couche d'ozone
4.1 Evolution passée

Fig. 35 : Principales sources de Cl et de Br dans la stratosphère.



4. Evolution de la couche d'ozone
4.1 Evolution passée

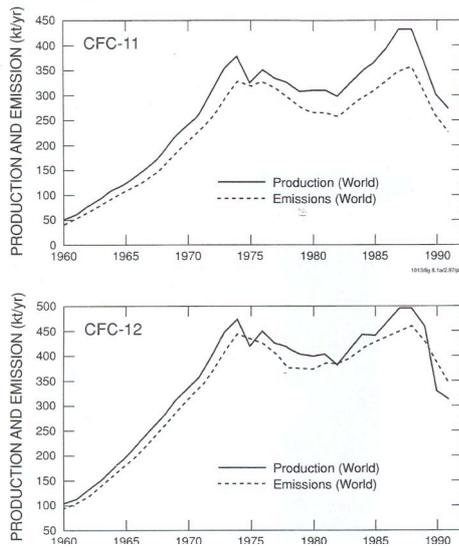
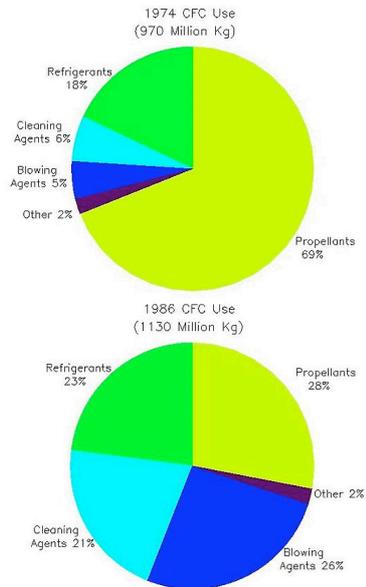


Fig. 36 : Emissions de CFC11 et CFC12.



4. Evolution de la couche d'ozone

4.1 Evolution passée

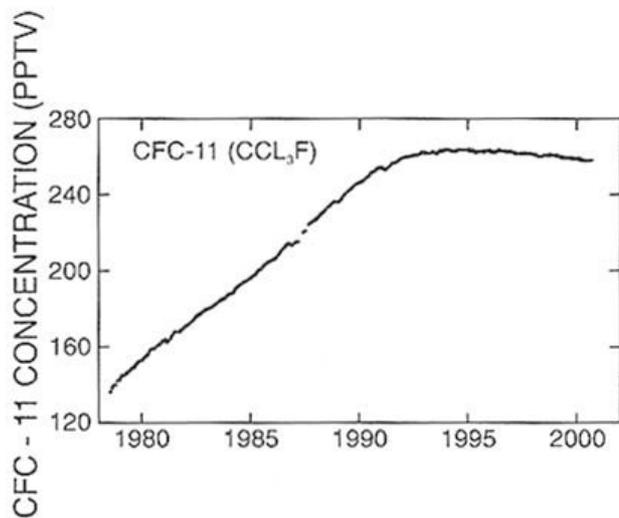


Fig. 37 : Augmentation du CFC11 dans l'atmosphère.

4. Evolution de la couche d'ozone

4.2 Evolution future

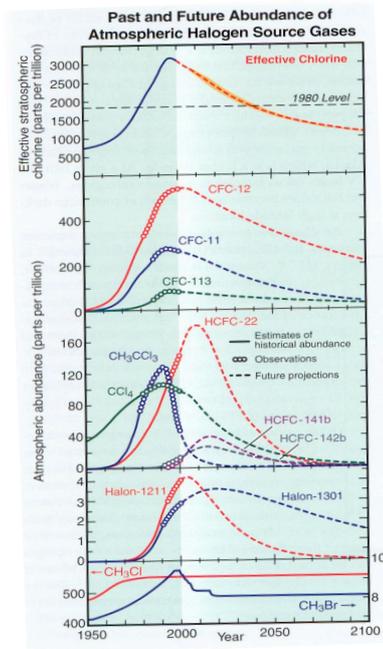
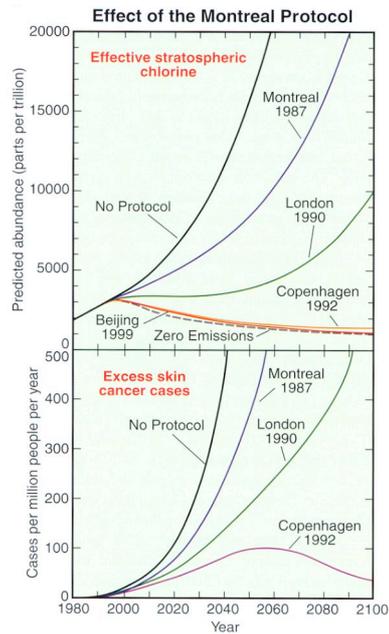


Fig. 38 : Evolution du contenu en chlore dans la stratosphère.

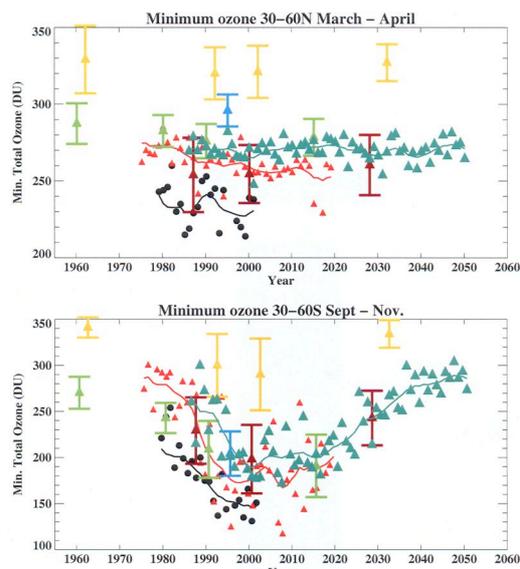
4. Evolution de la couche d'ozone
4.2 Evolution future

Fig. 39 : Evolution du contenu en chlore dans la stratosphère : le rôle du protocole de Montréal.



4. Evolution de la couche d'ozone
4.2 Evolution future

Fig. 40 : Modélisation de l'évolution future de l'ozone total.



4. Evolution de la couche d'ozone
4.3 Les conséquences pour l'environnement

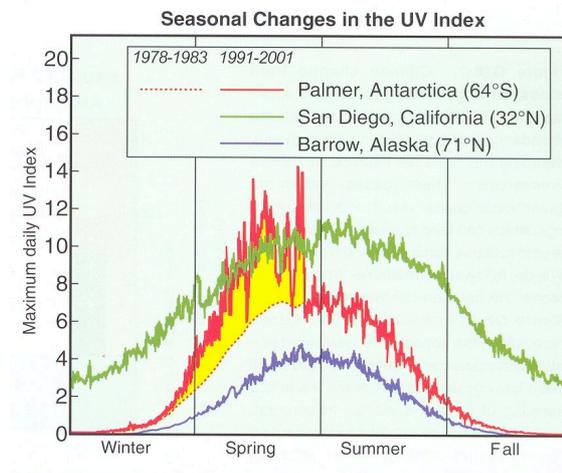


Fig. 41 : Rayonnement UV à la surface.

4. Evolution de la couche d'ozone
4.2 Evolution future

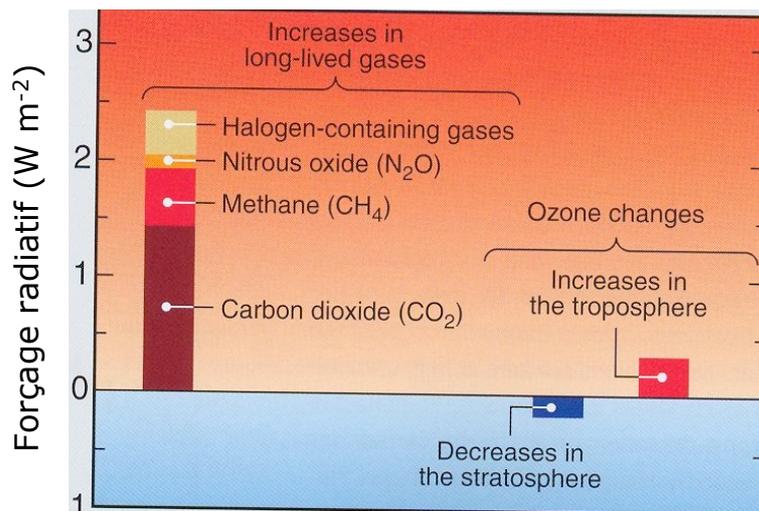


Fig. 42 : Forçages radiatifs depuis le préindustriel.