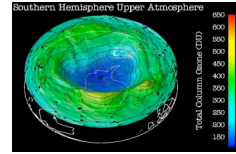
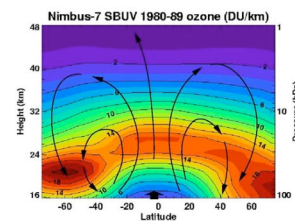


## 2. L'ozone stratosphérique



### 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

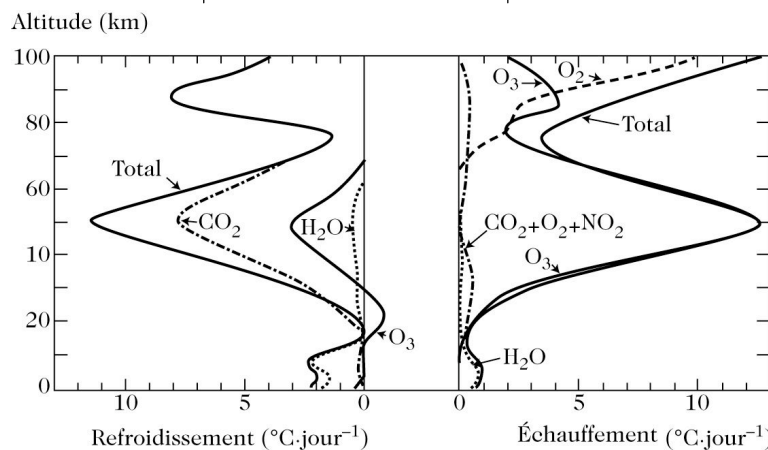


Fig. 1 : Taux d'échauffement et de refroidissement de la stratosphère

UVSQ – INSTN - ENSTA

Ozone stratosphérique - 2

## 1. Distribution de l'ozone stratosphérique

### 1.1 Distribution verticale de l'ozone

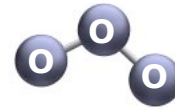
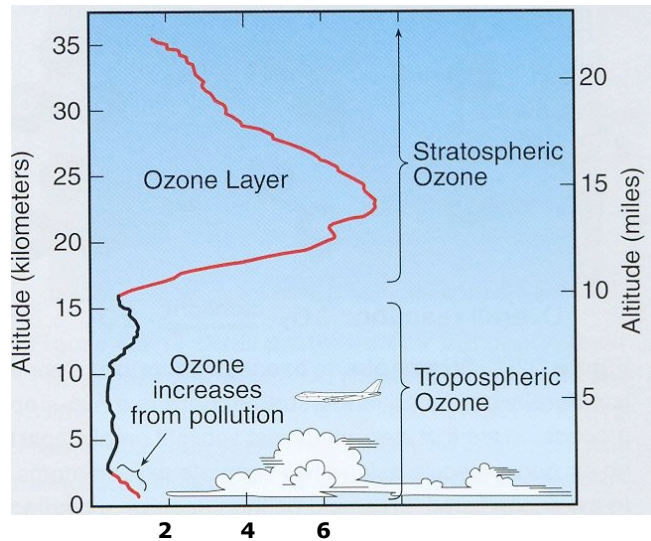


Fig. 1 : Profil vertical de l'ozone dans l'atmosphère ( $10^{12}$  molec.  $\text{cm}^{-3}$ ).

UVSQ – INSTN - ENSTA

Ozone stratosphérique - 3

## 1. Distribution de l'ozone stratosphérique

### 1.1 Distribution de l'ozone stratosphérique

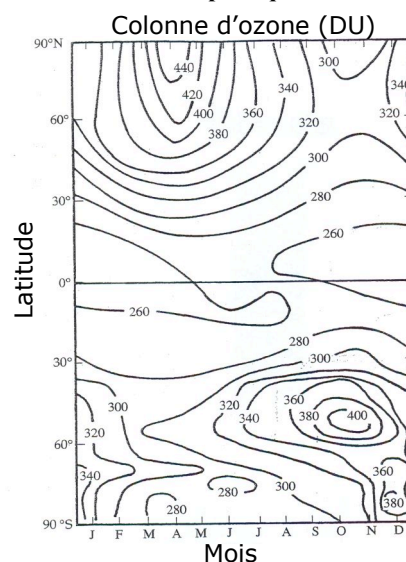


Fig. 1 : Variation saisonnière de la colonne d'ozone avant les années 1980.

UVSQ – INSTN - ENSTA

02/10/2004 - Ozone stratosphérique - 4

## 1. Distribution de l'ozone stratosphérique

### 1.1 Distribution verticale de l'ozone

#### SAGE O<sub>3</sub> Profile 940911 (40°S, 105°E)

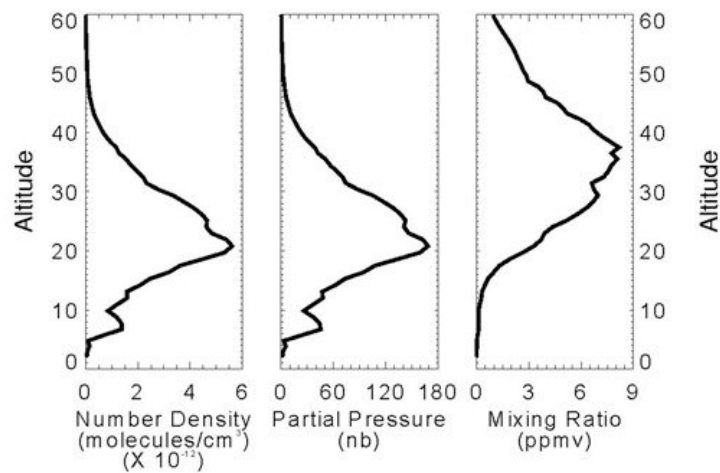


Fig. 2 : Profil vertical de l'ozone mesuré par SAGE.

UVSQ – INSTN - ENSTA

Ozone stratosphérique - 5

## 1. Distribution de l'ozone stratosphérique

### 1.1 Distribution verticale de l'ozone

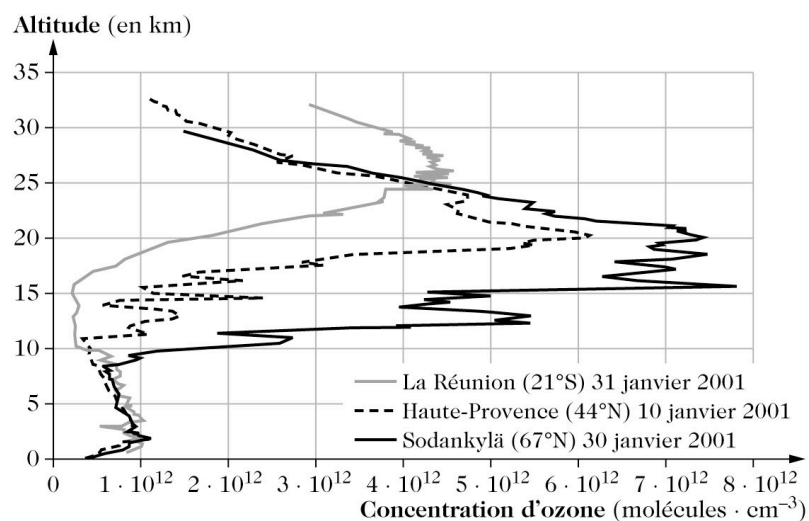


Fig. 3 : Profil vertical de l'ozone mesuré depuis le sol

UVSQ – INSTN - ENSTA

Ozone stratosphérique - 6

## 1. Distribution de l'ozone stratosphérique

### 1.1 Distribution verticale de l'ozone

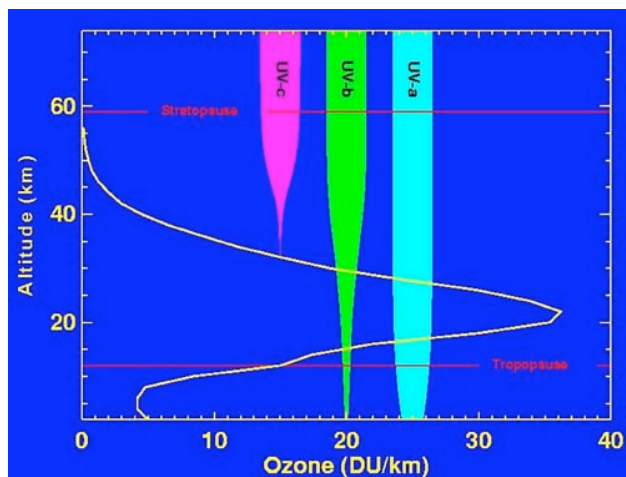


Fig. 4 : Pénétration du rayonnement UV dans l'atmosphère.

UVSQ – INSTN - ENSTA

Ozone stratosphérique - 7

## 1. Distribution de l'ozone stratosphérique

### 1.1 Distribution verticale de l'ozone

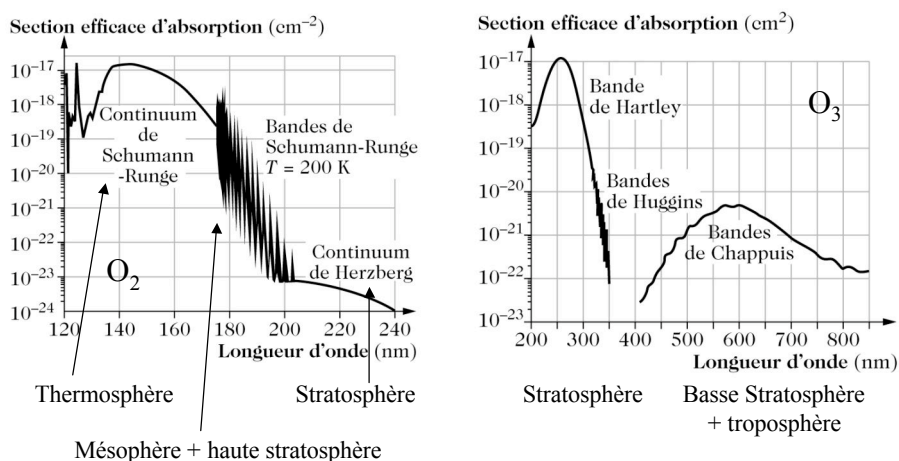


Fig. 4bis : Absorption par l'oxygène et l'ozone

UVSQ – INSTN - ENSTA

Ozone stratosphérique - 8

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

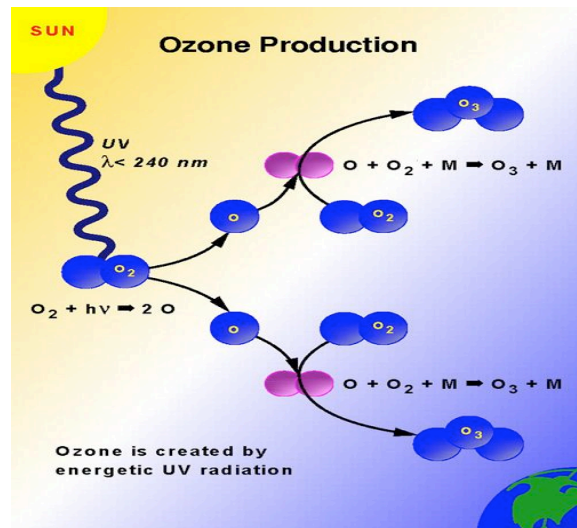


Fig. 5 : Schéma de production de l'ozone.

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

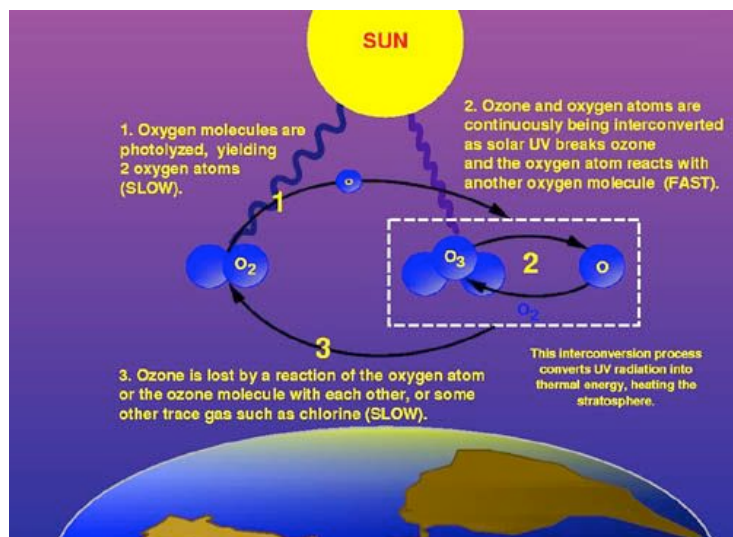


Fig. 6 : Schéma du cycle de *Chapman*.

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

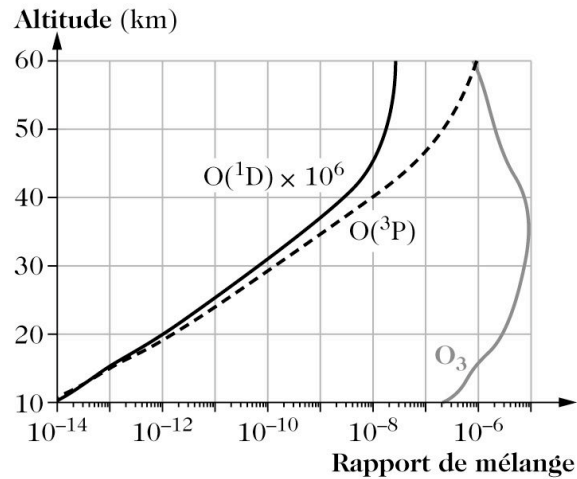


Fig. 6 : Profils verticaux des rapports de mélange des Ox.

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

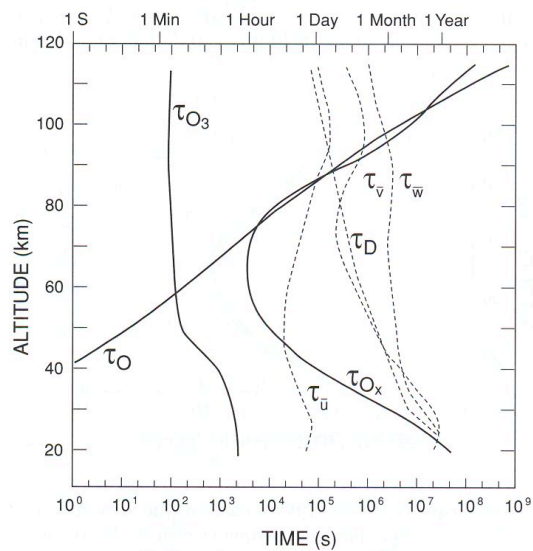


Fig. 7 : Temps de vie des composés de l'oxygène en fonction de l'altitude.

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

### Cycle de Chapman dans les tropiques

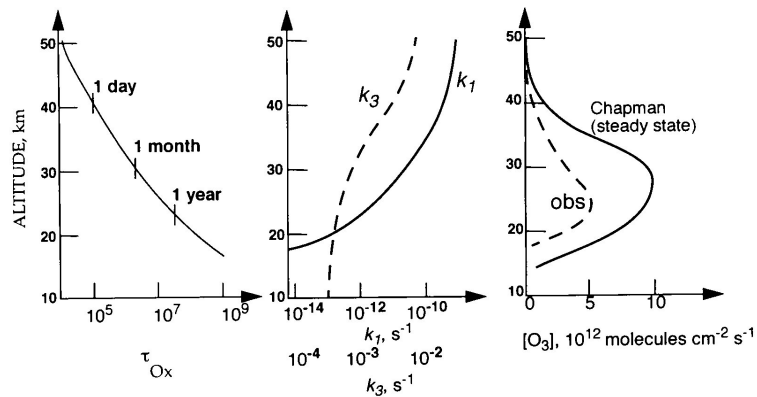


Figure 10-5 Chapman mechanism at low latitudes. Left panel: Lifetime of  $O_x$ . Center panel:  $O_2$  and  $O_3$  photolysis rate constants. Right panel: calculated and observed vertical profiles of  $O_3$  concentrations.

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

Jacob, introduction to Atmospheric Chemistry, 1999

UVSQ – INSTN – ENSTA

Ozone stratosphérique - 13

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

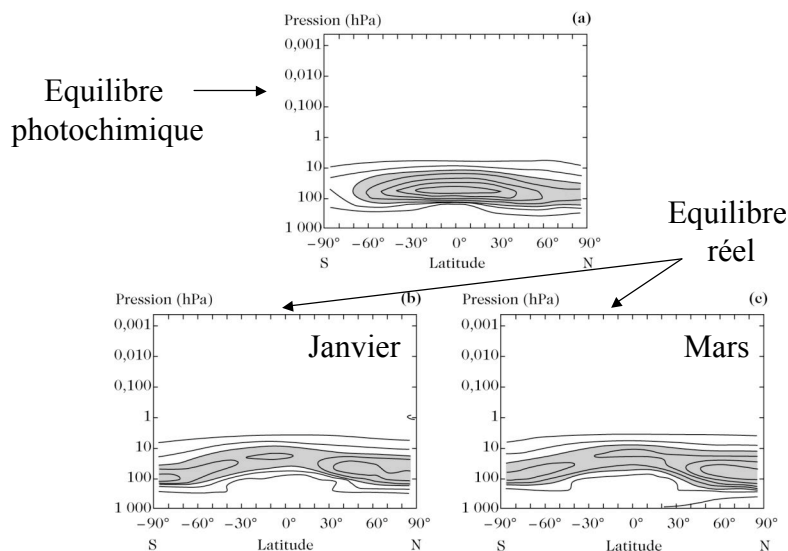


Fig. 8 : Coupe zonal de l'ozone stratosphérique.

Grisé  $> 3e18 \text{ m}^{-2}$

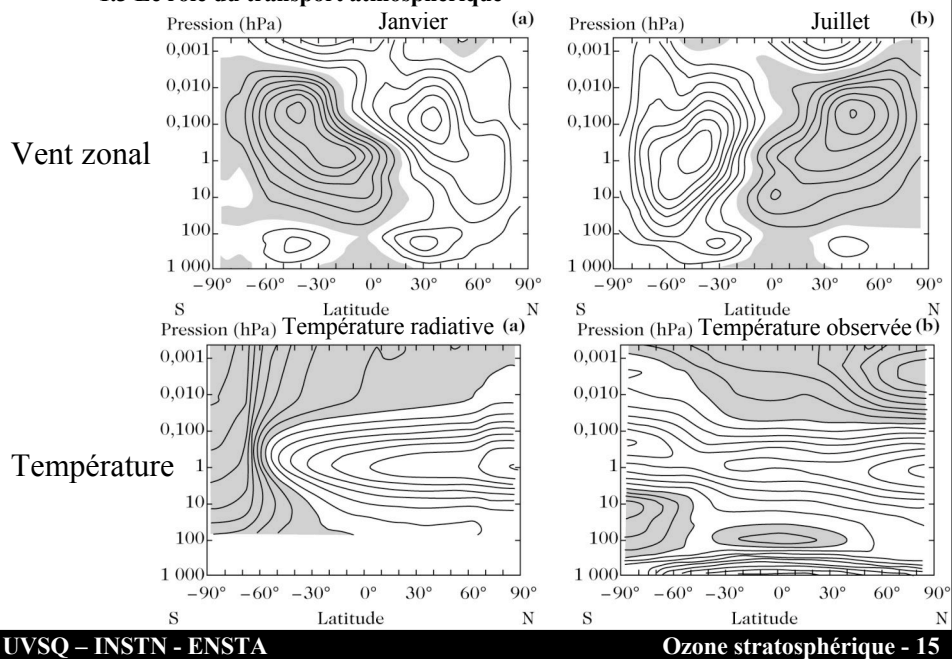
UVSQ – INSTN – ENSTA

Ozone stratosphérique - 14



## 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

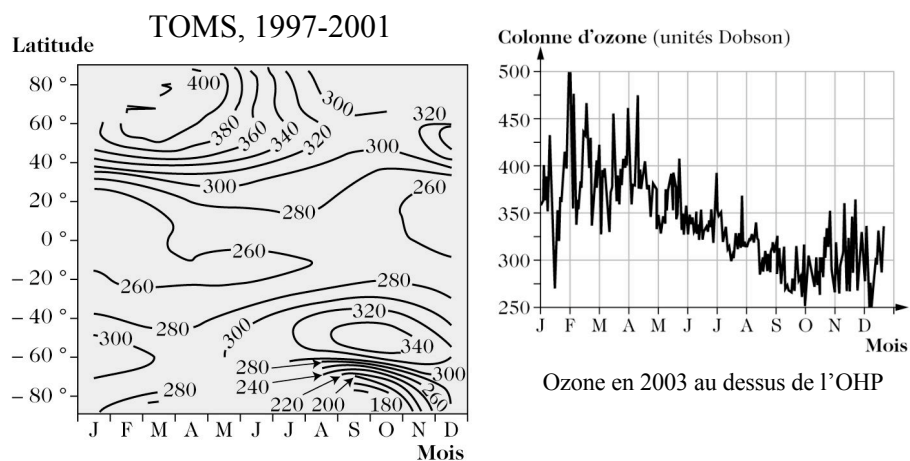


Fig. 9 : Variation saisonnière de la colonne d'ozone.



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

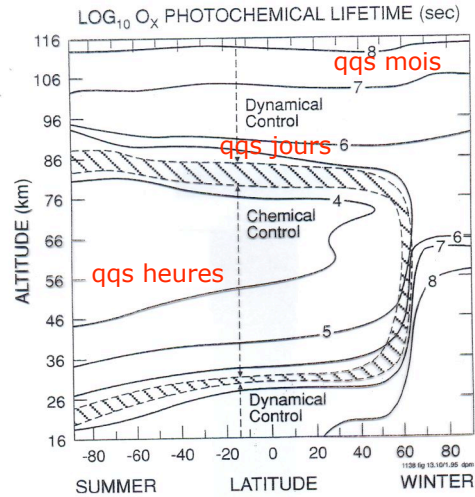


Fig. 10 : Régimes contrôlant l'ozone dans l'atmosphère.

UVSQ – INSTN - ENSTA

Ozone stratosphérique - 17

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

Holton et al.: STRATOSPHERE-TROPOSPHERE EXCHANGE

33, 4 / REVIEWS OF GEOPHYSICS

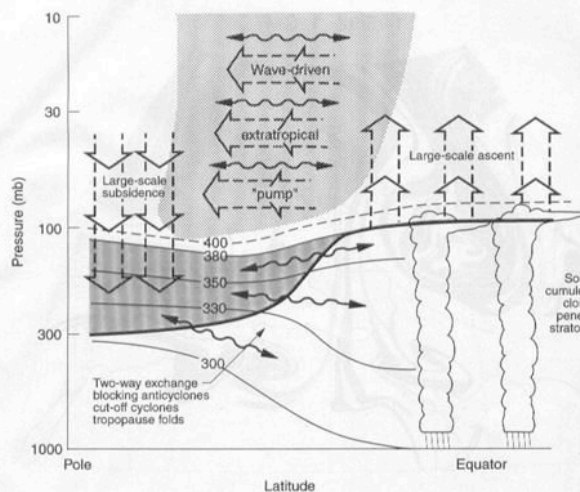


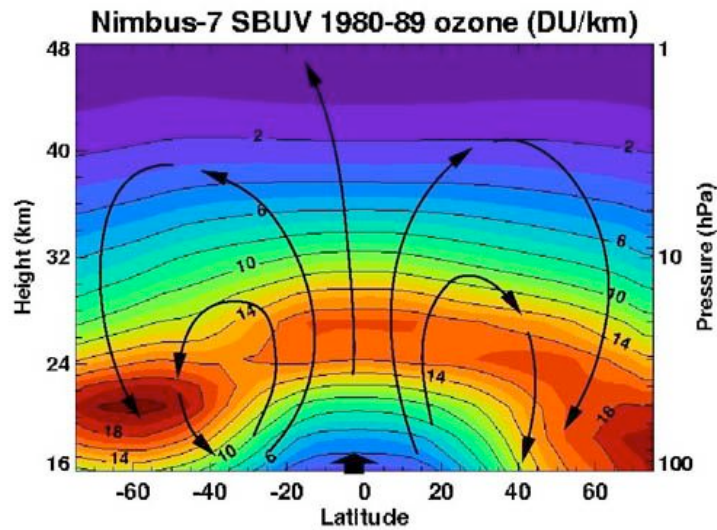
Figure 3. Dynamical aspects of stratosphere-troposphere exchange. The tropopause is shown by the thick line. Thin lines are isentropic or constant potential temperature surfaces labeled in kelvins. The heavily shaded region is the "lowermost stratosphere," where isentropic surfaces span the tropopause and isentropic exchange by tropopause folding occurs. The region above the 380-K surface is the "overworld," in which isentropes lie entirely in the stratosphere. Light shading in the overworld denotes wave-induced forcing (the extratropical "pump"). The wavy double-headed arrows denote meridional transport by eddy motions, which include tropical upper tropospheric troughs and their cutoff cyclones, as well as their midlatitude counterparts including folds (see Hoskins et al., 1985, Figure 2a). Not all eddy transports are shown, and the wavy arrows are not meant to imply any two-way symmetry. The broad arrows show transport by the global-scale circulation, which is driven by the extratropical pump (see section 5). Large-scale circulation is the primary contribution to exchange across isentropic surfaces (e.g., the 400-K surface) that are entirely in the overworld.

UVSQ – INSTN - ENSTA

Ozone stratosphérique - 18

## 1. Distribution de l'ozone stratosphérique

### 1.3 Le rôle du transport atmosphérique



1 DU/km =  $2,7 \times 10^{17}$  molécules d'O<sub>3</sub> /m<sup>3</sup> =  $2,1 \times 10^{-8}$  kg O<sub>3</sub> /m<sup>3</sup>.  
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.

UVSQ – INSTN - ENSTA

Ozone stratosphérique - 19

## 1. Distribution de l'ozone stratosphérique

### 1.3 Le rôle du transport atmosphérique

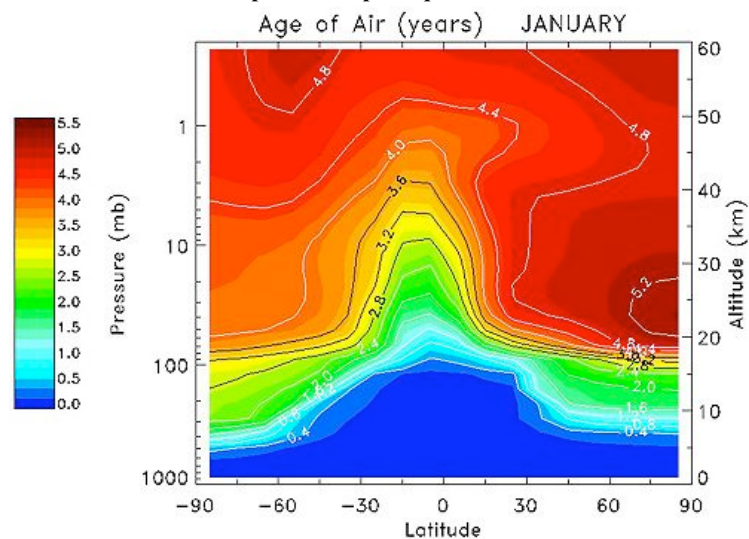


Fig. 12 : Age de l'air.

UVSQ – INSTN - ENSTA

Ozone stratosphérique - 20

## 2. Cycles de destruction de l'ozone stratosphérique

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

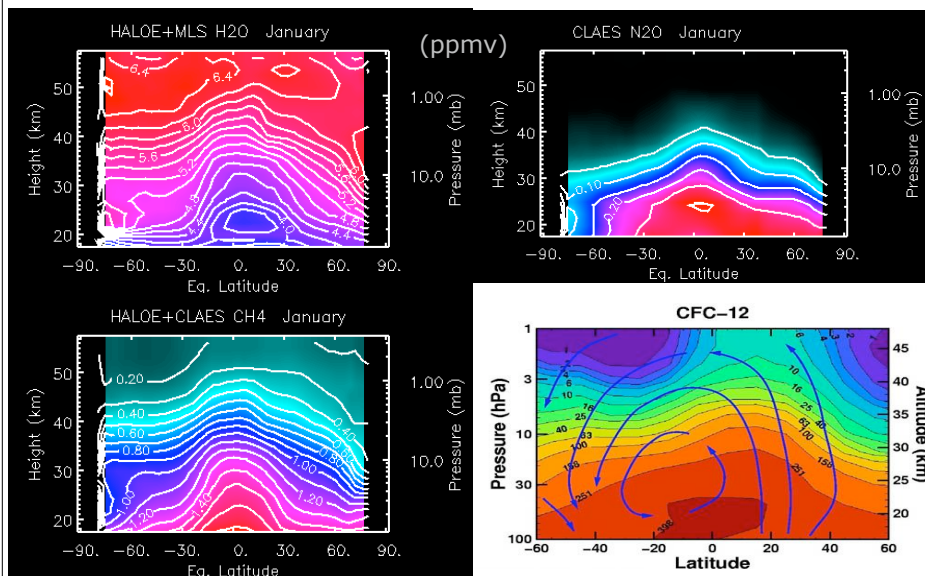


Fig. 13 : Coupe zonale de  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$  (HALOE),  $\text{N}_2\text{O}$  et CFC12 (CLAES)

UVSQ – INSTN - ENSTA

02/10/2004 - Ozone stratosphérique - 21

## 2. Cycles de destruction de l'ozone stratosphérique

### 2.4 Cycles catalytiques et Espèces réservoirs

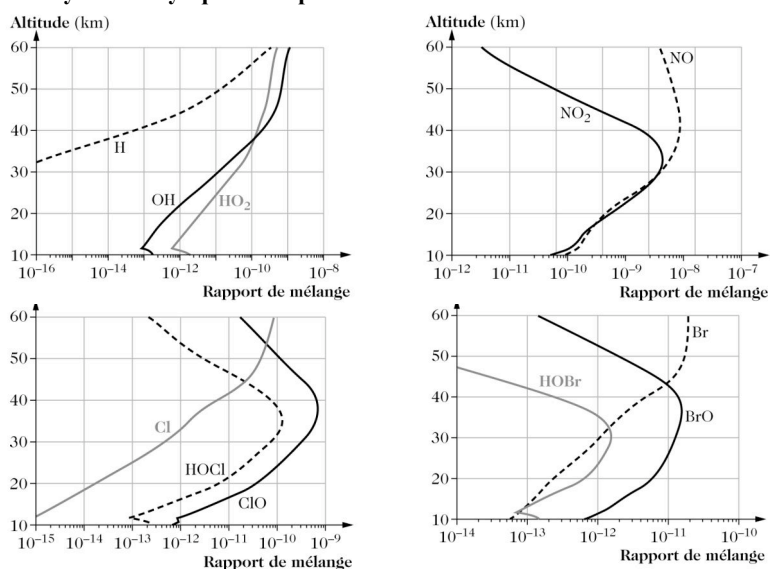


Fig. 17 : Espèces intervenant dans les cycles catalytiques

UVSQ – INSTN - ENSTA

Ozone stratosphérique - 22

## 2. Cycles de destruction de l'ozone stratosphérique

### 2.4 Cycles catalytiques et Espèces réservoirs

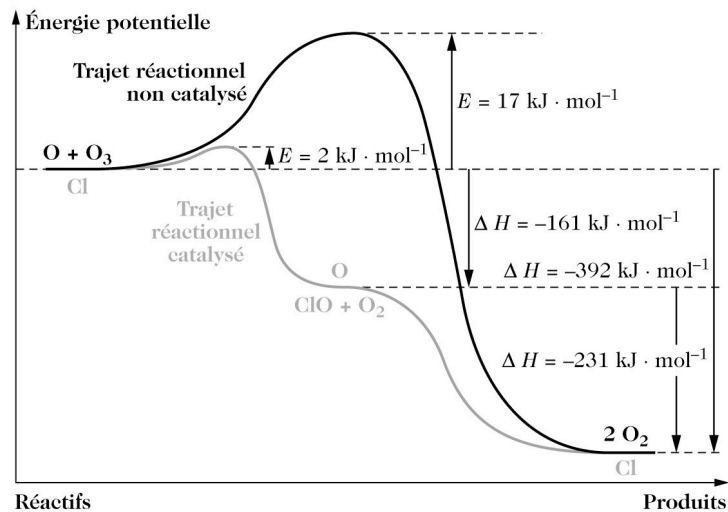


Fig. 17 : Variation d'énergie potentielle avec et sans catalyseurs

## 2. Cycles de destruction de l'ozone stratosphérique

### 2.4 Cycles catalytiques et Espèces réservoirs

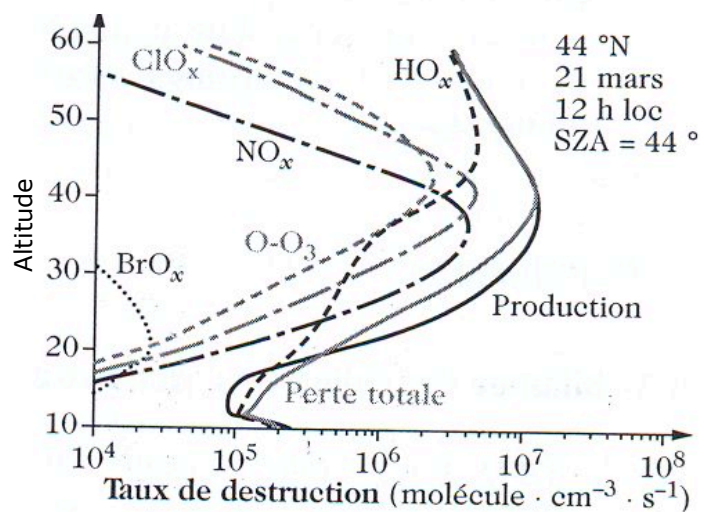


Fig. 17 : Distribution verticale du taux de destruction de l'ozone.

## 2. Cycles de destruction de l'ozone stratosphérique

### 2.4 Cycles catalytiques et Espèces réservoirs

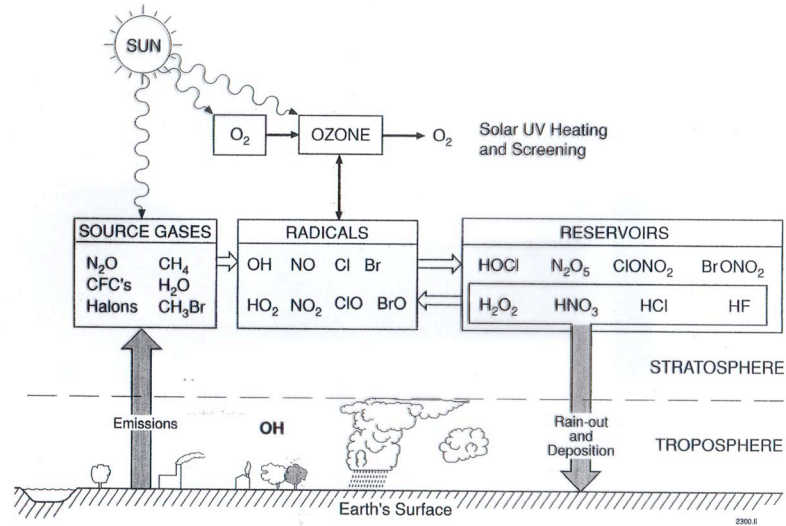


Fig. 18 : Schéma des processus de chimie dans la stratosphère.

UVSQ – INSTN - ENSTA

Ozone stratosphérique - 25

## 3. L'ozone polaire

### 3.1 Le trou d'ozone Antarctique

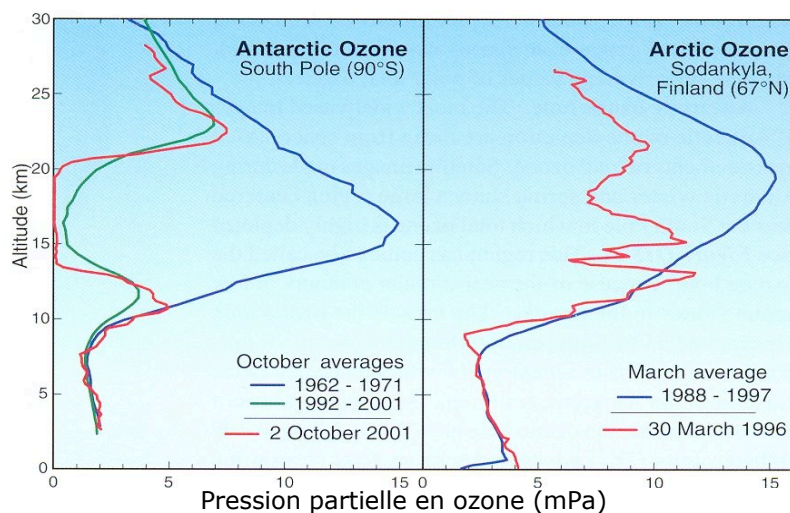


Fig. 19 : Profils d'ozone mesurés en Antarctique et Arctique.

UVSQ – INSTN - ENSTA

Ozone stratosphérique - 26



### 3. L'ozone polaire

#### 3.1 Le trou d'ozone Antarctique

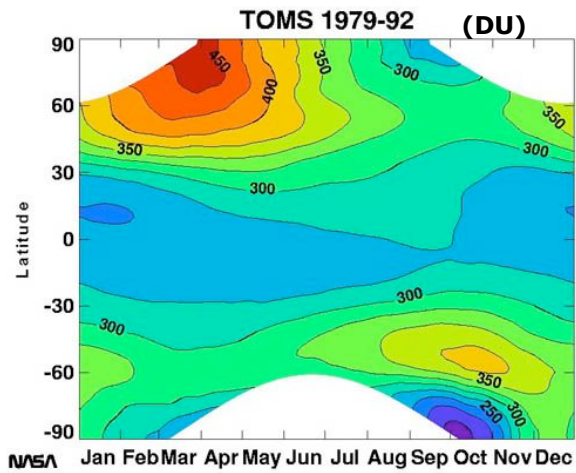


Fig. 20 : Variation saisonnière de la colonne d'ozone mesurée par TOMS.

UVSQ – INSTN - ENSTA

Ozone stratosphérique - 27

### 3. L'ozone polaire

#### 3.1 Le trou d'ozone Antarctique

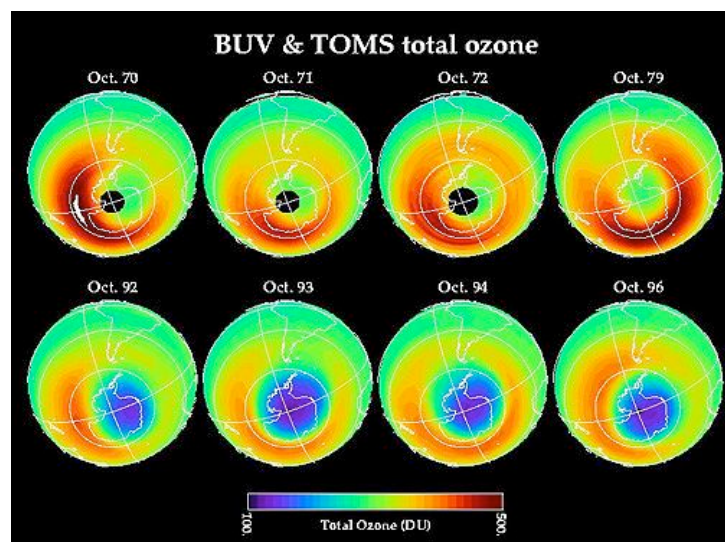


Fig. 21 : Colonne d'ozone mesurée dans les années 1970 et 1990.

UVSQ – INSTN - ENSTA

Ozone stratosphérique - 28

### 3. L'ozone polaire

#### 3.1 Le trou d'ozone Antarctique

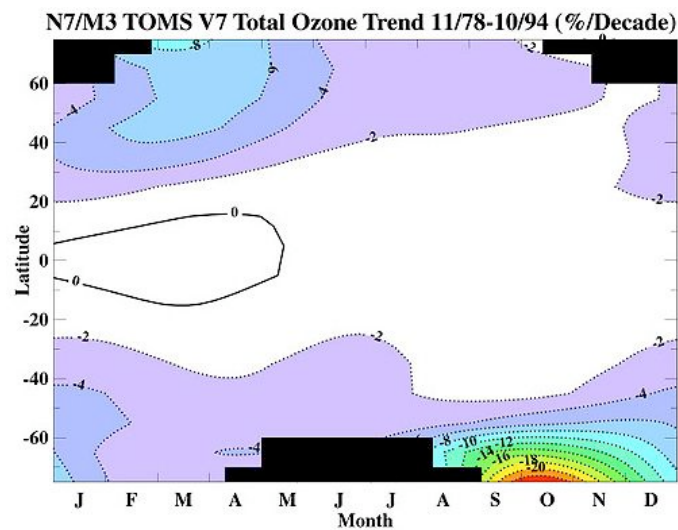


Fig. 22 : Tendence d'ozone mesurée par TOMS sur la période 1978-1994.

UVSQ – INSTN - ENSTA

Ozone stratosphérique - 29

### 3. L'ozone polaire

#### 3.1 Le trou d'ozone Antarctique

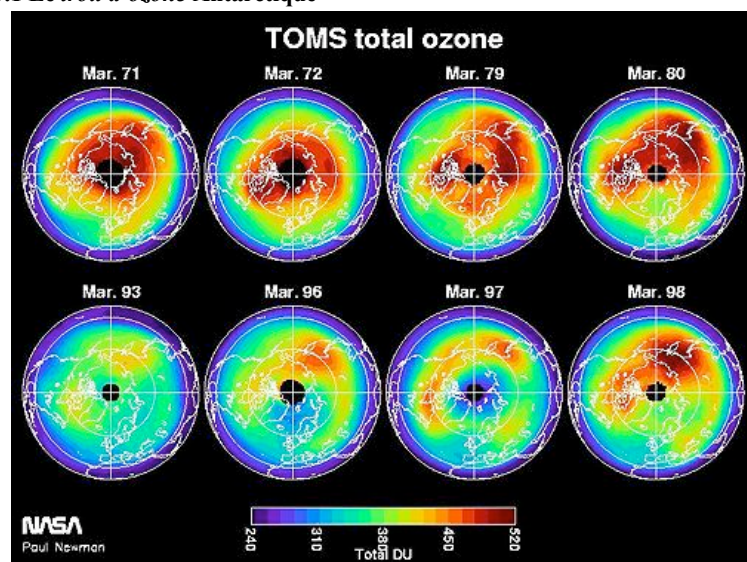


Fig. 23 : Colonne d'ozone mesurée par TOMS dans l'hémisphère nord.

UVSQ – INSTN - ENSTA

Ozone stratosphérique - 30



### 3. L'ozone polaire

#### 3.1 Le trou d'ozone Antarctique

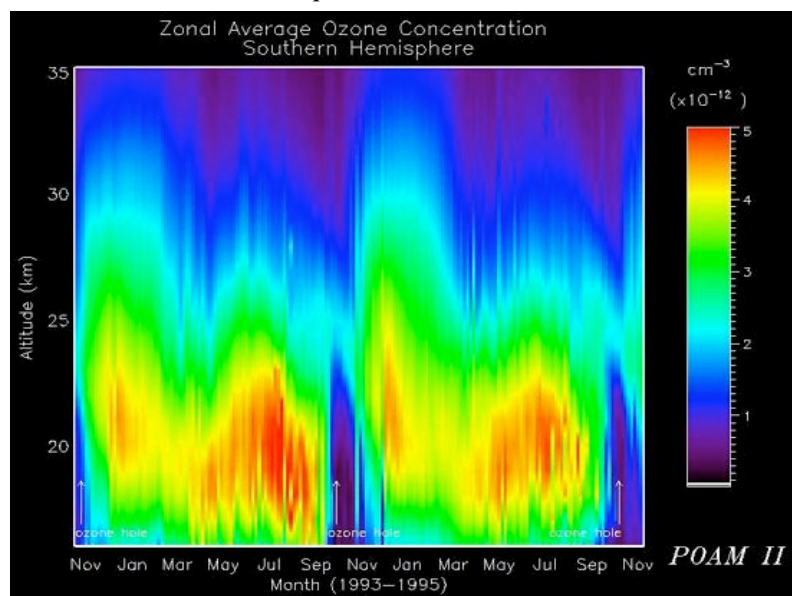


UVSQ – INSTN - ENSTA

Ozone stratosphérique - 31

### 3. L'ozone polaire

#### 3.1 Le trou d'ozone Antarctique



Source : An Electronic book ([see.gsfc.nasa.gov/edu/SEES/strat/class/S\\_class.htm](http://see.gsfc.nasa.gov/edu/SEES/strat/class/S_class.htm))

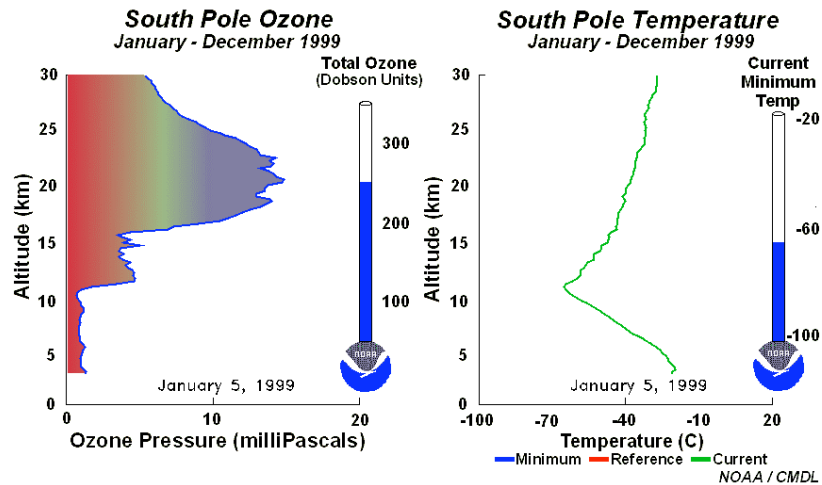
UVSQ – INSTN - ENSTA

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

UVSQ – INSTN – ENSTA

Ozone stratosphérique - 33

### 3. L'ozone polaire

#### 3.1 Le trou d'ozone Antarctique

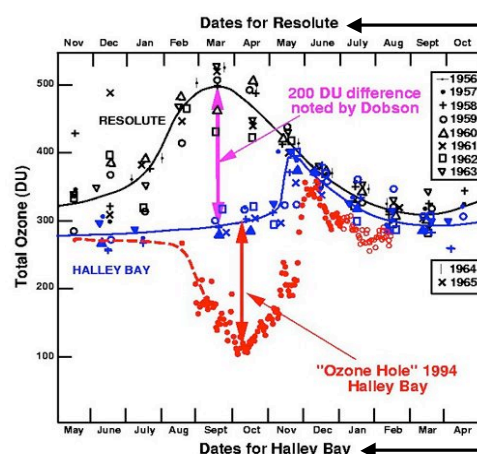


Fig. 24 : Evolution saisonnière de l'ozone total à Resolute et Halley Bay.

UVSQ – INSTN – ENSTA

Ozone stratosphérique - 34

### 3. L'ozone polaire

#### 3.2 Le rôle de la chimie hétérogène

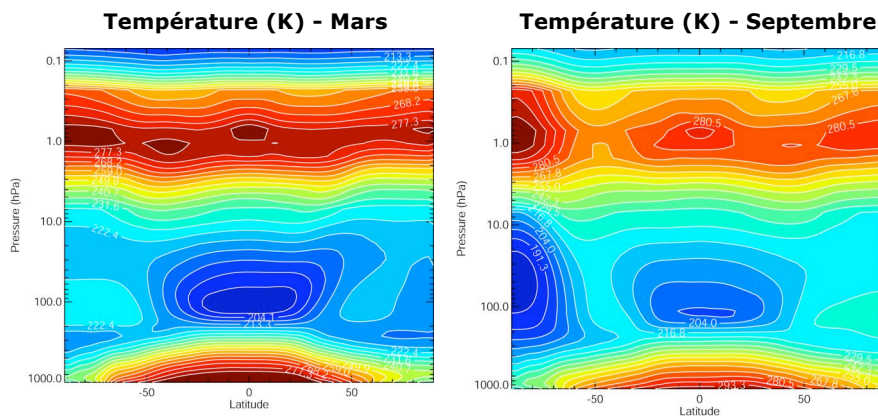


Fig. 25 : Coupe zonale de la température (K).

UVSQ – INSTN - ENSTA

Ozone stratosphérique - 35

### 3. L'ozone polaire

#### 3.2 Le rôle de la chimie hétérogène

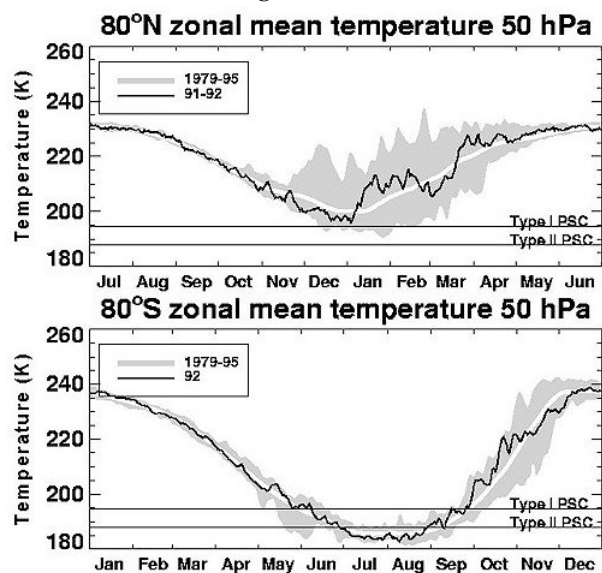


Fig. 26 : Evolution saisonnière de la température polaire à 50 hPa.

UVSQ – INSTN - ENSTA

Ozone stratosphérique - 36

### 3. L'ozone polaire

#### 3.2 Le rôle de la chimie hétérogène

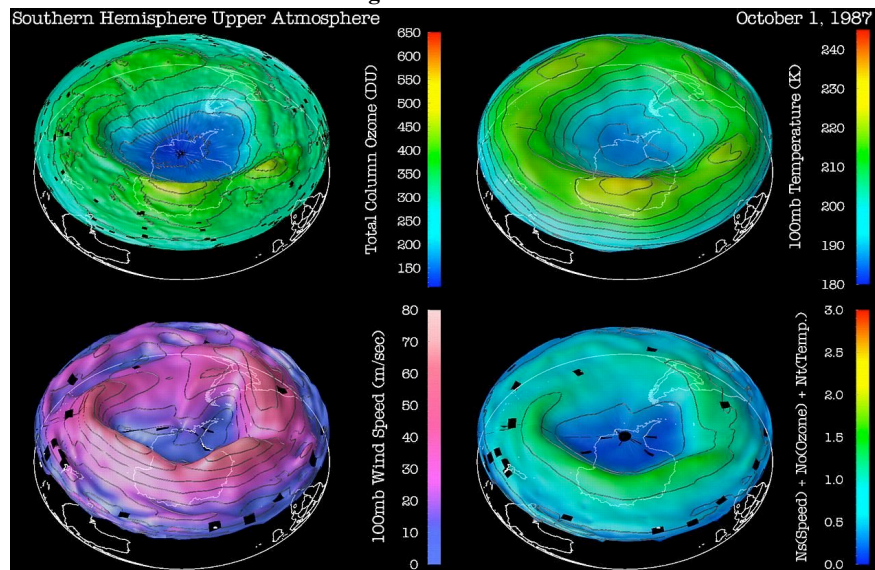


Fig. 27 : Le vortex polaire dans l'hémisphère sud.

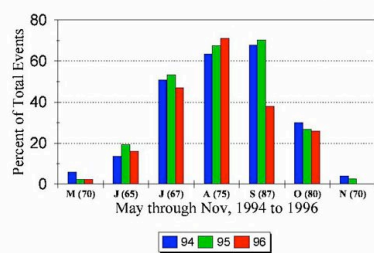
UVSQ – INSTN – ENSTA

Ozone stratosphérique - 37

### 3. L'ozone polaire

#### 3.2 Le rôle de la chimie hétérogène

##### Antarctic POAM II PSC Frequency



<b>Type I PSC:</b>	Nitric acid trihydrate ( $\text{HNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) Ternary solution ( $\text{H}_2\text{O}$ , $\text{H}_2\text{SO}_4$ , $\text{HNO}_3$ )
<b>Formation Temp:</b>	195 K
<b>Particle diameter:</b>	1 $\mu\text{m}$
<b>Altitudes:</b>	10- 24 km
<b>Settling rates:</b>	1km/30 days
<b>Type II PSC:</b>	Water Ice
<b>Formation Temp:</b>	188 K
<b>Particle diameter:</b>	> 10 $\mu\text{m}$
<b>Altitudes:</b>	10- 24 km
<b>Settling rates:</b>	> 1.5 km/day

UVSQ – INSTN – ENSTA

Ozone stratosphérique - 38

### 3. L'ozone polaire

#### 3.2 Le rôle de la chimie hétérogène

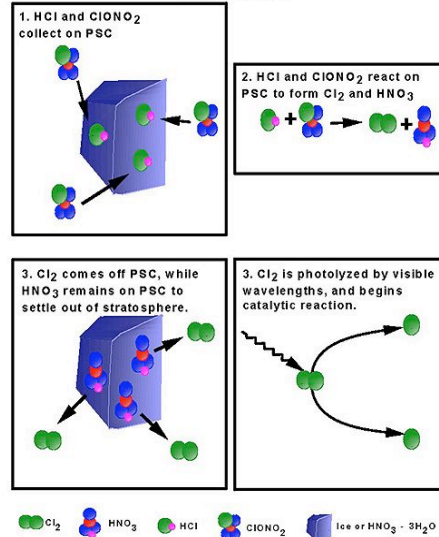
PSC :

Libération de chlore actif  $\text{Cl}_2$

Dénitrification de la stratosphère  
 $\Rightarrow$  moins de  $\text{ClONO}_2$

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

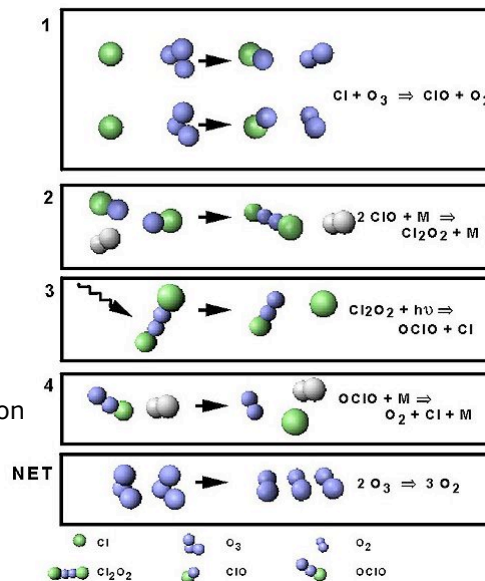


Fig. 30 : Cycle de destruction de l'ozone polaire.



### 3. L'ozone polaire

#### 3.2 Le rôle de la chimie hétérogène

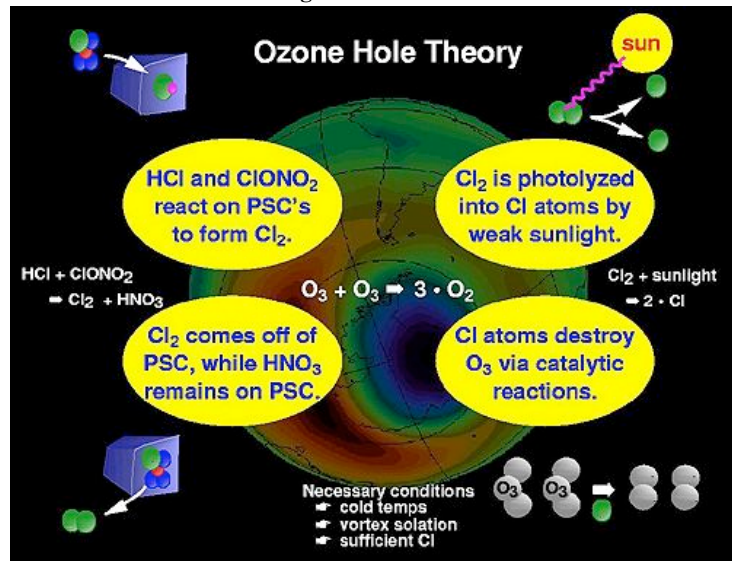


Fig. 31 : Schéma de la théorie de formation du trou d'ozone.

### 3. L'ozone polaire

#### 3.2 Le rôle de la chimie hétérogène

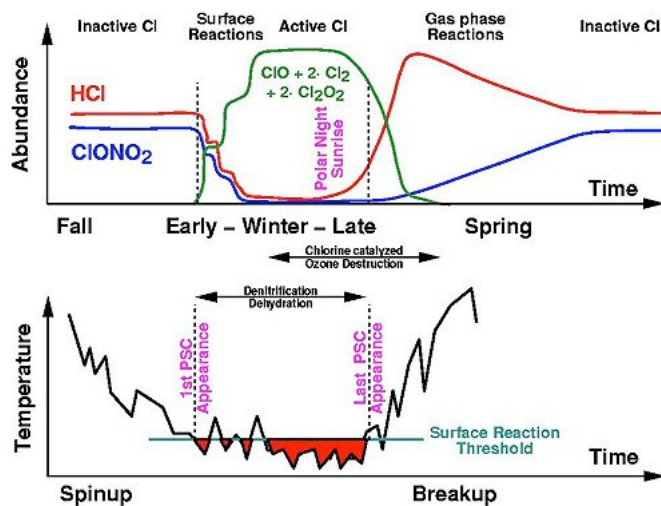
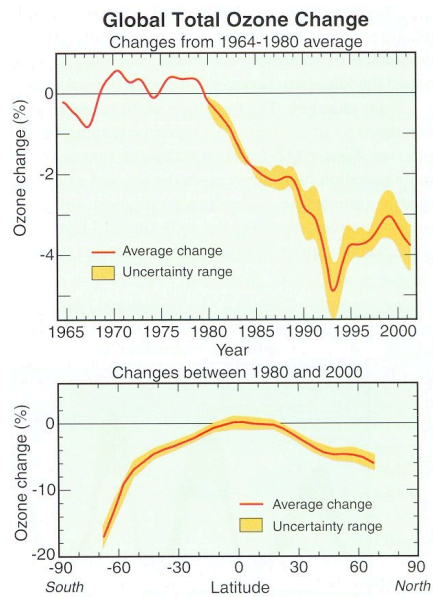


Fig. 32 : Evolution dans le temps de la destruction d'ozone polaire.

#### 4. Evolution de la couche d'ozone

##### 4.1 Evolution passée

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



UVSQ – INSTN - ENSTA

Ozone stratosphérique - 43

#### 4. Evolution de la couche d'ozone

##### 4.1 Evolution passée

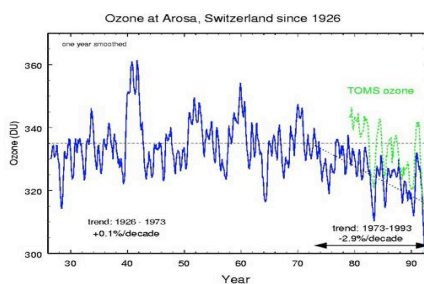
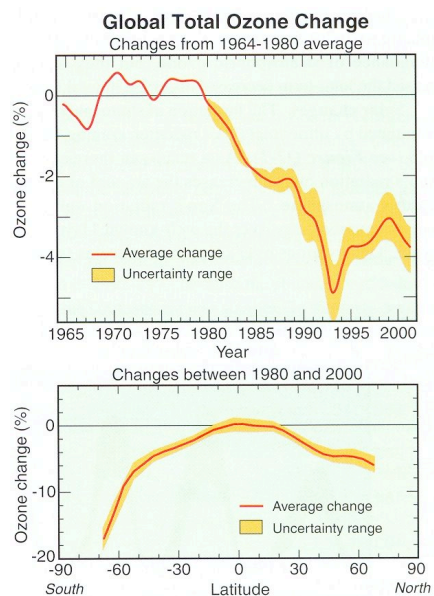


Fig. 33 : Evolution de la colonne d'ozone depuis les années 1960.



UVSQ – INSTN - ENSTA

Ozone stratosphérique - 44



#### 4. Evolution de la couche d'ozone

##### 4.1 Evolution passée

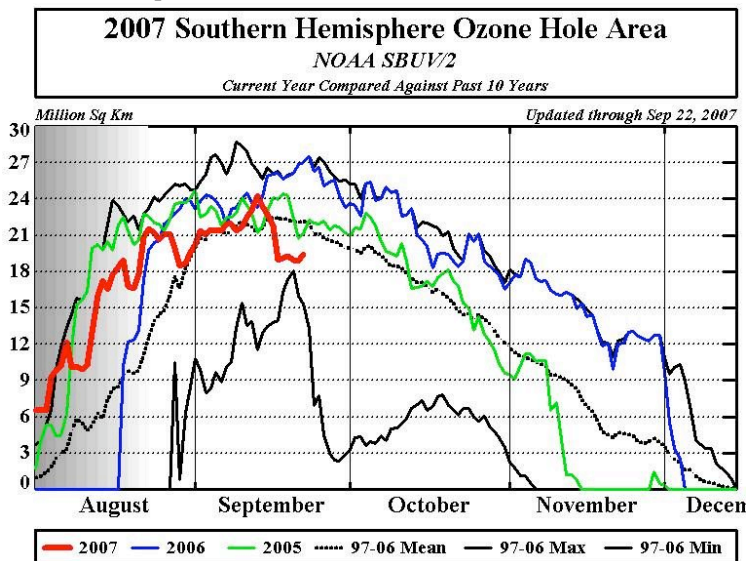


Fig. 34 : Superficie du trou d'ozone Antarctique.

UVSQ – INSTN - ENSTA

Ozone stratosphérique - 45

#### 4. Evolution de la couche d'ozone

##### 4.1 Evolution passée

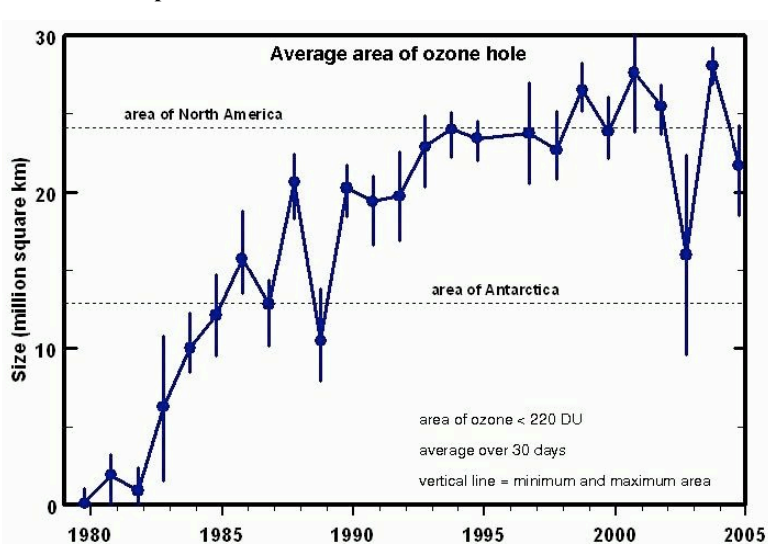


Fig. 34 : Superficie du trou d'ozone Antarctique.

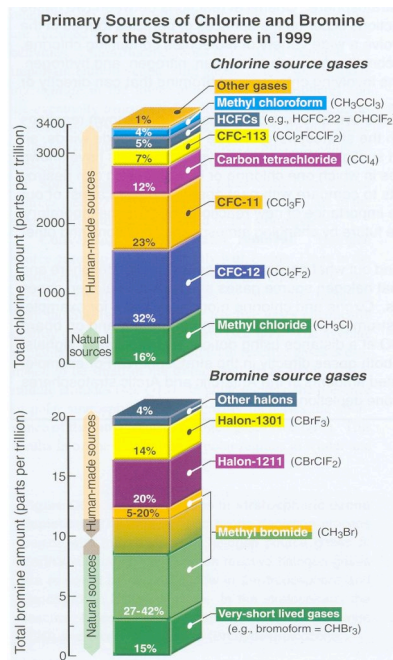
UVSQ – INSTN - ENSTA

Ozone stratosphérique - 46

#### 4. Evolution de la couche d'ozone

##### 4.1 Evolution passée

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



UVSQ – INSTN – ENSTA

Ozone stratosphérique - 47

#### 4. Evolution de la couche d'ozone

##### 4.1 Evolution passée

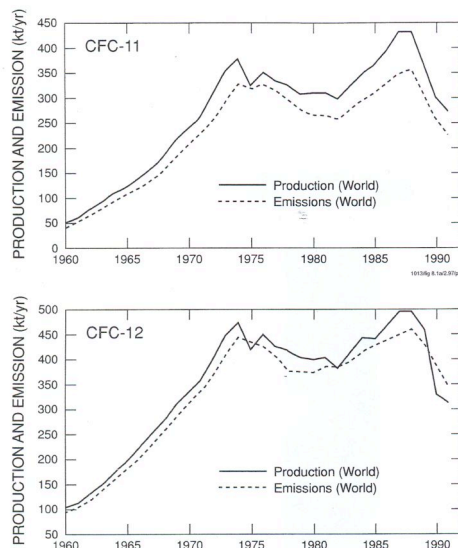
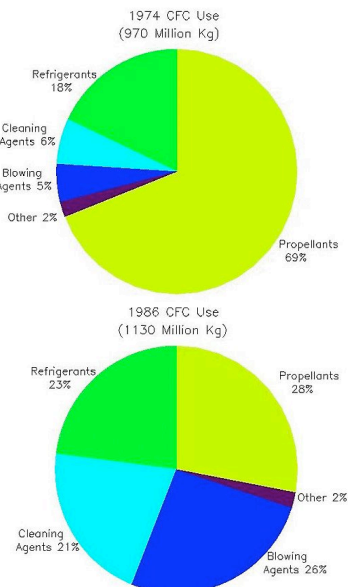


Fig. 36 : Emissions de CFC11 et CFC12.



UVSQ – INSTN – ENSTA

Ozone stratosphérique - 48

#### 4. Evolution de la couche d'ozone

##### 4.1 Evolution passée

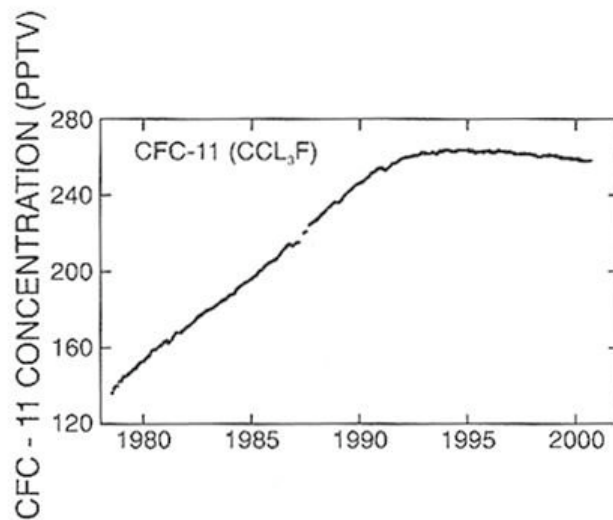


Fig. 37 : Augmentation du CFC11 dans l'atmosphère.

#### 4. Evolution de la couche d'ozone

##### 4.2 Evolution future

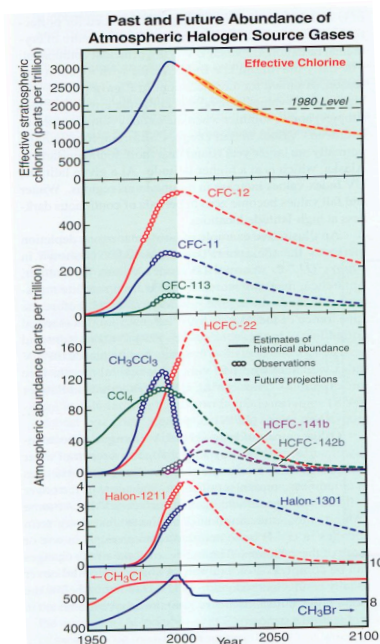
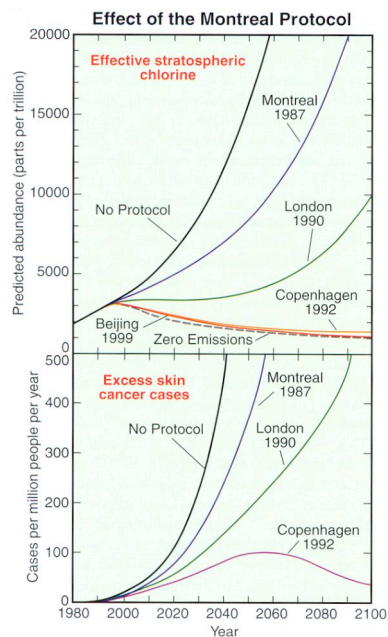


Fig. 38 : Evolution du contenu en chlore dans la stratosphère.

#### 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

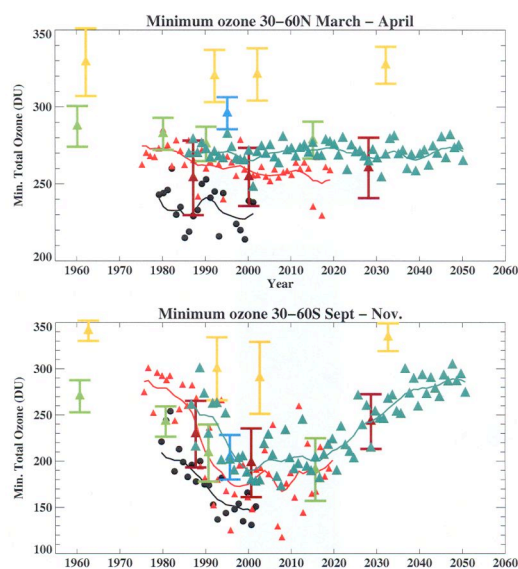


Fig. 40 : Modélisation de l'évolution future de l'ozone total.

#### 4. Evolution de la couche d'ozone

##### 4.3 Les conséquences pour l'environnement

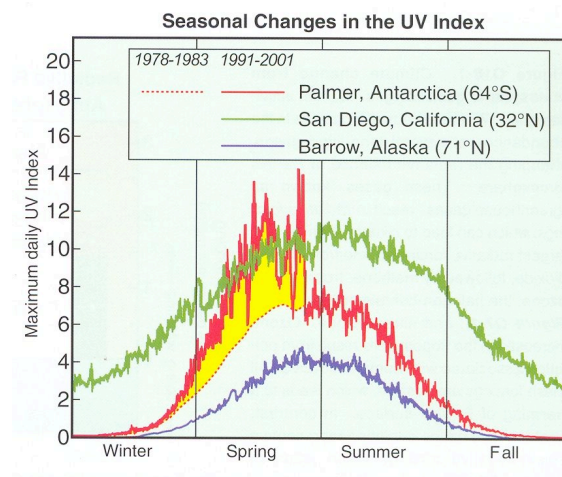


Fig. 41 : Rayonnement UV à la surface.

#### 4. Evolution de la couche d'ozone

##### 4.2 Evolution future

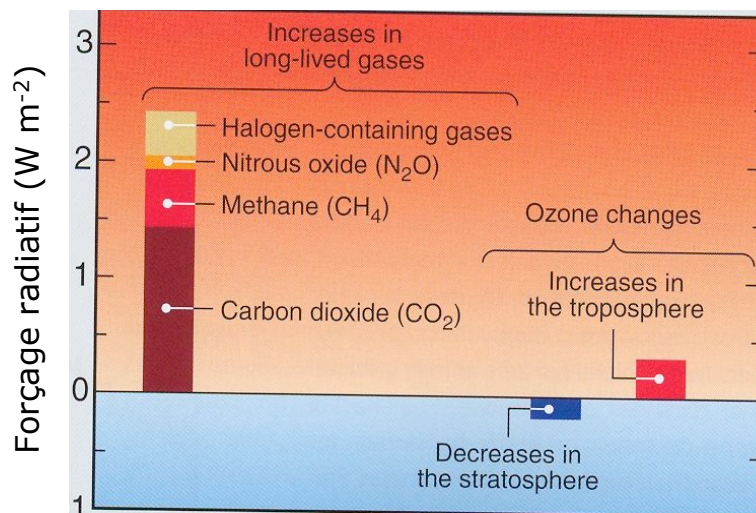


Fig. 42 : Forçages radiatifs depuis le préindustriel.