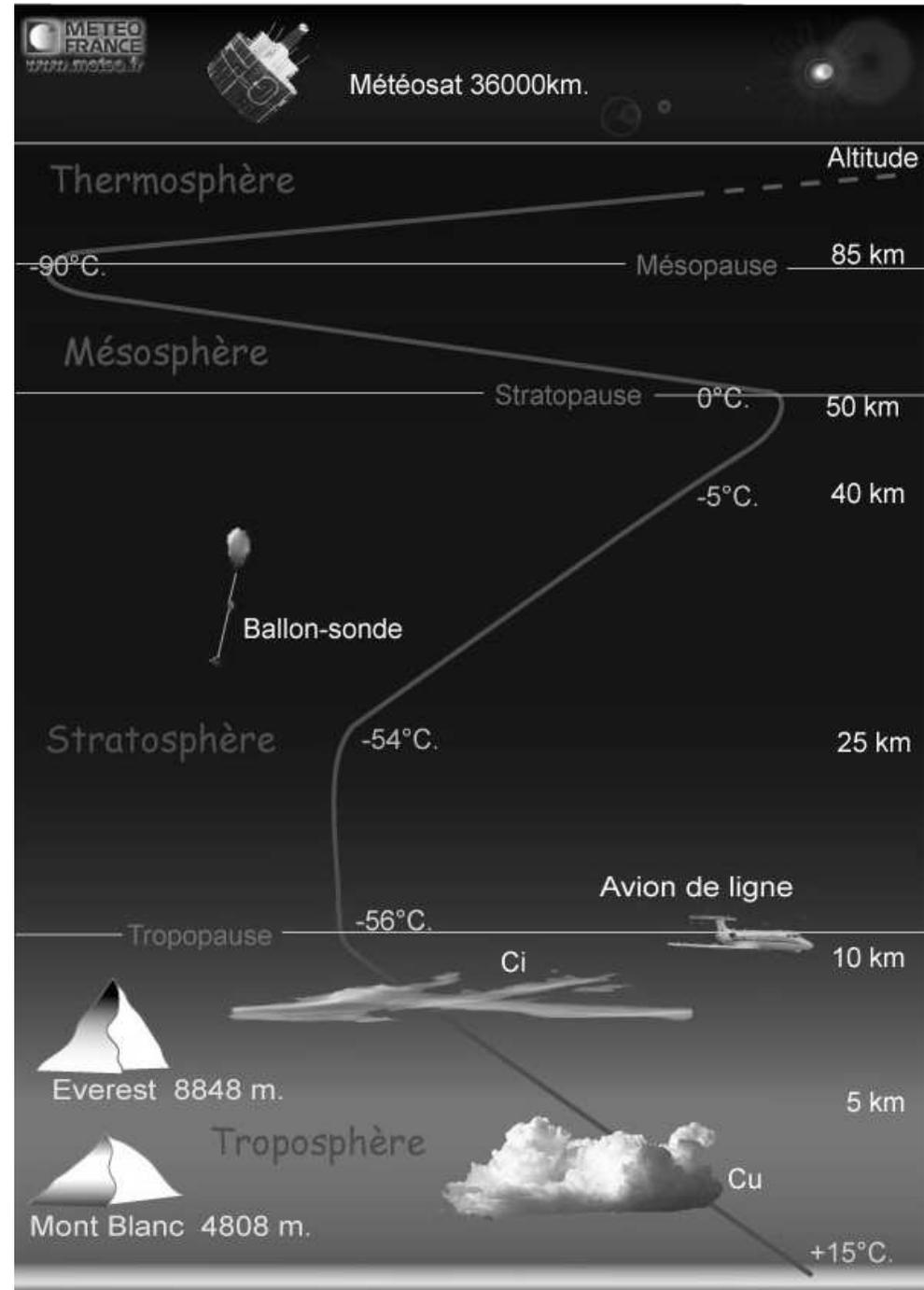


La chimie atmosphérique...



# Régions et caractéristiques de l'atmosphère...

- Couches de l'atmosphère essentiellement définies par le profil vertical de température



# Le volcan Pinatubo...

- Eruption le 12 Juin 1991 : nuage volcanique atteint 20km d'altitude
- Conséquences : Fine couche d'aérosols stratosphériques formés essentiellement d'acide sulfurique



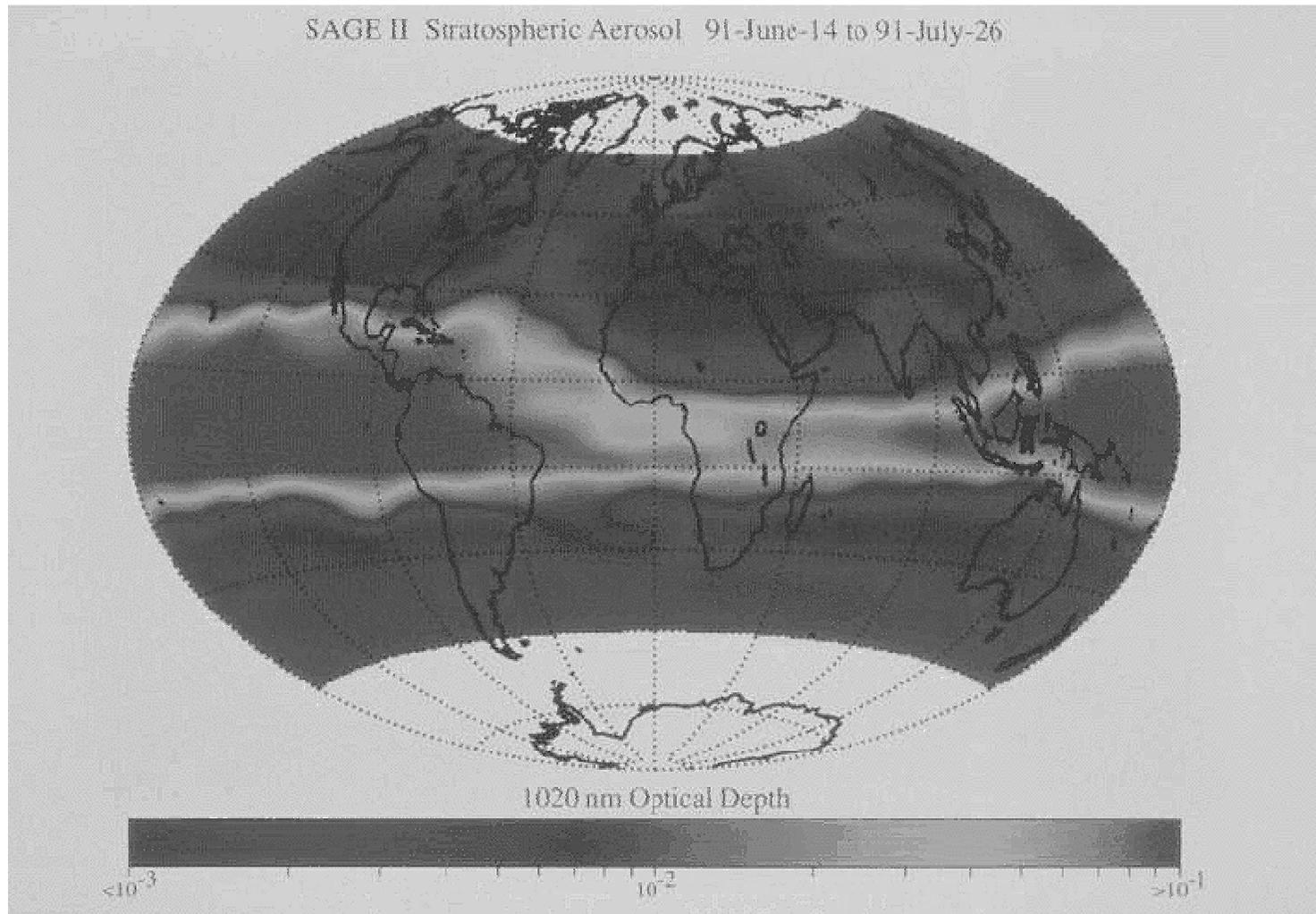
Image prise de la terre



Image prise par la navette Atlantis

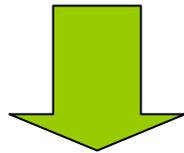


# Le volcan Pinatubo...

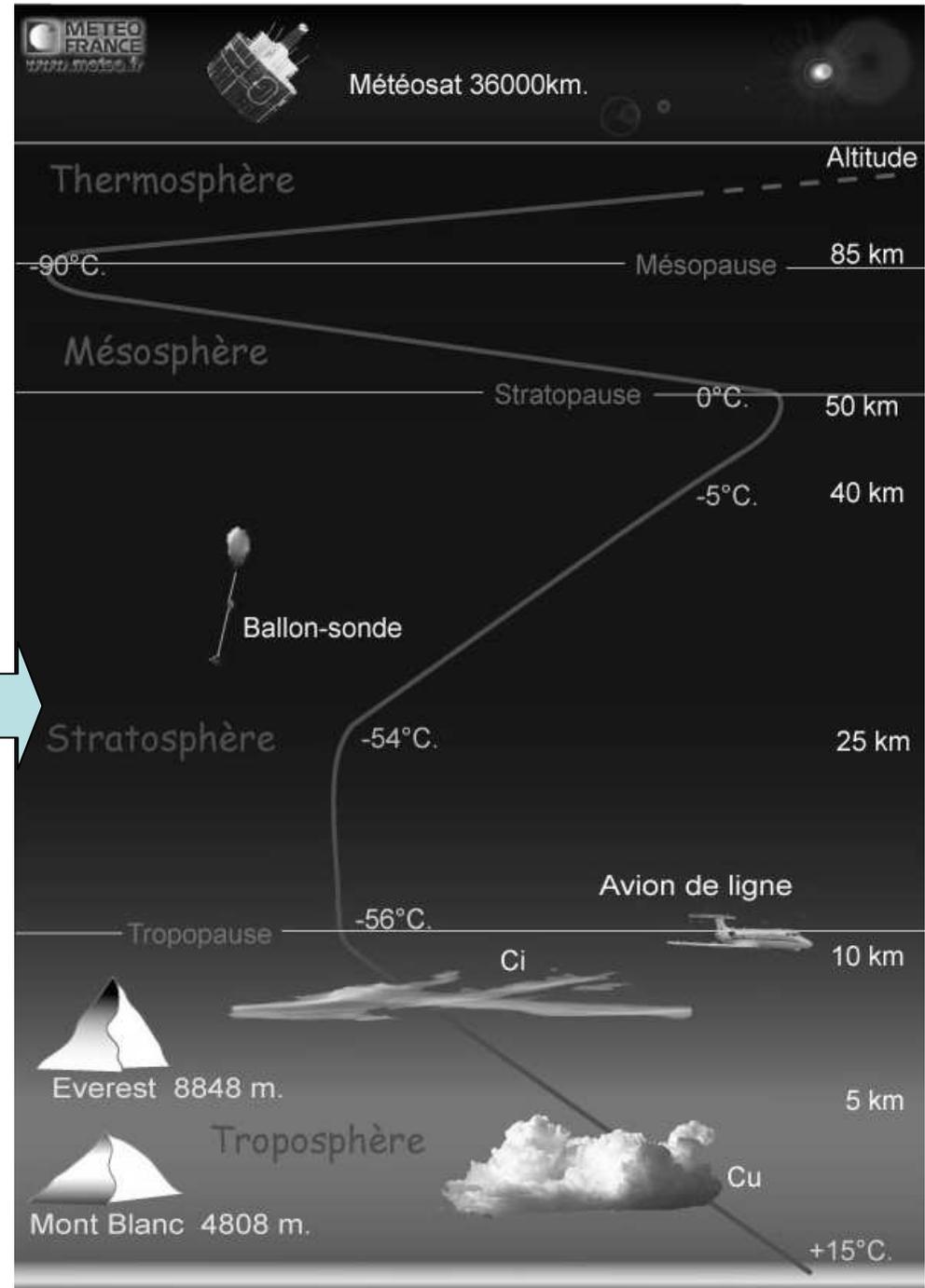


# Régions et caractéristiques de l'atmosphère

- Pourquoi la température de la stratosphère augmente avec l'altitude ?



présence d'ozone ( $O_3$ )



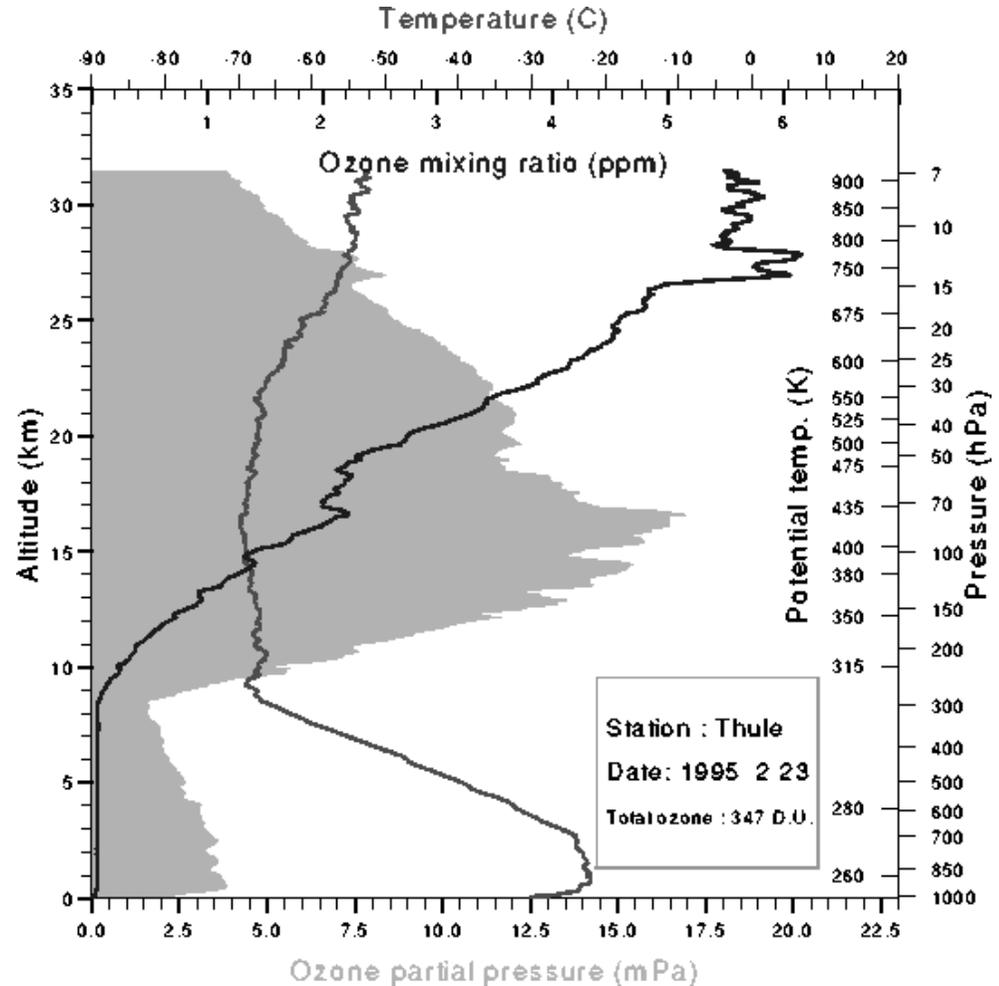
# La couche d'ozone...

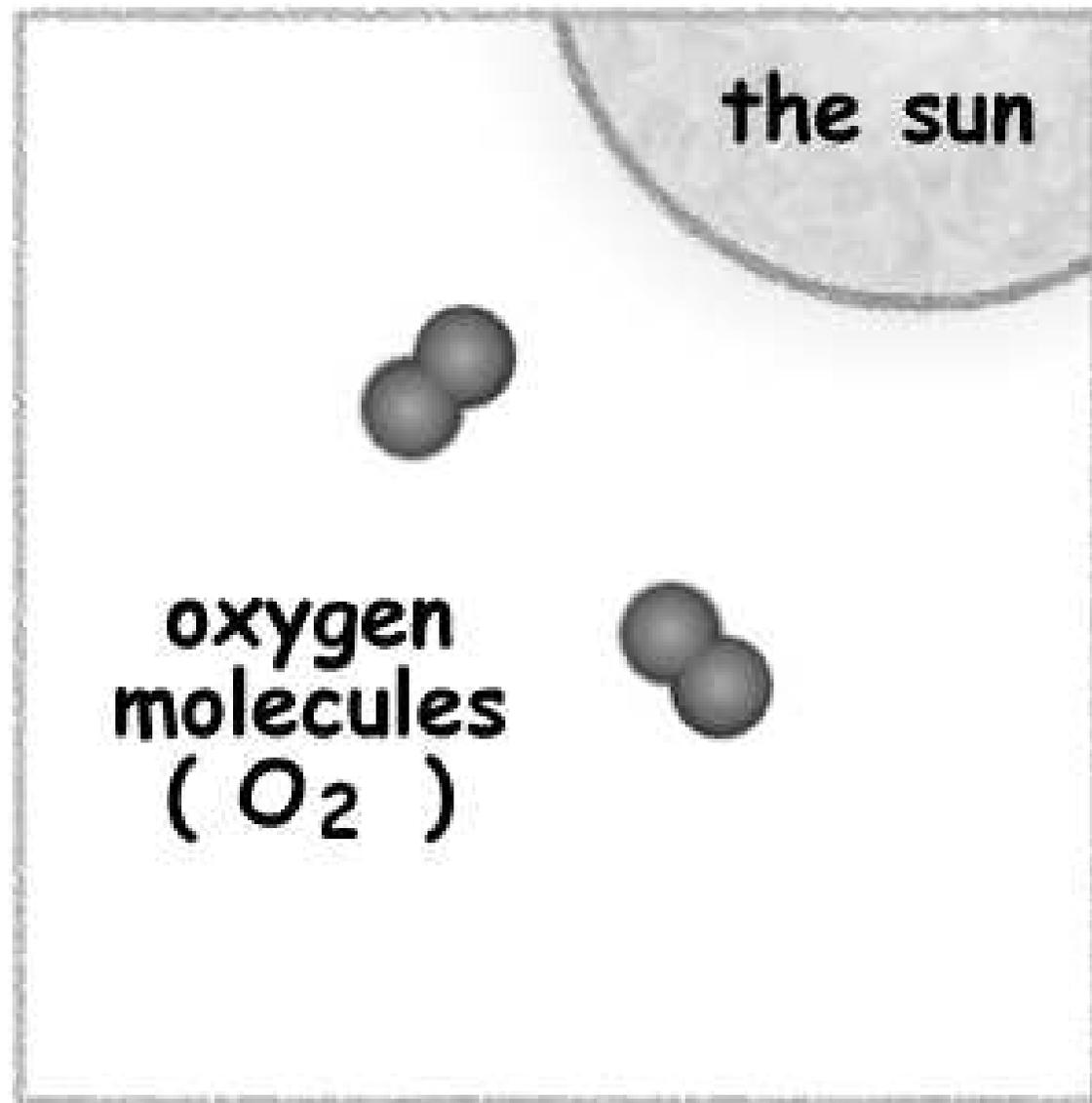


Sir Chapman, 1930  
 "A theory of upper-atmosphere ozone,  
*Mem. Roy. Meteorol. Soc.*"

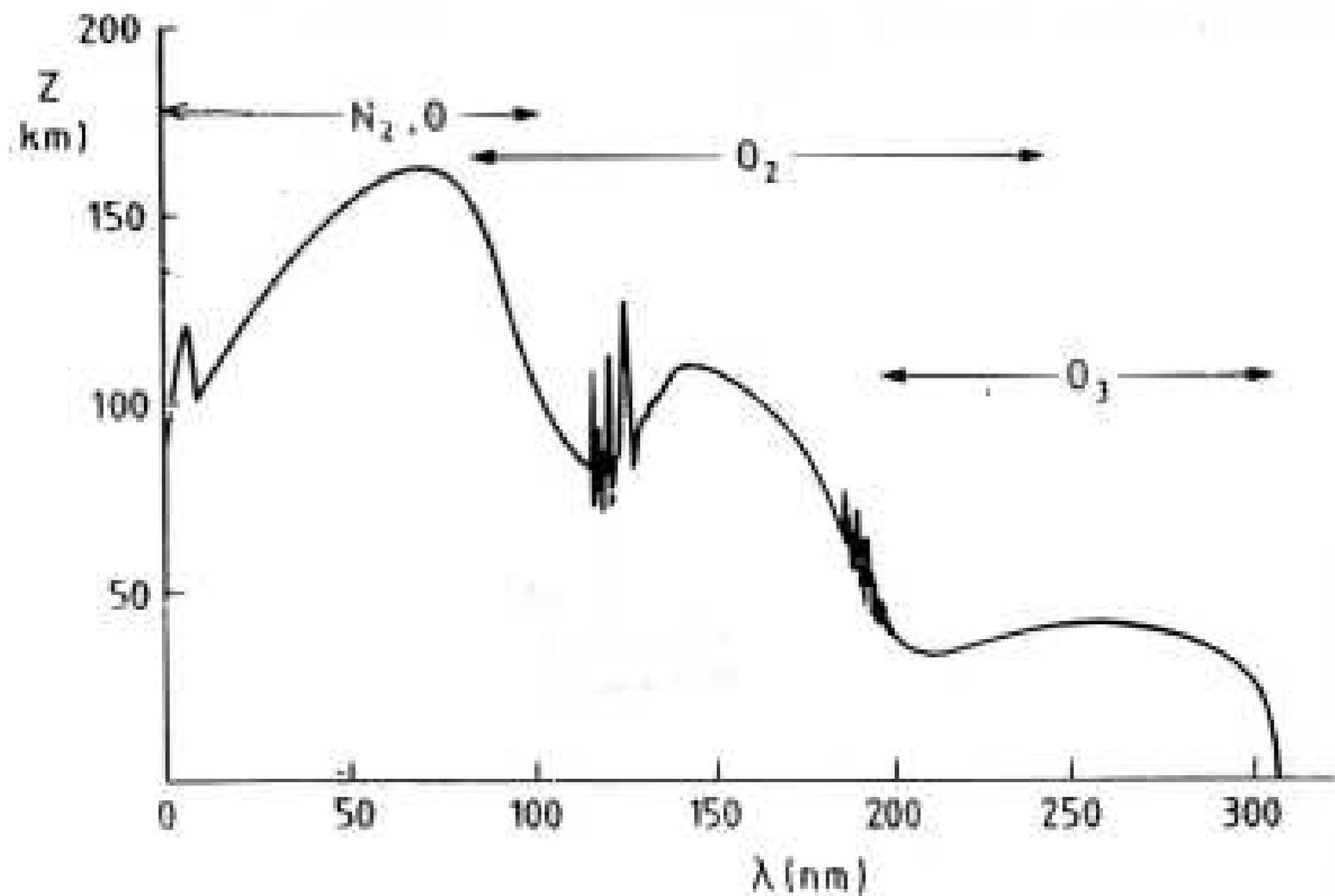
## Cycle de Chapman

- $O_2 + h\nu \Rightarrow 2O\cdot$  (1)
- $O\cdot + O_2 \xrightarrow{M} O_3$  (2)
- $O\cdot + O_3 \Rightarrow 2O_2$  (3)
- $O_3 + h\nu \Rightarrow O\cdot + O_2$  (4)

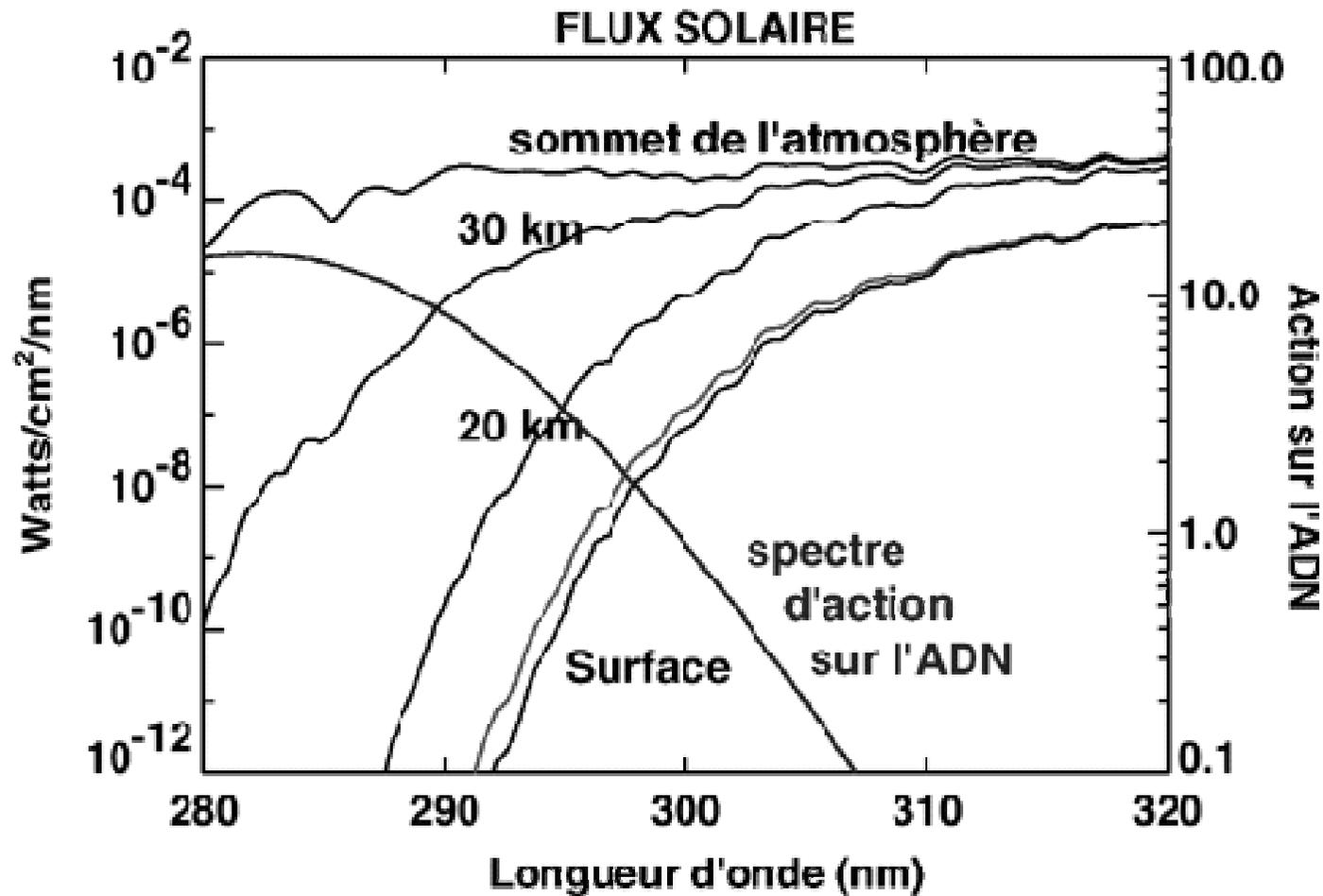




L'ozone absorbe les UV...

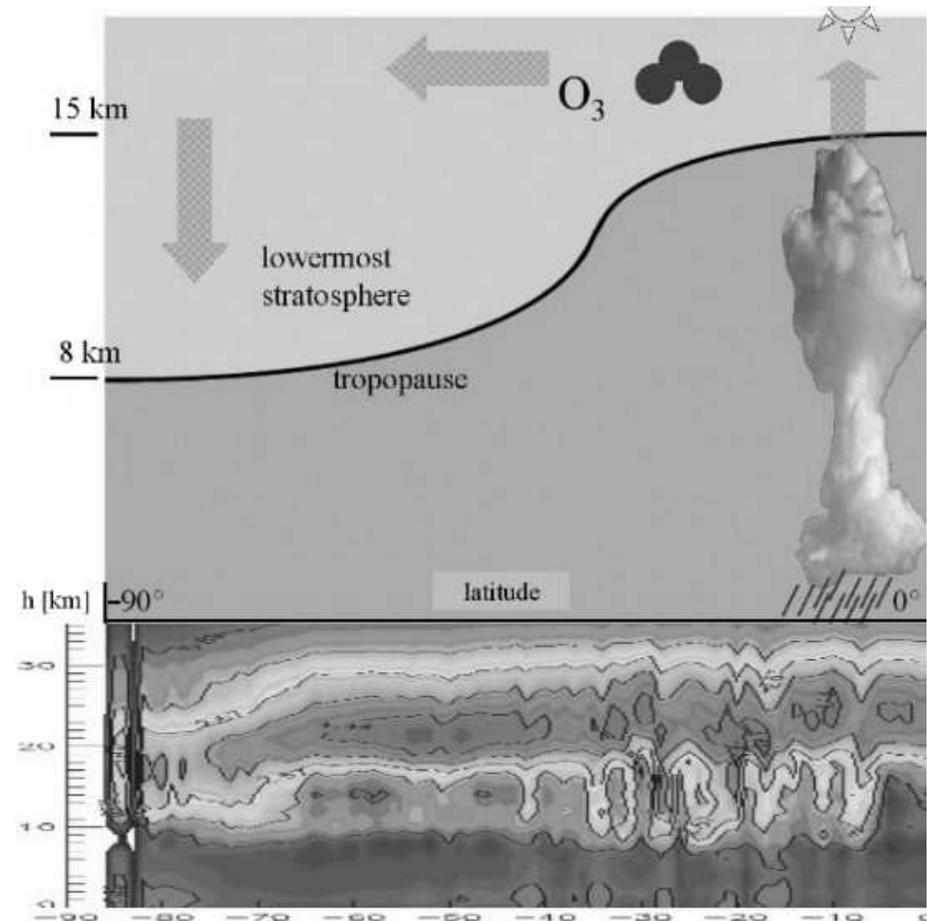


# L'O<sub>3</sub> protège la vie..



# La couche d'ozone en fonction de la latitude...

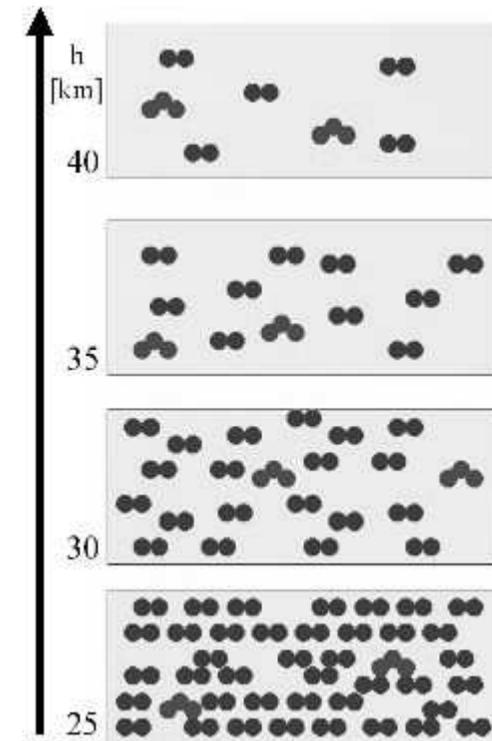
- Rayons solaires plus fort aux tropiques
  - majorité de l'ozone se forme à l'équateur mais ne s'accumule pas
- Circulation atmosphérique provoque accumulation de l'ozone aux pôles (moins d'ensoleillement)

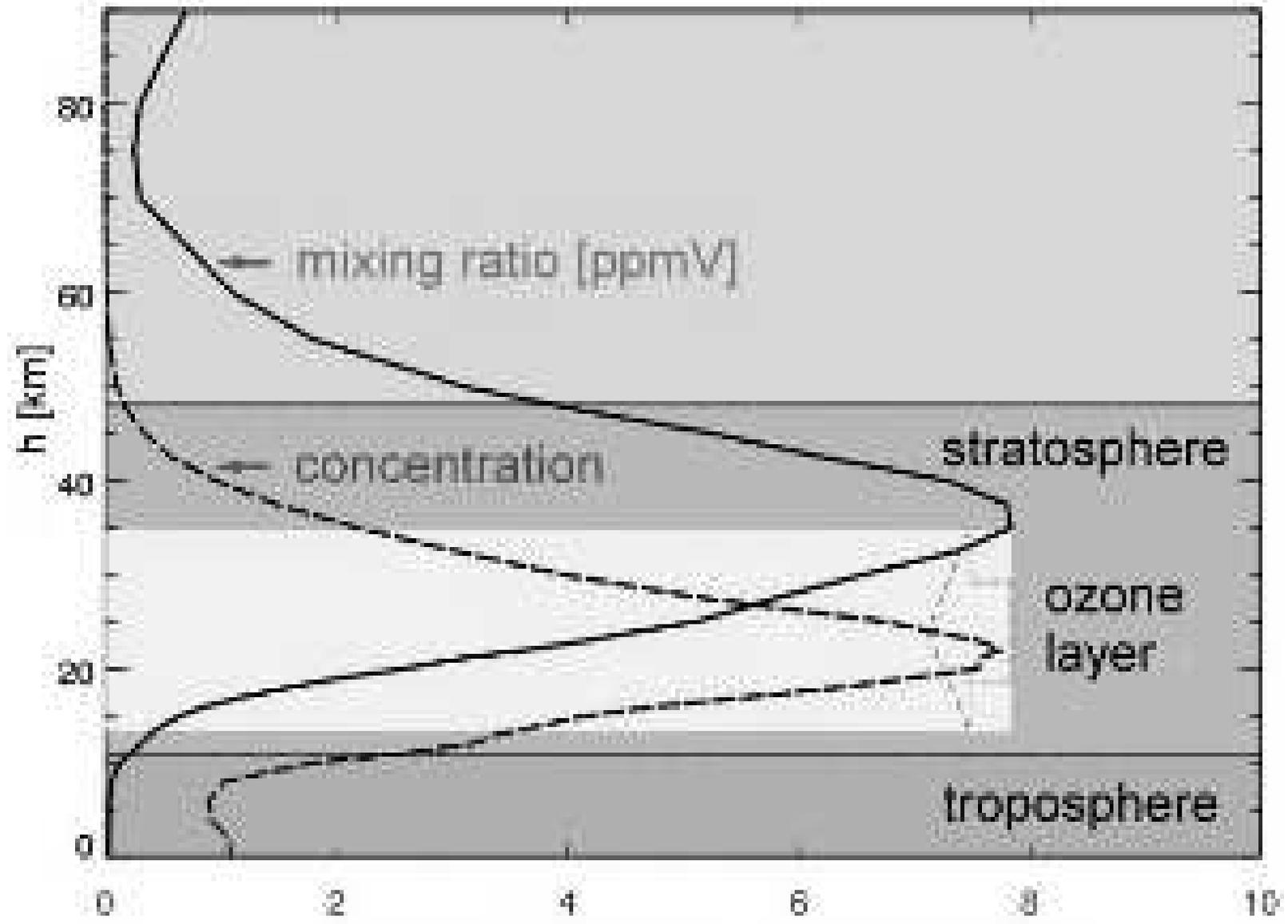


# Les unités atmosphériques...

- Unités générales

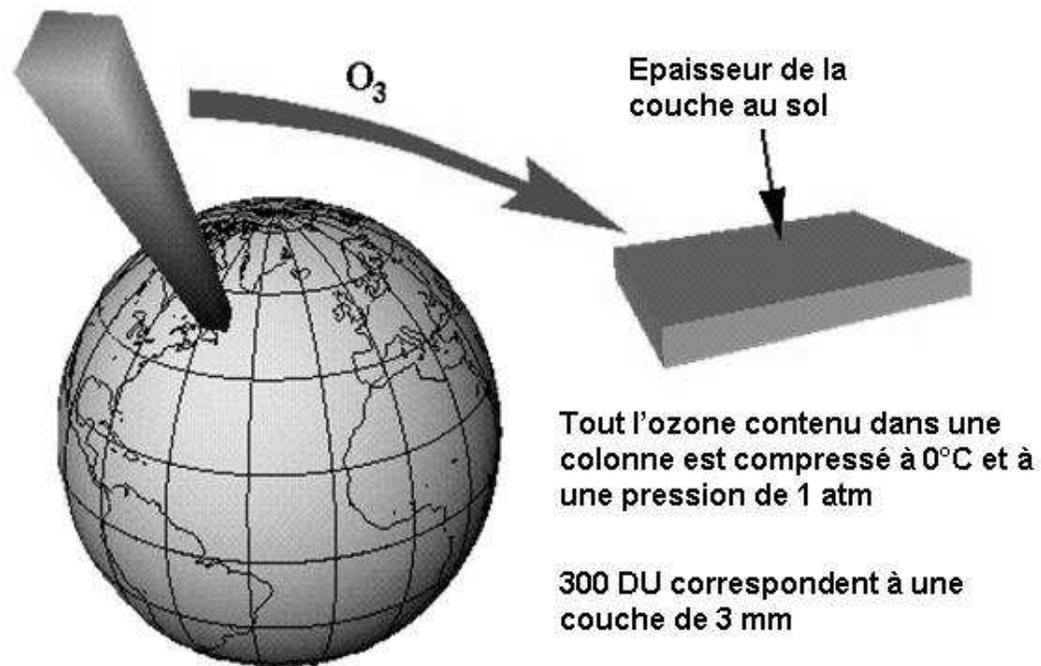
- **concentration** =  $c$  est la masse des molécules d'un composé contenue dans un certain volume d'air. Exemple :  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (quantité absolue)
- **rapport de mélange** =  $c$  est la fraction du composé parmi toutes les molécules d'air. Exemple : S'il y a 40 molécules d'ozone dans 1 million de molécules d'air, le rapport de mélange est de 40 parties par million (40 ppm). Cette quantité est relative





# Les unités... suite

- Unité spécifique à l'ozone
  - l'unité Dobson (DU)



# Comment on mesure la composition de la stratosphère...

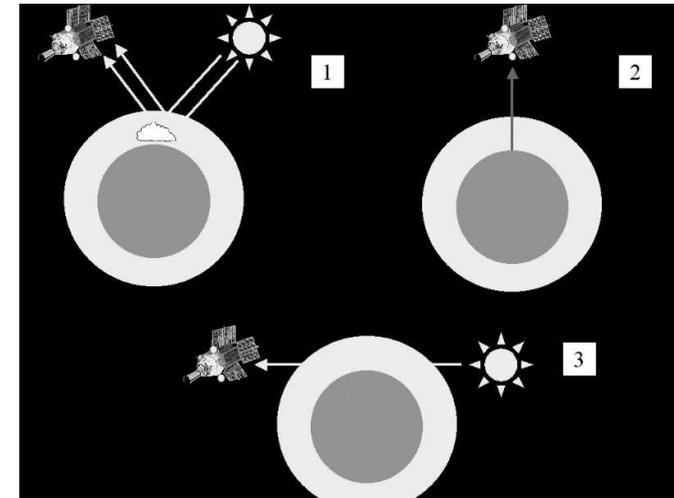
- Ballon sonde



LIDAR

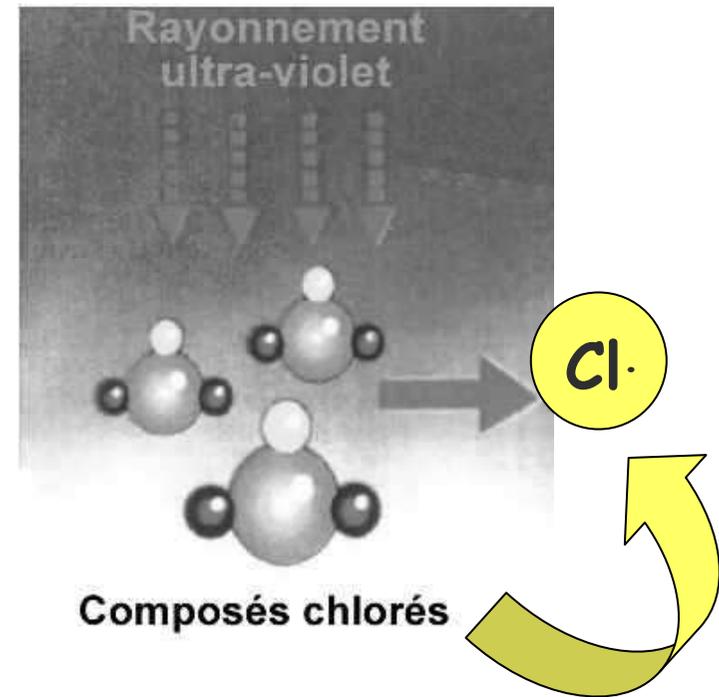


Satellite



# Le « trou » dans la couche d'ozone...

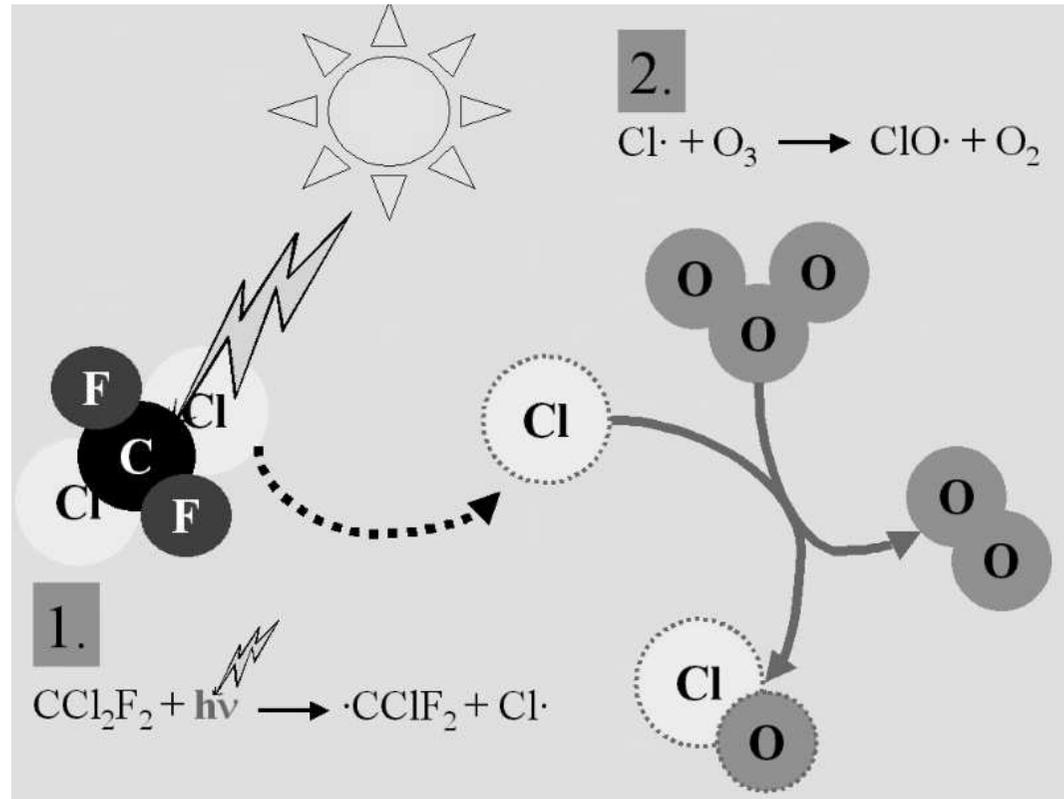
- Observation depuis une vingtaine d'années au dessus des pôles d'une forte diminution de la couche d'ozone à une période de l'année bien précise (printemps polaire)
- Cette diminution semble être attribuée à la présence de composés halogénés (CFC) dans l'atmosphère émis par l'homme (systèmes réfrigérants, climatisation, bombes aérosols, production emballage)
  - Inerte chimiquement
  - Très longue durée de vie atmosphérique



Formation dans la stratosphère de radicaux de Chlore

# Cycle catalytique du Chlore

- $\text{Cl}\cdot + \text{O}_3 \rightarrow \text{ClO}\cdot + \text{O}_2$
- $\text{O}_3 + h\nu \rightarrow \text{O}\cdot + \text{O}_2$
- $\text{ClO} + \text{O} \rightarrow \text{Cl} + \text{O}_2$
- -----
- $2\text{O}_3 \rightarrow 3\text{O}_2$



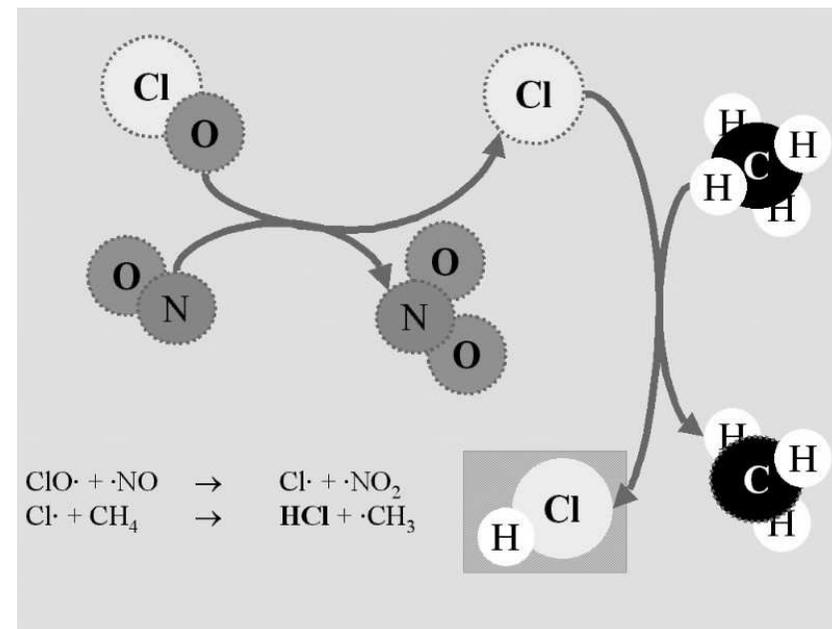
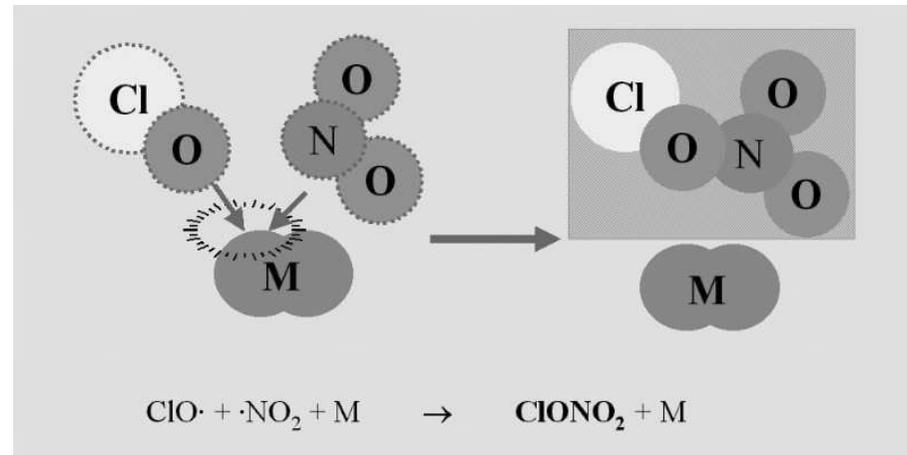


the sun

Stratosphere

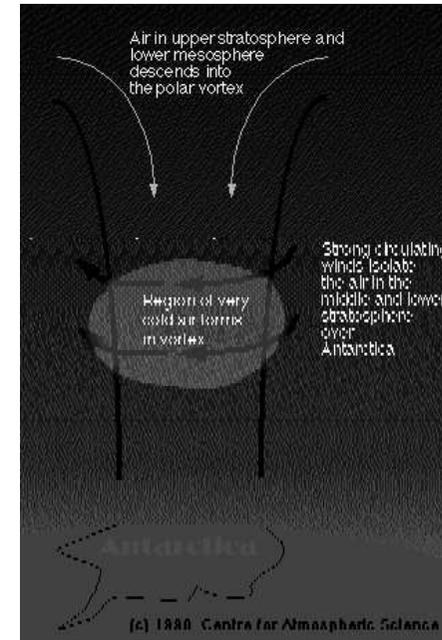
# Formation des espèces réservoirs de Cl

- Le radical  $\text{Cl}\cdot$  n'est pas nécessairement réutilisé dans le cycle de destruction de  $\text{O}_3$
- $\text{Cl}\cdot$  ou  $\text{ClO}\cdot$  peuvent également disparaître via d'autres réactions. Les oxydes d'azote peuvent réagir avec les radicaux  $\text{ClO}\cdot$ , pour donner ce qu'on appelle des espèces réservoir  $\text{ClONO}_2$  et  $\text{HCl}$



# Le trou dans la couche d'ozone...

- Les réservoirs de Chlore circulent dans la stratosphère jusqu'aux pôles où ils sont « piégés » par le vortex polaire (plus important en Antarctique)



**Création du vortex  
ou tourbillon  
stratosphérique  
polaire pendant  
l'hiver**

# Le trou dans la couche d'ozone...

- Pendant la nuit polaire dans le vortex :
  - Réactions à la surface des nuages stratosphériques à très basses températures ( $-80^{\circ}\text{C}$ ):
    - $\text{HCl} + \text{ClONO}_2 \rightarrow \text{HNO}_3 + \text{Cl}_2$  (1)
    - $\text{ClONO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HNO}_3 + \text{HOCl}$  (2)
    - $\text{HCl} + \text{HOCl} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{Cl}_2$  (3)
    - $\text{N}_2\text{O}_5 + \text{HCl} \rightarrow \text{HNO}_3 + \text{ClONO}$  (4)
    - $\text{N}_2\text{O}_5 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HNO}_3$  (5)

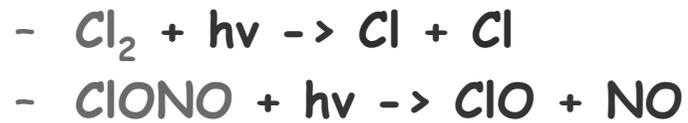


$\text{HCl}$ ,  $\text{ClONO}_2$  : espèces neutres réservoirs de Cl

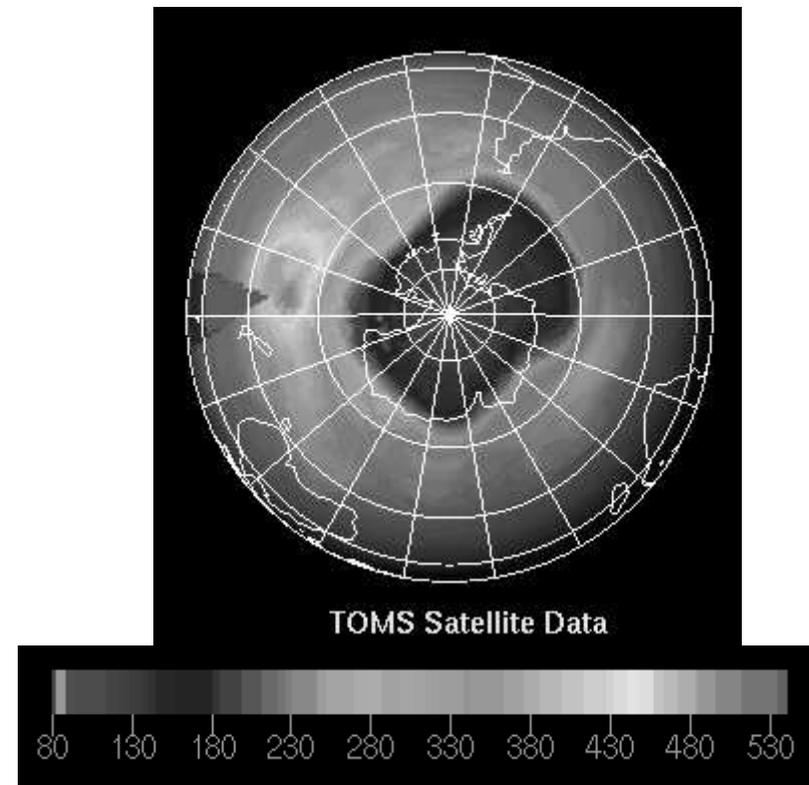
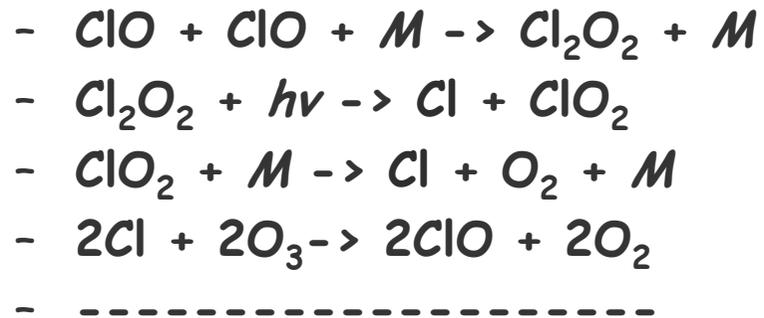
$\text{Cl}_2$ ,  $\text{ClONO}$  : espèces réactives de Cl

# Le trou dans la couche d'ozone...

- Au retour du soleil (octobre pour le pôle sud)

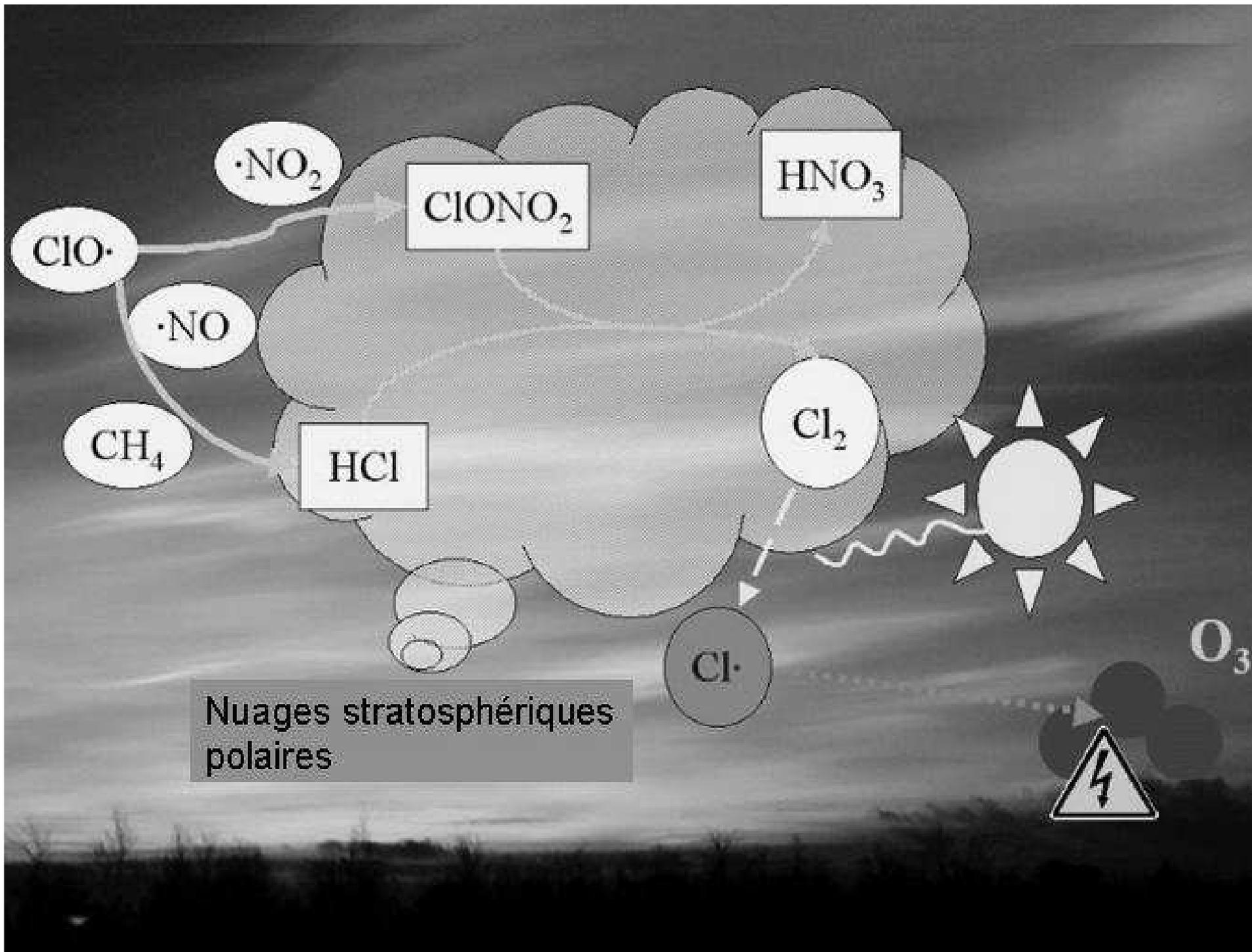


- Cycle de destruction de l'ozone



# La recette finale pour détruire l'ozone...

- L'hiver polaire génère un **vortex polaire** qui isolera l'air intérieur du reste de l'atmosphère.
- Des **températures suffisamment basses** pour créer des nuages stratosphériques polaires (PSC)
- **Pendant la nuit polaire :**
  - Réactions de chimie hétérogène convertissent les espèces réservoirs - inoffensives pour l'ozone - des composés chlorés et bromés sous des formes plus réactives - nuisibles à l'ozone.
- **Au printemps polaire :**
  - ensoleillement permet la production de composés chlorés actifs
  - Initiation des cycles catalytiques de destruction de l'ozone. La perte d'ozone qui s'ensuit est alors rapide..



## Les composés responsables...

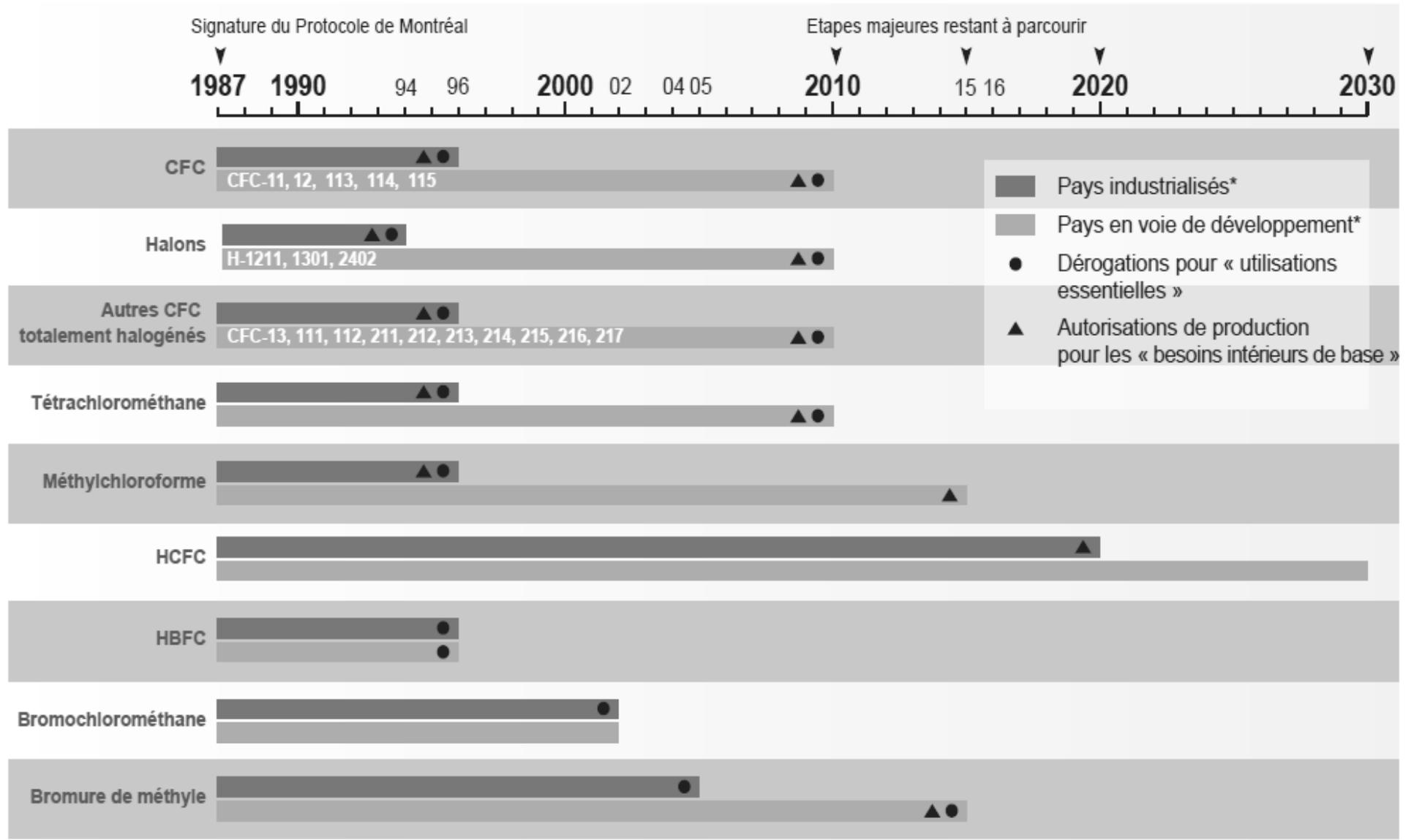
Espèce	Symbole	Temps de vie
Chlorofluorocarbures (CFC)		
CFC-11	$\text{CCl}_3\text{F}$	45
CFC-12	$\text{CCl}_2\text{F}_2$	100
CFC-13	$\text{CClF}_3$	640
CFC-113	$\text{CCl}_2\text{FCClF}_2$	85
CFC-114	$\text{CF}_3\text{CClF}_2$	300
Hydrochlorofluorocarbures (HCFC)		
HCFC-21	$\text{CHCl}_2\text{F}$	2
HCHC-22	$\text{CHClF}_2$	11.9
HCFC-123	$\text{CF}_3\text{CHCl}_2$	1.4
Hydrofluorocarbures (HFC)		
HFC-23	$\text{CHF}_3$	260
HFC-32	$\text{CH}_2\text{F}_2$	5
HFC-41	$\text{CH}_3\text{F}$	2.6
Bromure de méthyle	$\text{CH}_3\text{Br}$	1

# Découvertes scientifiques et actions politiques

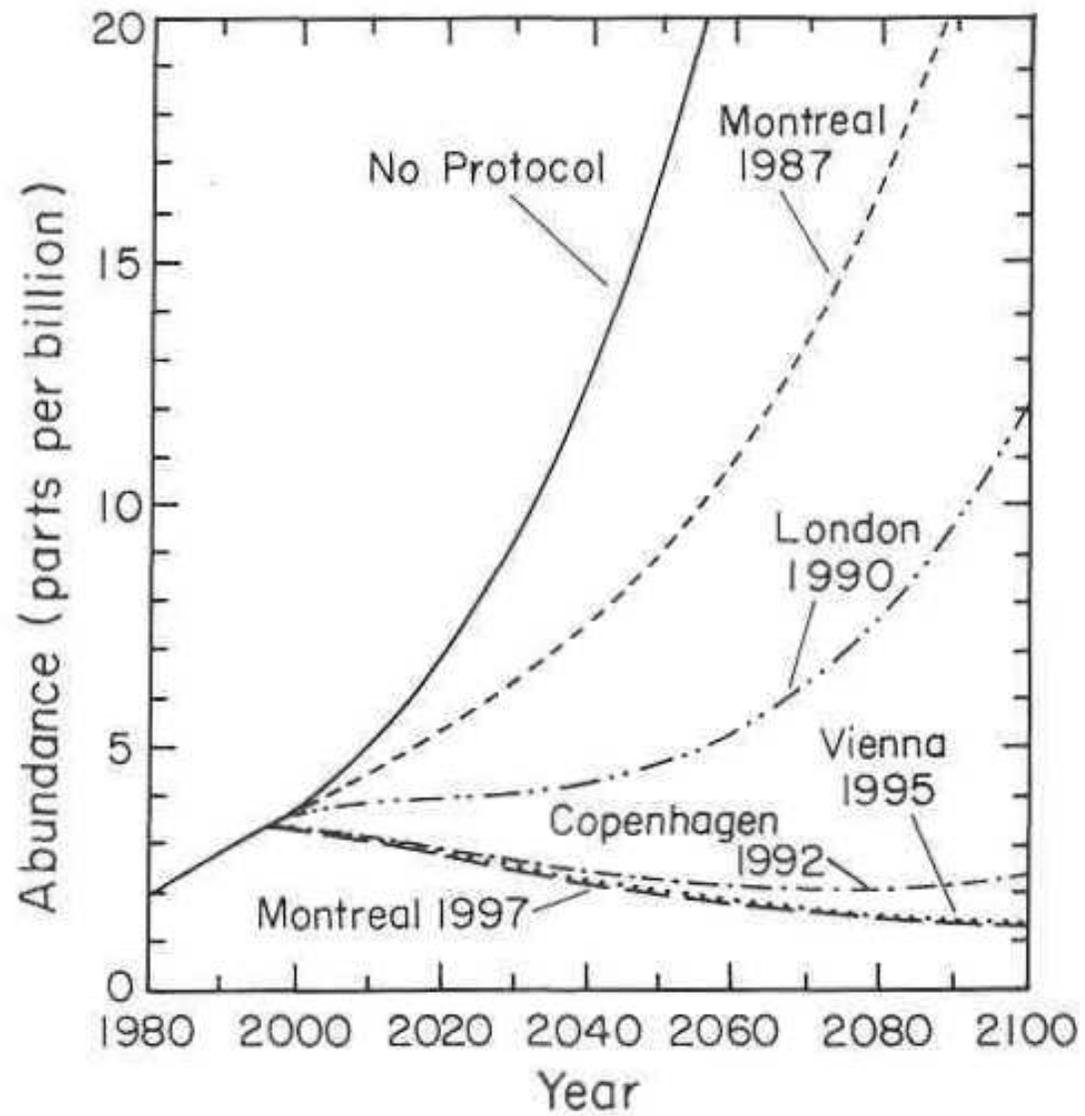
- Découverte du « trou » d'ozone fin des années 70
- 1<sup>er</sup> Protocole de Montréal en 1987 visant l'arrêt de production des CFC
- Succession de protocoles jusqu'en 2007 visant à arrêter la production de toutes les substances nocives pour la couche d'ozone.

## Délais pour la production et la consommation de substances appauvrissant l'ozone

Définies dans les phases d'élimination progressive du Protocole de Montréal

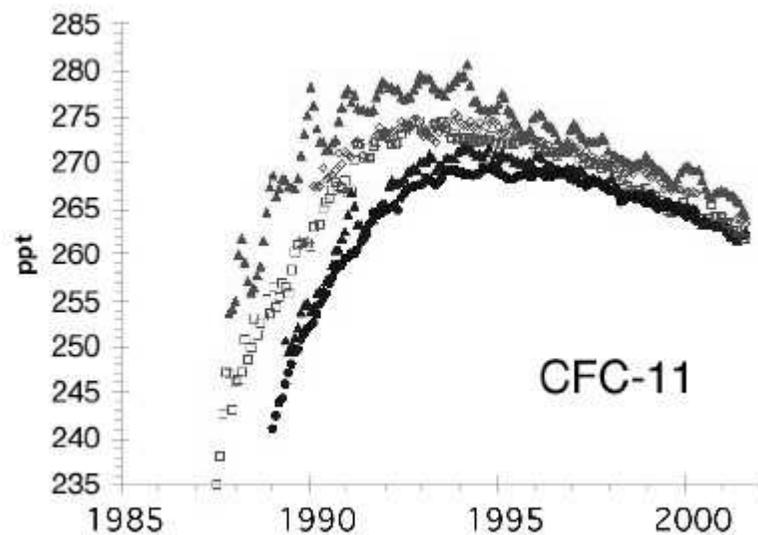


# Prévision des concentrations des CFC

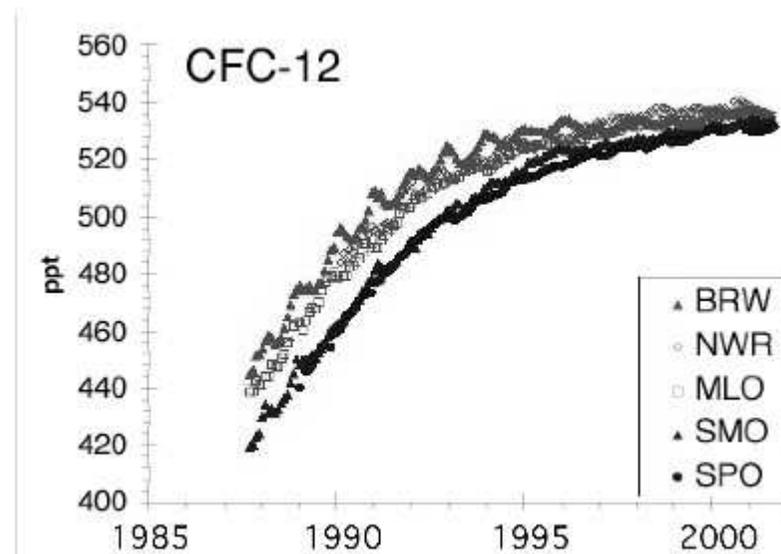


# Répercussions des protocoles sur les concentrations atmosphériques

- Les CFC sont interdits depuis 1987 (protocole de Montréal)
- Leurs durée de vie (50-100ans) impliquent que leurs concentrations atmosphériques ne diminuera que vers 2050...

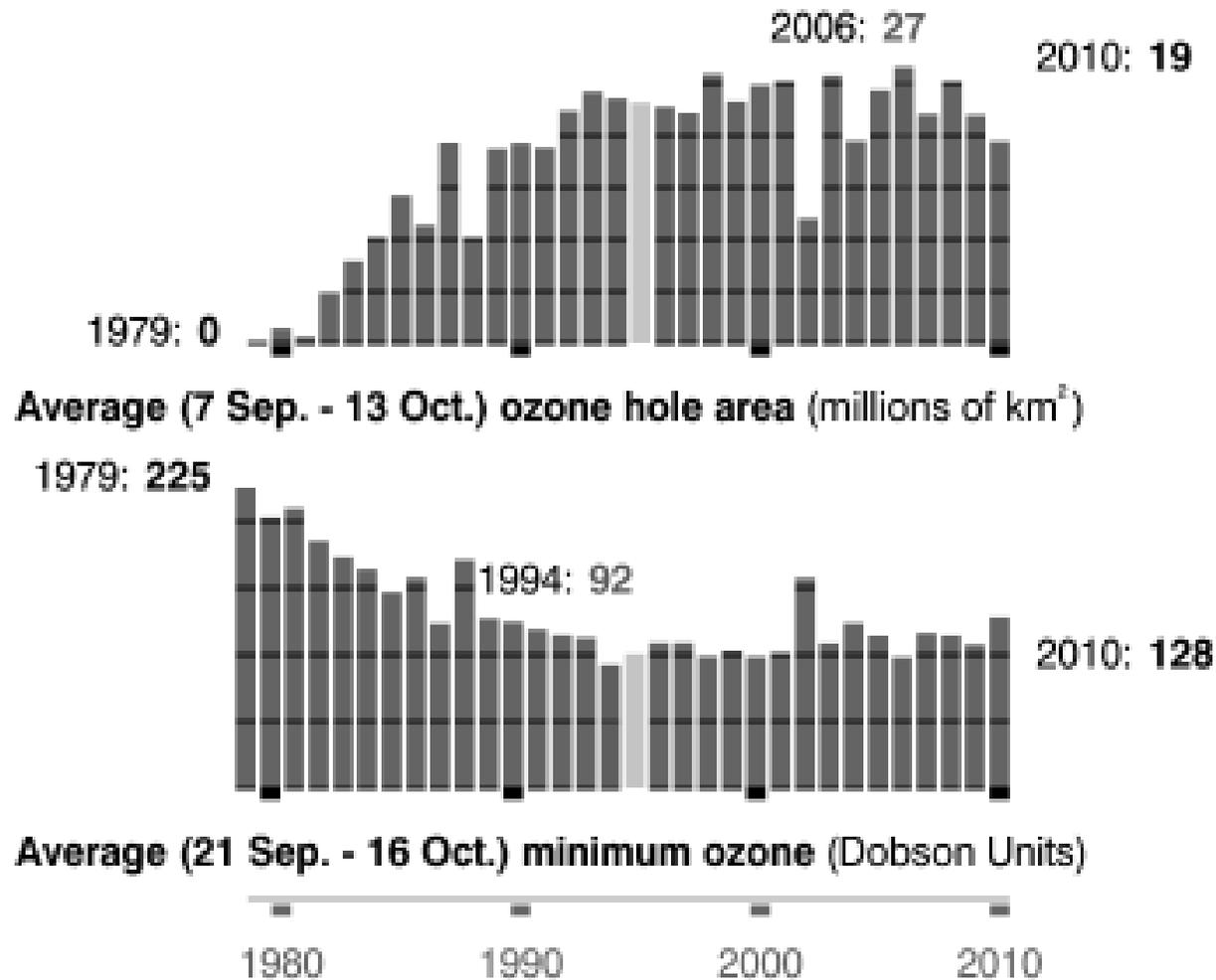


**CCl<sub>3</sub>F**  
(durée de vie 45 ans)



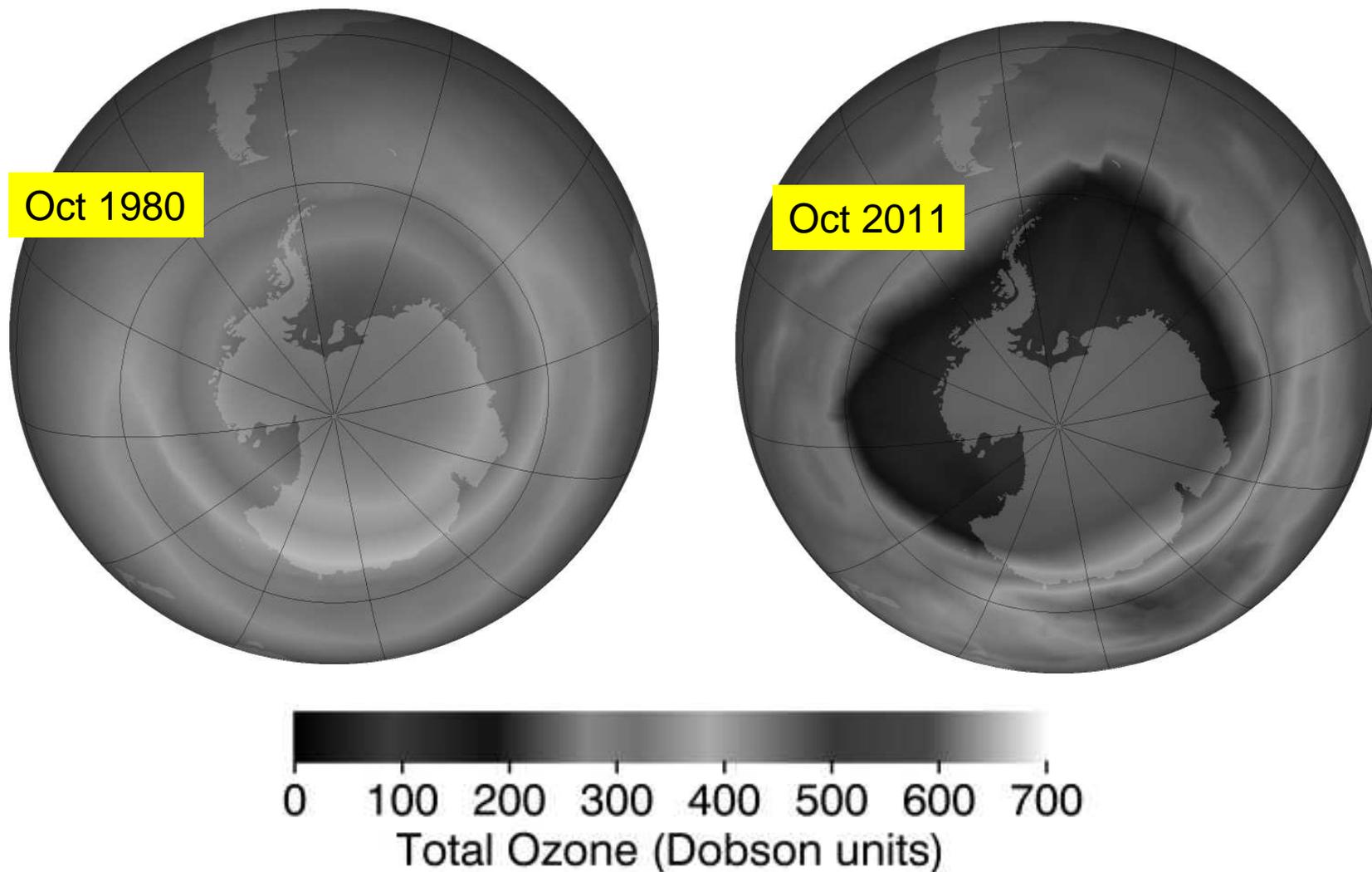
**CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>**  
(durée de vie 100 ans)

# L'évolution du trou dans la couche d'ozone...



**Note:** No data were acquired during the 1995 season

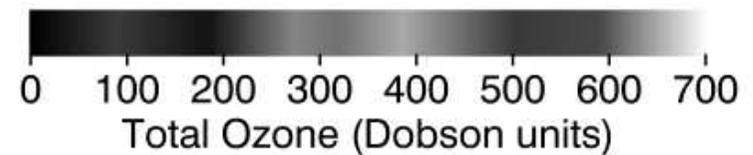
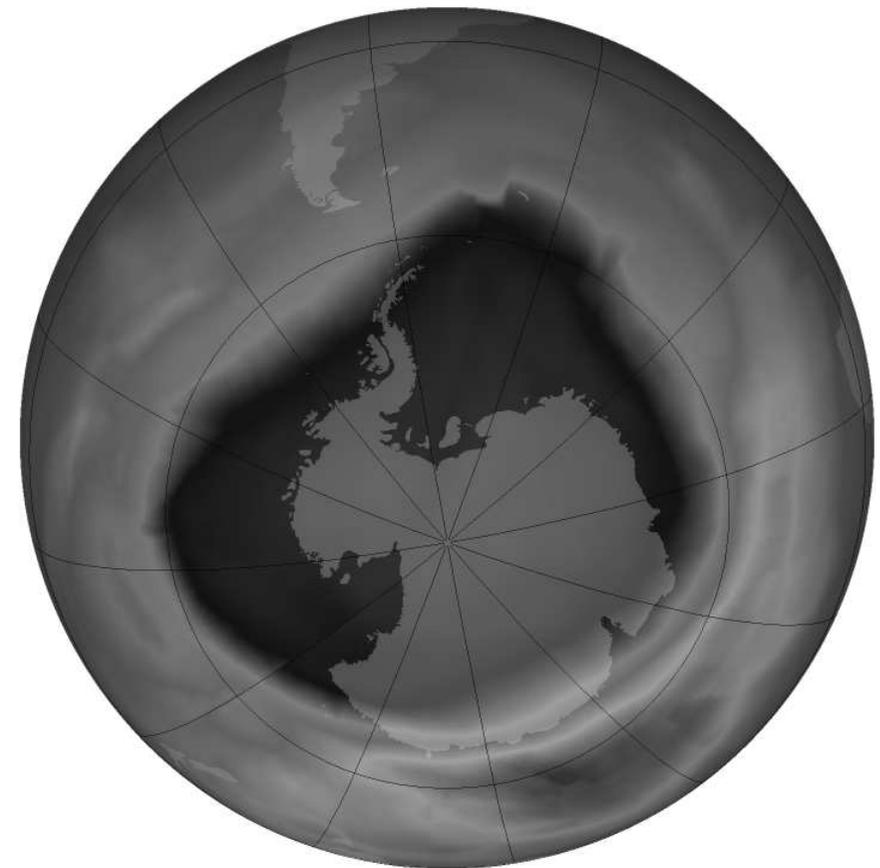
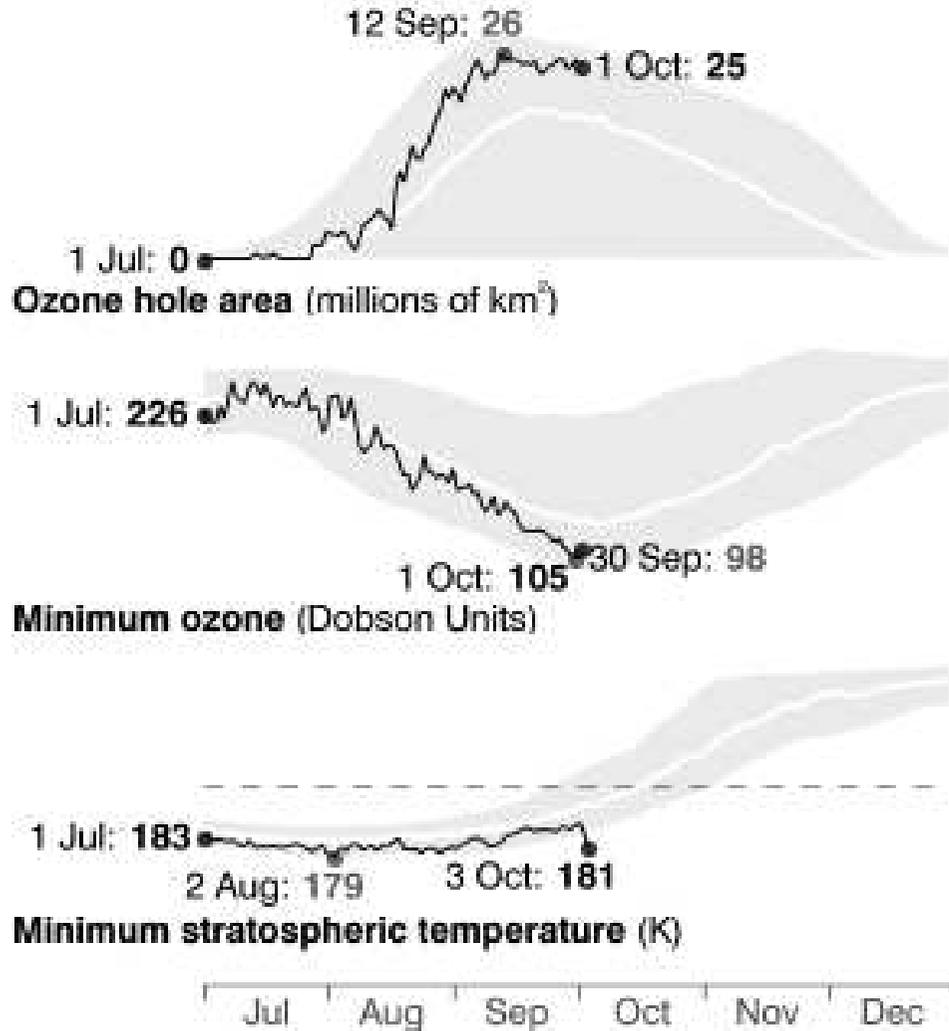
# L'évolution du trou dans la couche d'ozone...



# Le futur...

- **Remplacement provisoire des CFC par les HCFC**
  - espèces chimiques plus réactives : plus facilement détruites avant d'atteindre la stratosphère
  - MAIS... ce sont des puissants gaz à effet de serre... le problème environnemental est donc déplacé
  - Arrêt de la production d'ici à 2020
  
- **Reconstitution totale de l'ozone au pôle sud prévu vers 2070 mais...**
  - Mauvaise gestion de vieux matériel réfrigérant contenant des CFC
  - Equilibre stratosphérique initial sera t'il rétabli ?

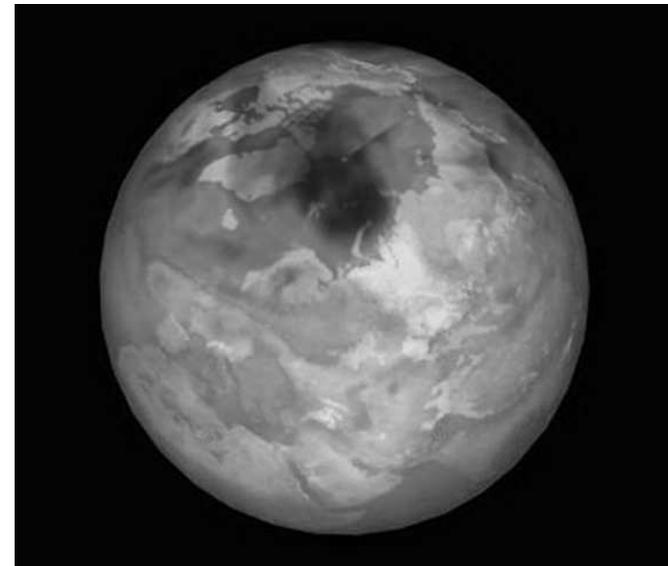
# Le trou de la couche d'ozone le 01 octobre 2011..



<http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>

# Trou d'ozone en arctique au printemps 2011...

Provoqué par un froid exceptionnel au pôle Nord, ce trou record s'est déplacé durant une quinzaine de jours au-dessus de l'Europe de l'Est, de la Russie et de la Mongolie, exposant parfois les populations à des niveaux élevés de rayonnements ultraviolets



**Unprecedented Arctic ozone loss in 2011, article  
Nature, publié le 02 oct 2011**

<http://www.nature.com/nature/journal/vaop/ncurrent/full/nature10556.html#/>