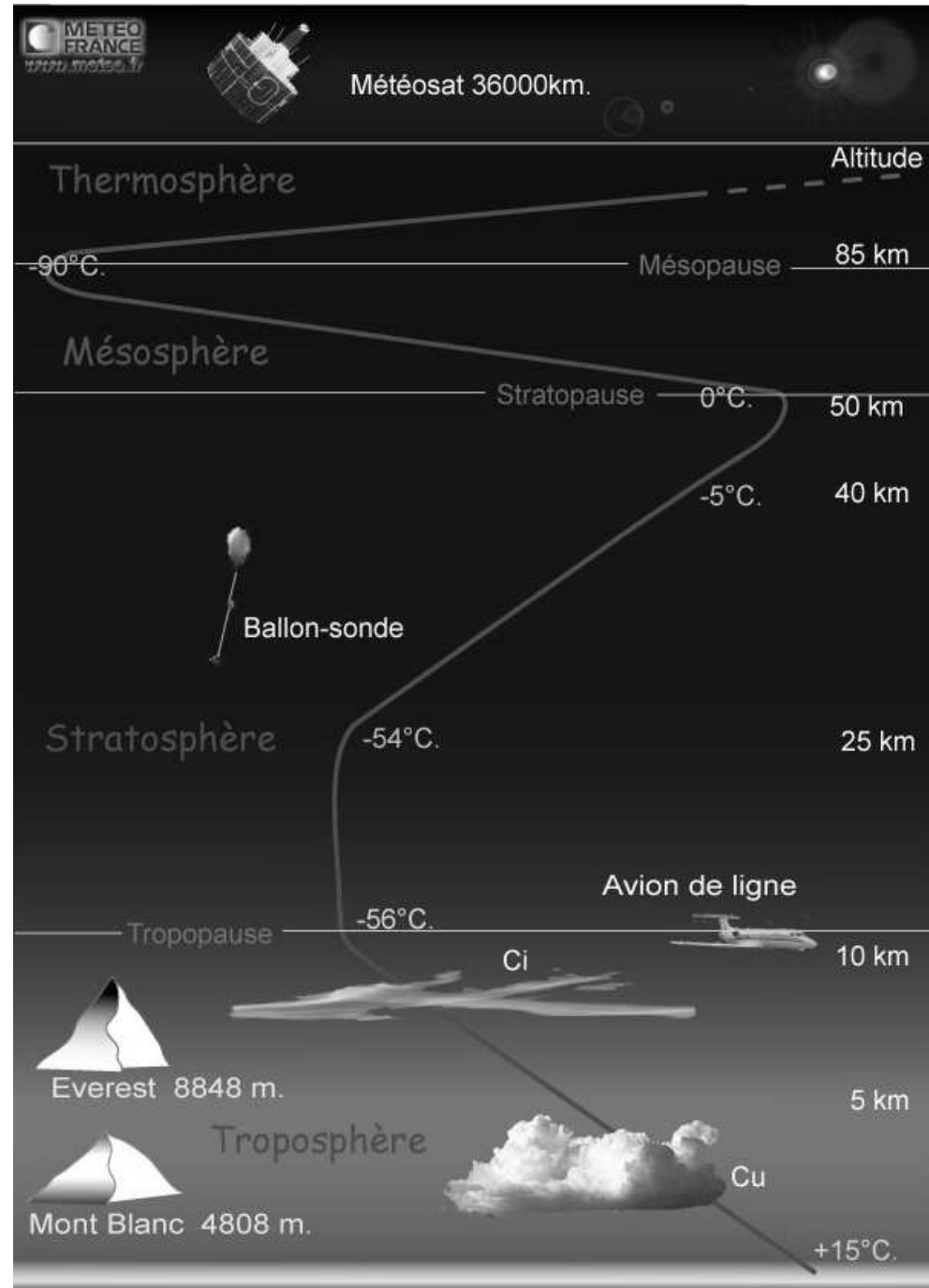


La chimie atmosphérique...



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



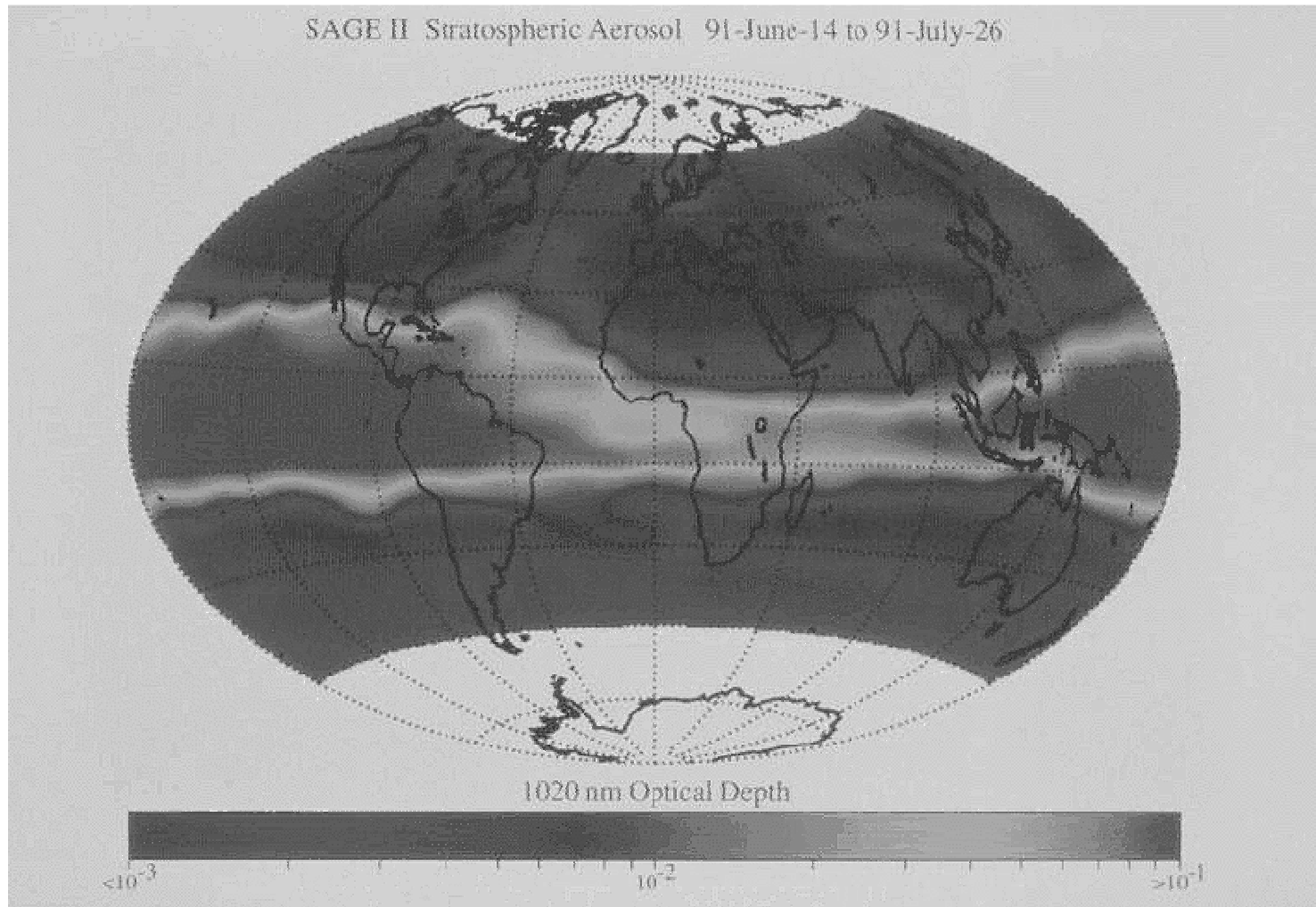
Image prise de la terre



Image prise par la navette Atlantis

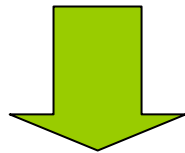


Le volcan Pinatubo...

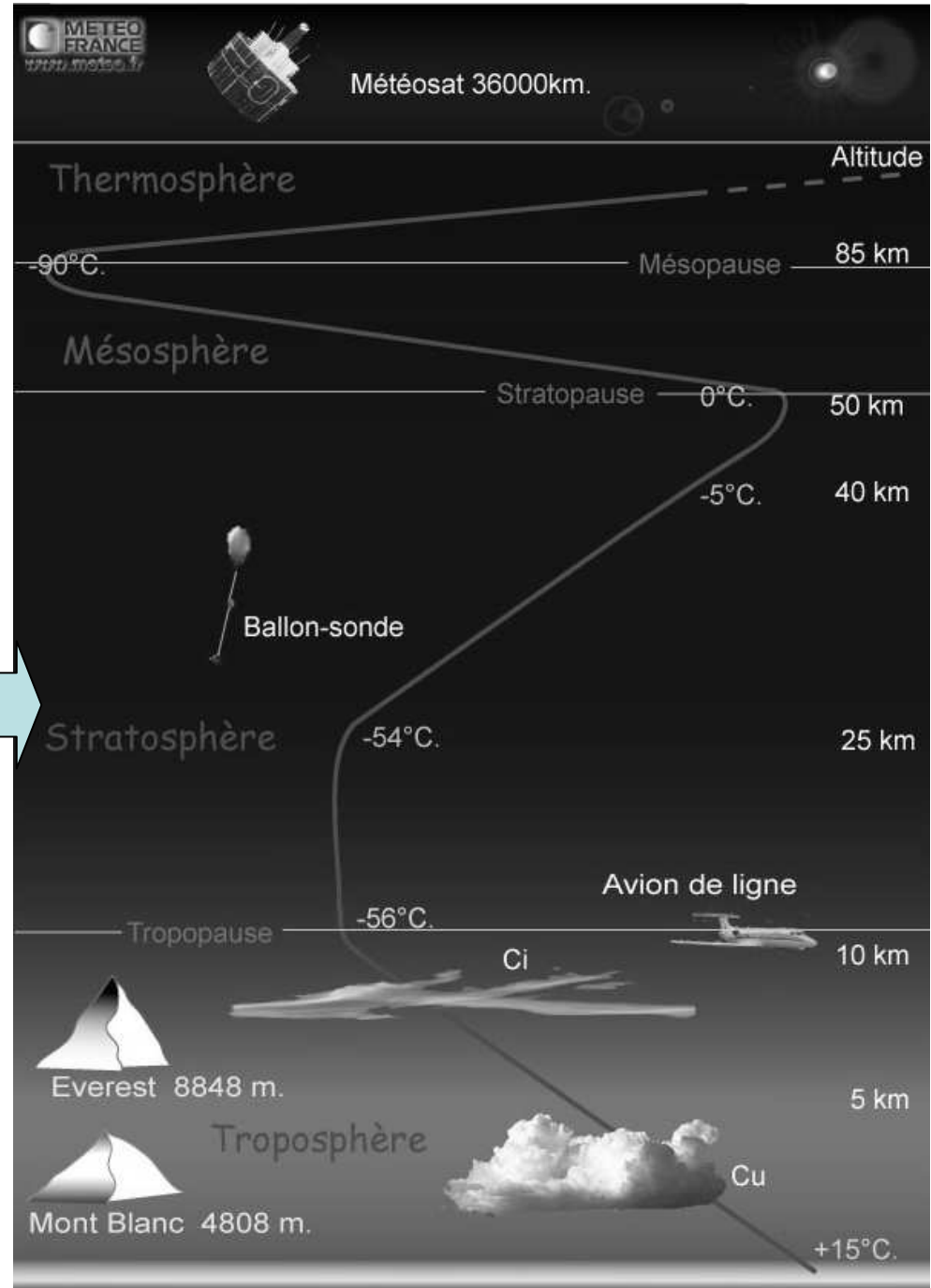


Régions et caractéristiques de l'atmosphère

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



présence d'ozone (O_3)



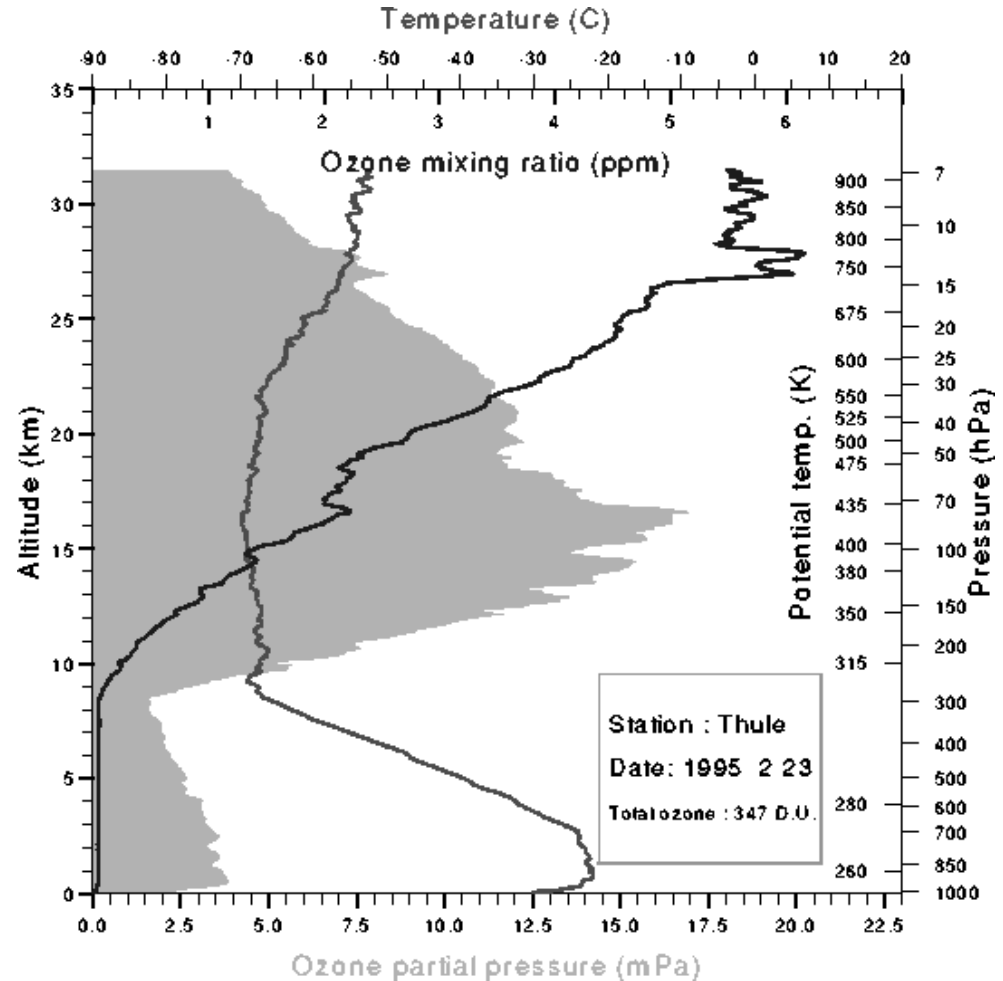
La couche d'ozone...

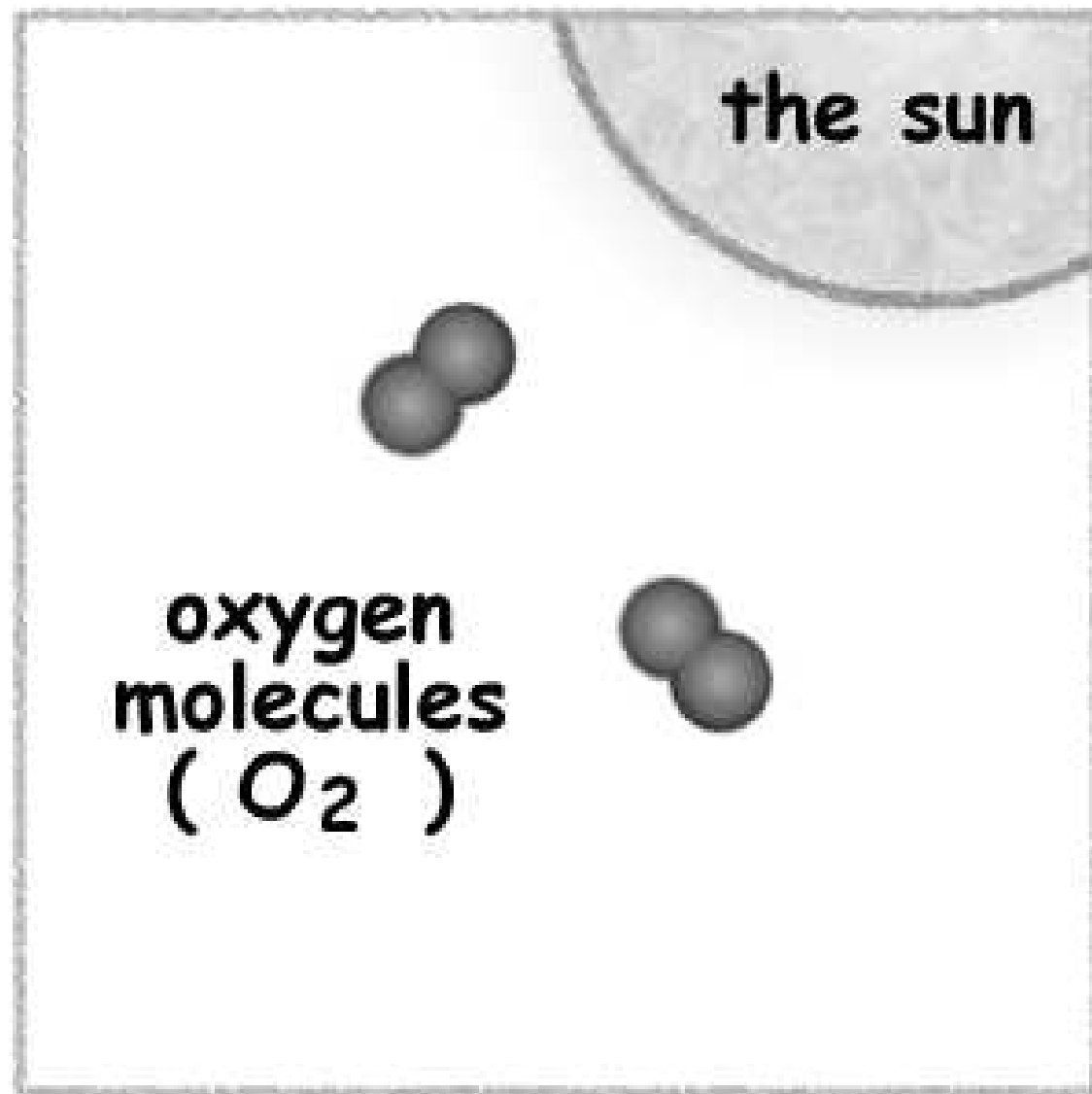


Sir Chapman, 1930
"A theory of upper-atmosphere ozone,
Mem. Roy. Meteorol. Soc."

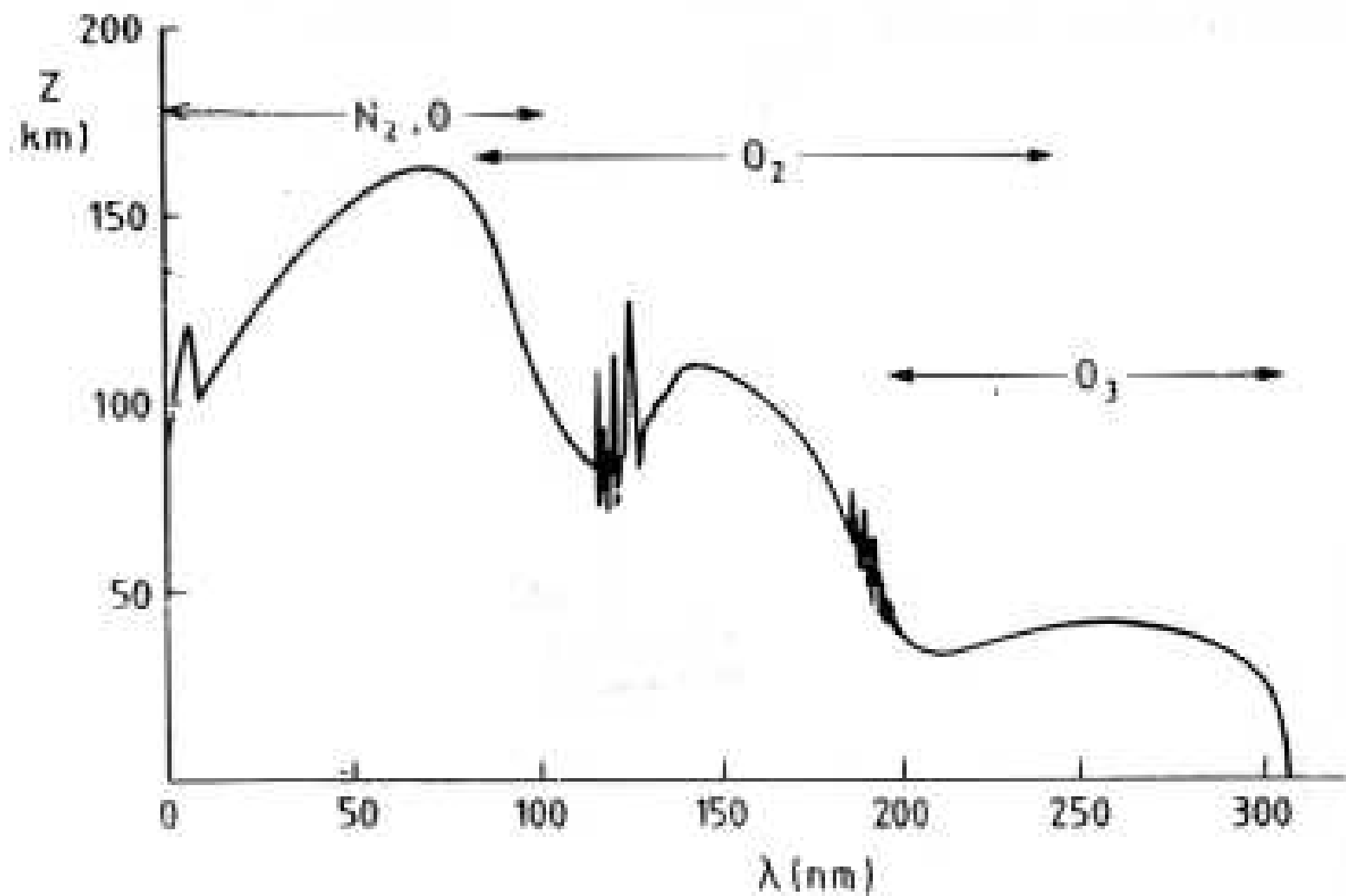
Cycle de Chapman

- $O_2 + h\nu \Rightarrow 2O\cdot$ (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)

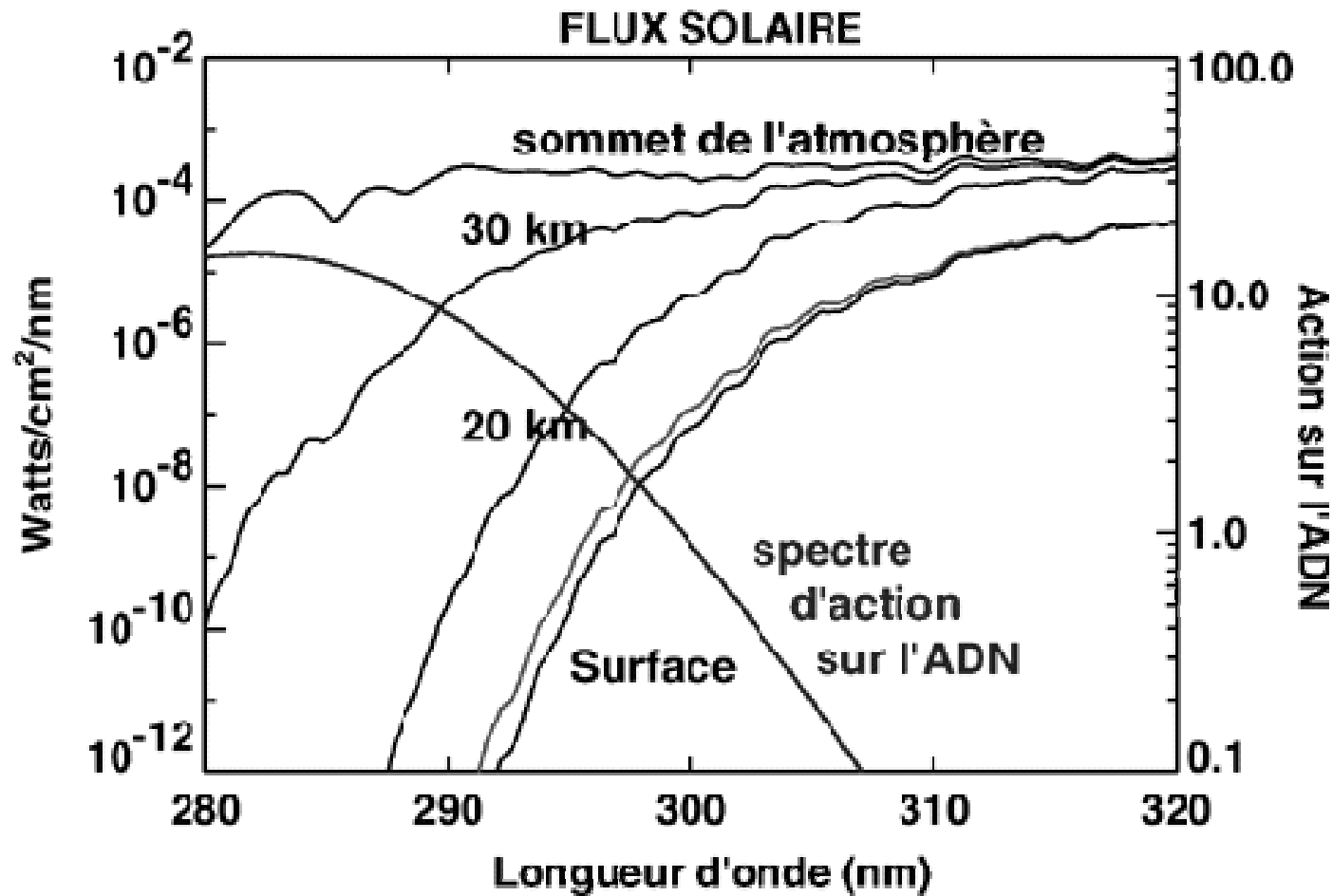




L'ozone absorbe les UV...

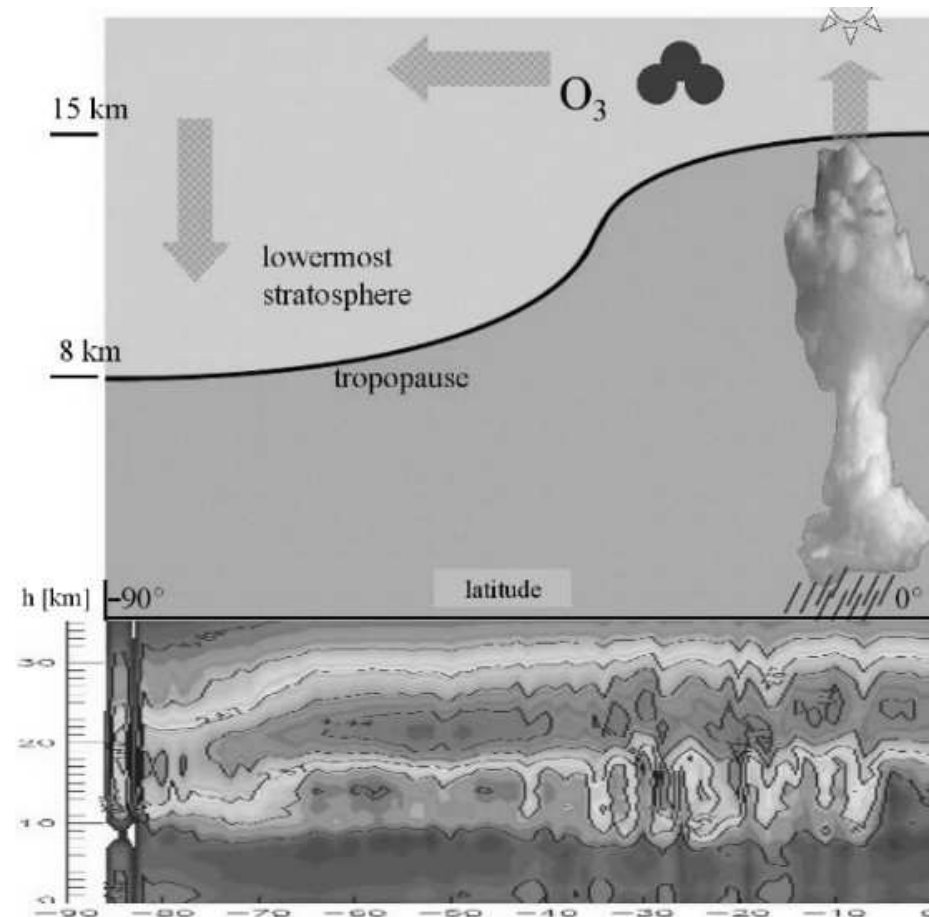


L'O₃ protège la vie..



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

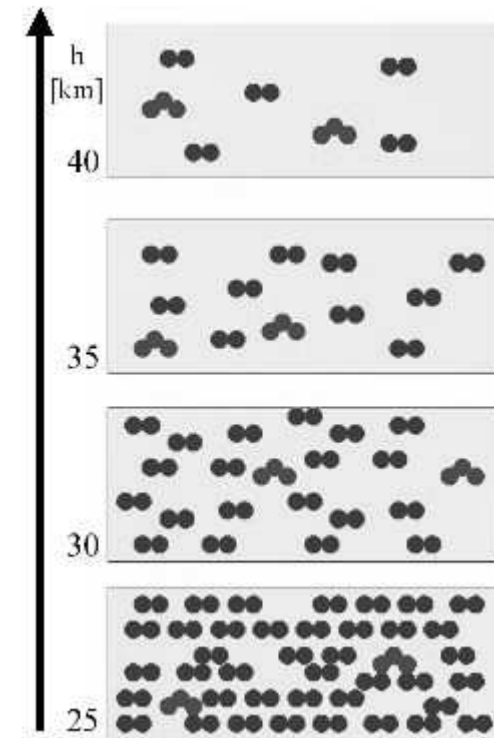
- Rayons solaires plus fort aux tropiques
 - majorité de l'ozone se forme à l'équateur mais ne s'accumule pas
- Circulation atmosphérique provoque accumulation de l'ozone aux pôles (moins d'ensoleillement)

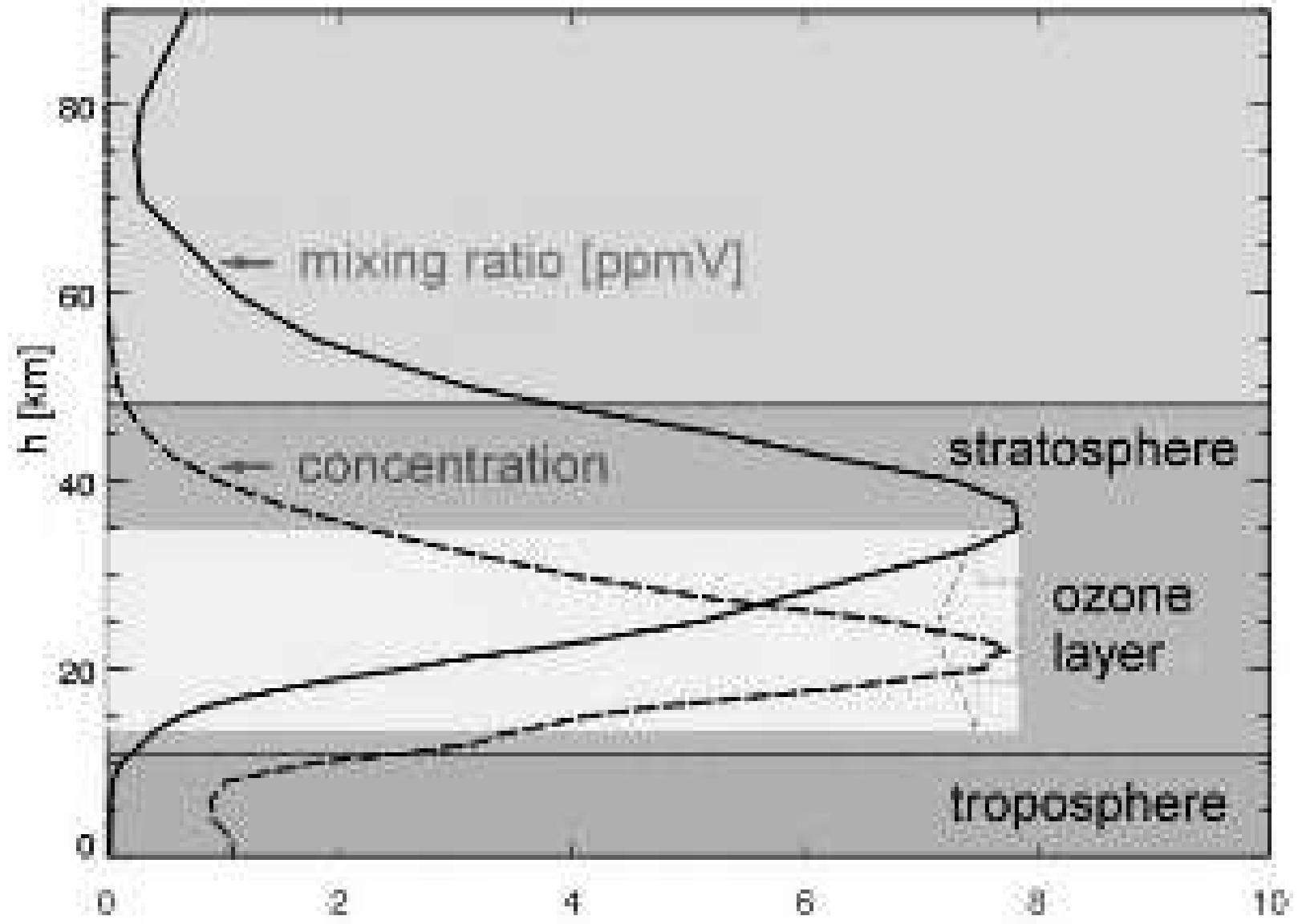


Les unités atmosphériques...

- Unités générales

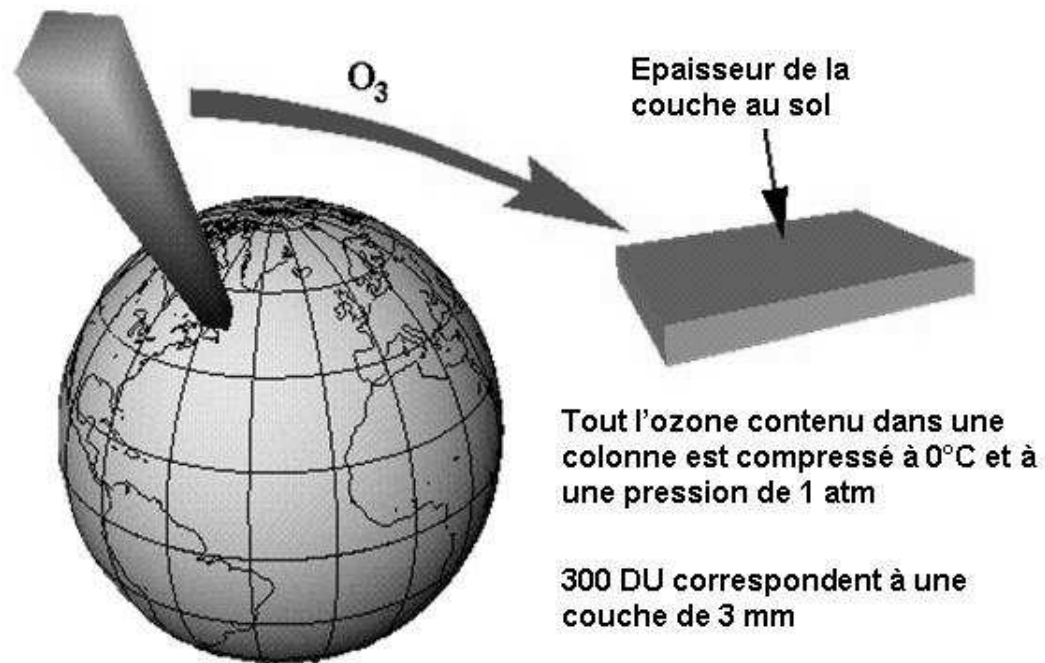
- **concentration** = c est la masse des molécules d'un composé contenue dans un certain volume d'air. Exemple : $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (quantité absolue)
- **rapport de mélange** = c est la fraction du composé parmi toutes les molécules d'air. Exemple : S'il y a 40 molécules d'ozone dans 1 million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

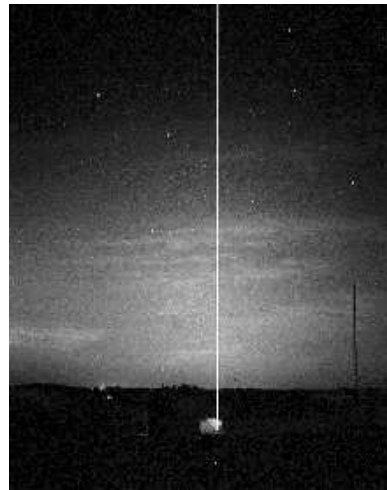


Comment on mesure la composition de la stratosphère...

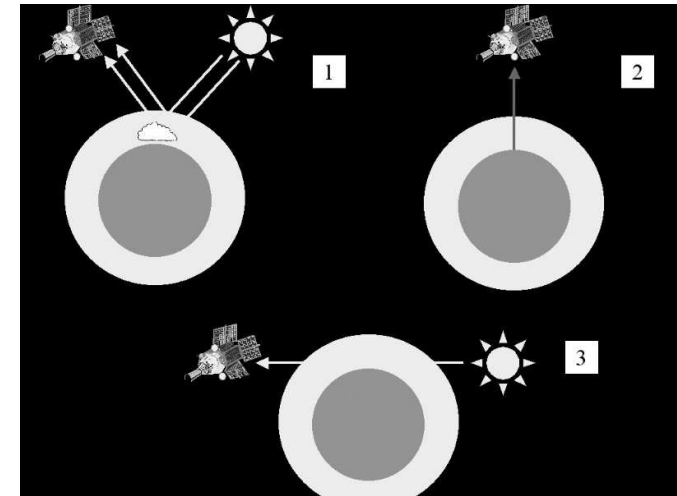
- Ballon sonde



LIDAR

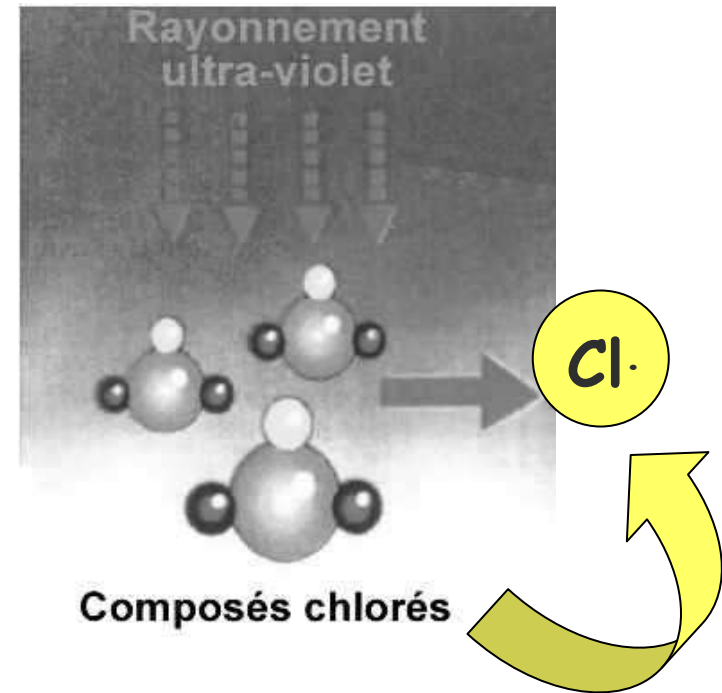


Satellite



Le « trou » dans la couche d'ozone...

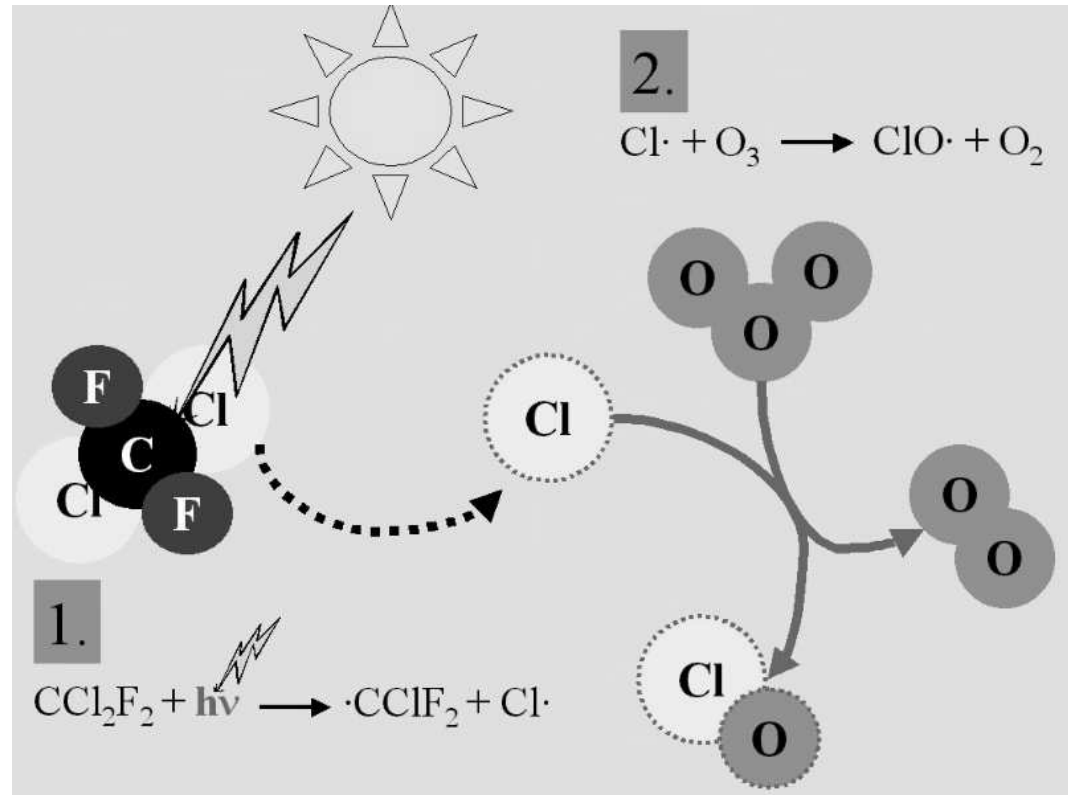
- Observation depuis une vingtaine d'années au dessus des pôles d'une forte diminution de la couche d'ozone à une période de l'année bien précise (printemps polaire)
- Cette diminution semble être attribuée à la présence de composés halogénés (CFC) dans l'atmosphère émis par l'homme (systèmes réfrigérants, 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

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



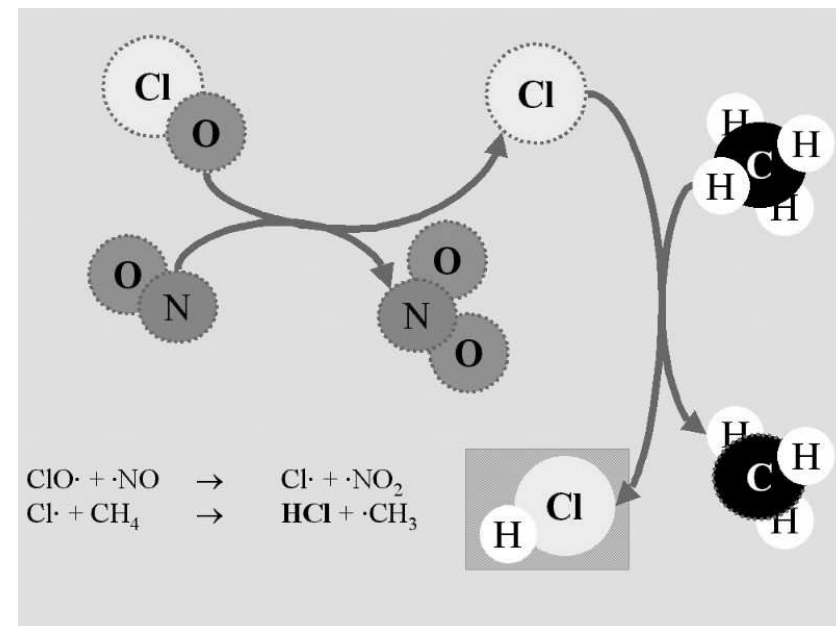
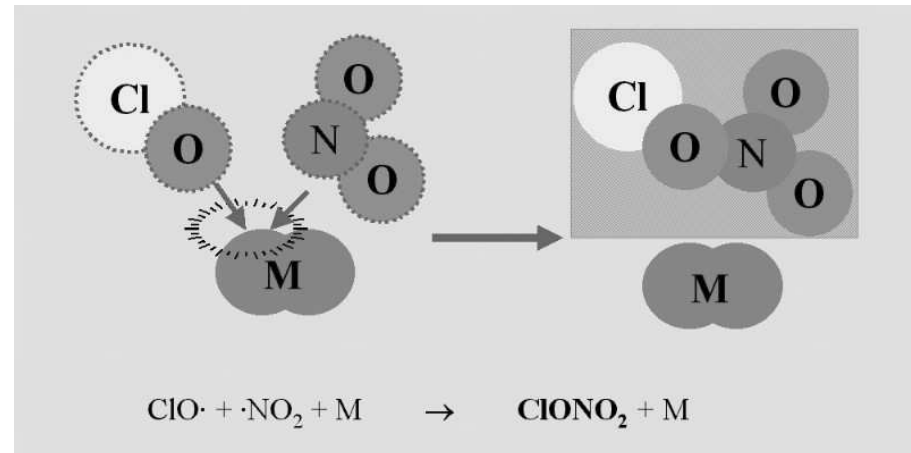


the sun

Stratosphere

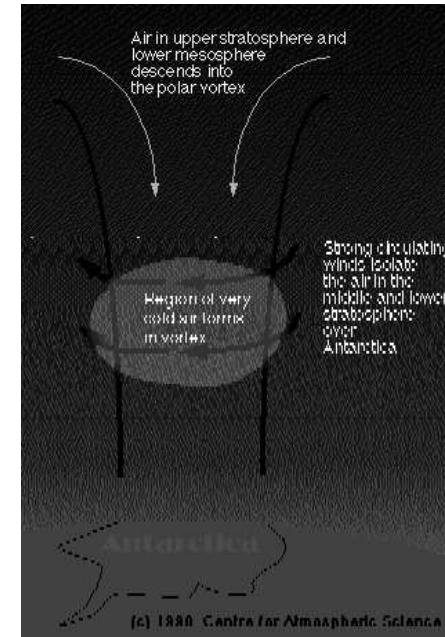
Formation des espèces réservoirs de Cl

- Le radical $\text{Cl}\cdot$ n'est pas nécessairement réutilisé dans le cycle de destruction de 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 ClONO_2 et 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°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)

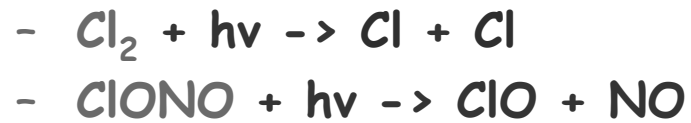


HCl , ClONO_2 : espèces neutres réservoirs de Cl

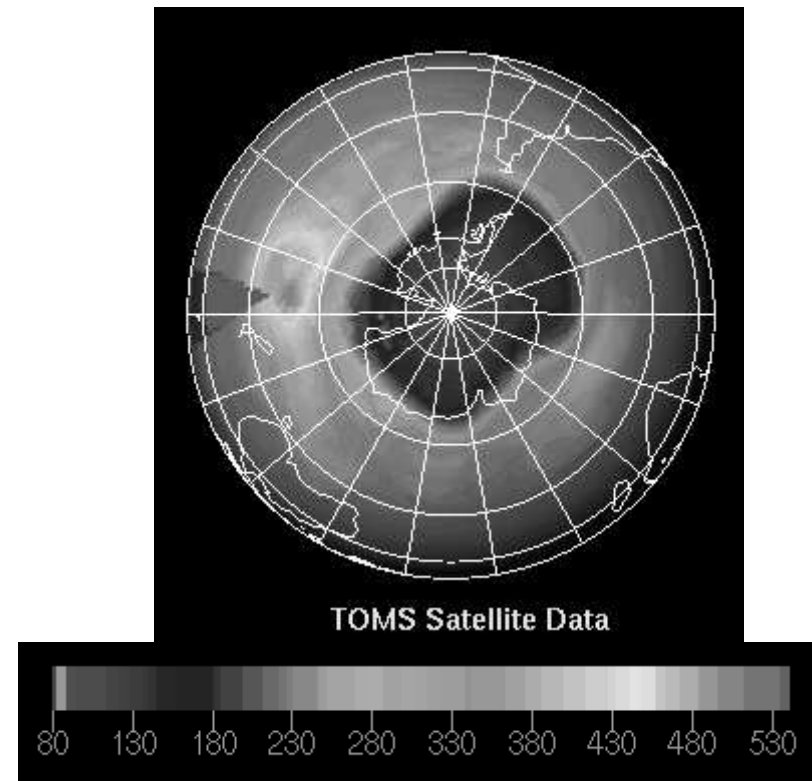
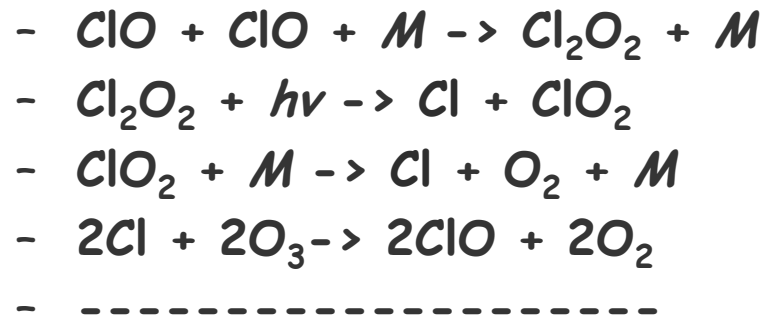
Cl_2 , ClONO : espèces réactives de Cl

Le trou dans la couche d'ozone...

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

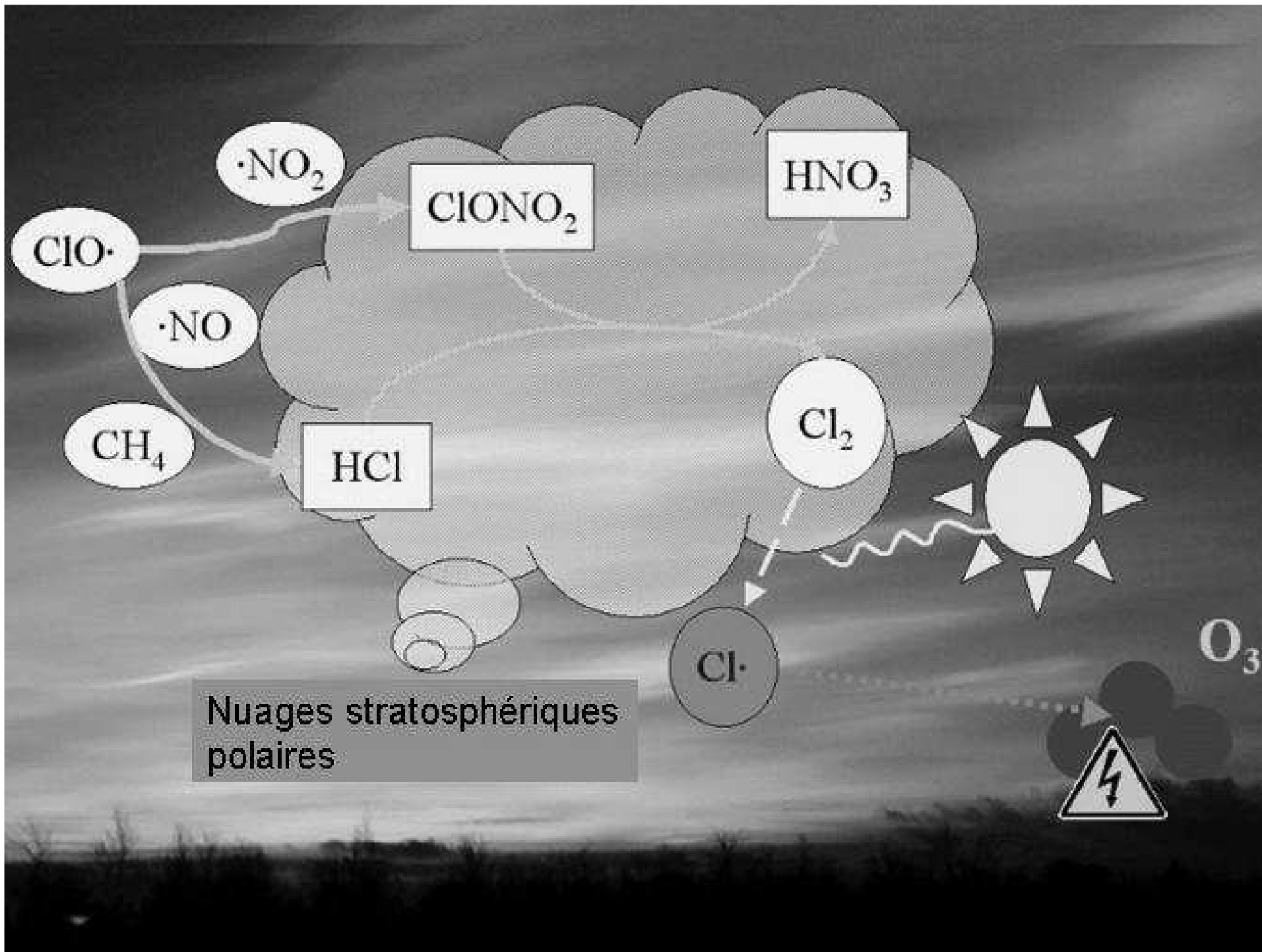


- Cycle de destruction de l'ozone



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...

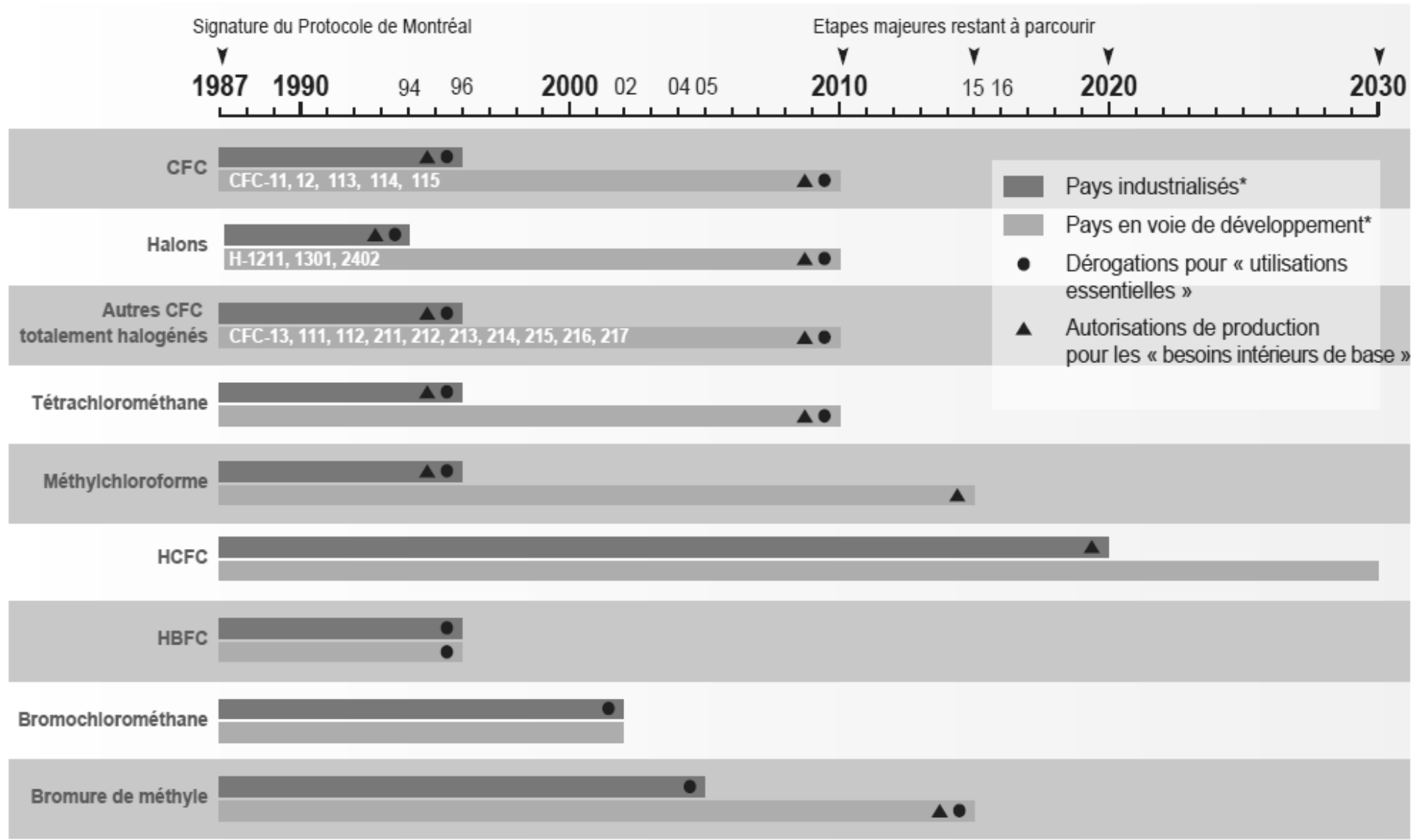
| Espèce | Symbole | Temps de vie |
|----------------------------------|------------------------------|--------------|
| Chlorofluorocarbures (CFC) | | |
| CFC-11 | CCl_3F | 45 |
| CFC-12 | CCl_2F_2 | 100 |
| CFC-13 | CClF_3 | 640 |
| CFC-113 | $\text{CCl}_2\text{FCClF}_2$ | 85 |
| CFC-114 | CF_3CClF_2 | 300 |
| Hydrochlorofluorocarbures (HCFC) | | |
| HCFC-21 | CHCl_2F | 2 |
| HCHC-22 | CHClF_2 | 11.9 |
| HCFC-123 | CF_3CHCl_2 | 1.4 |
| Hydrofluorocarbures (HFC) | | |
| HFC-23 | CHF_3 | 260 |
| HFC-32 | CH_2F_2 | 5 |
| HFC-41 | CH_3F | 2.6 |
| Bromure de méthyle | CH_3Br | 1 |

Découvertes scientifiques et actions politiques

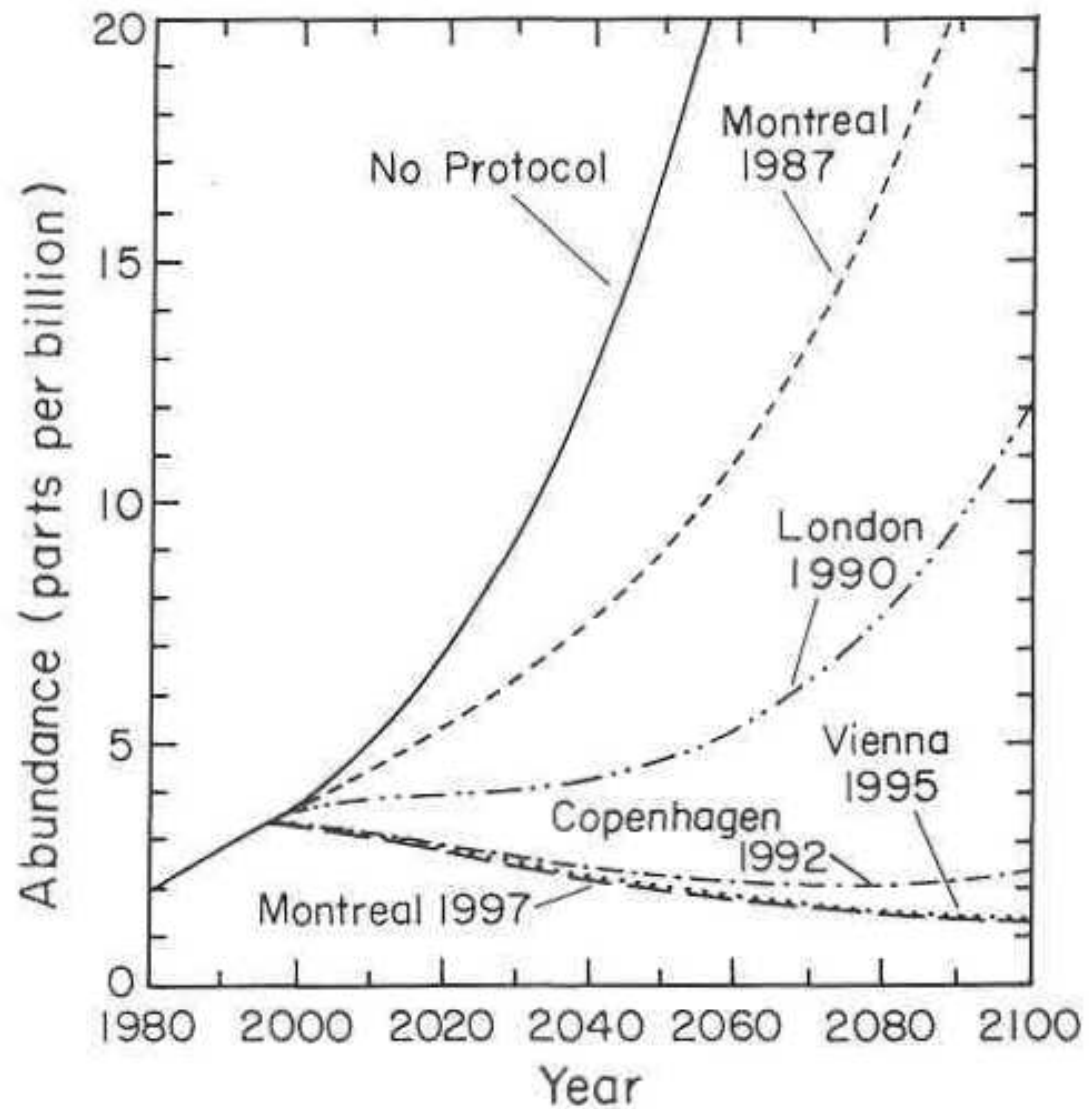
- Découverte du « trou » d'ozone fin des années 70
- 1^{er} Protocole de Montréal en 1987 visant l'arrêt de production des CFC
- Succession de protocoles jusqu'en 2007 visant à arrêter la production de toutes les substances nocives pour la couche d'ozone.

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

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

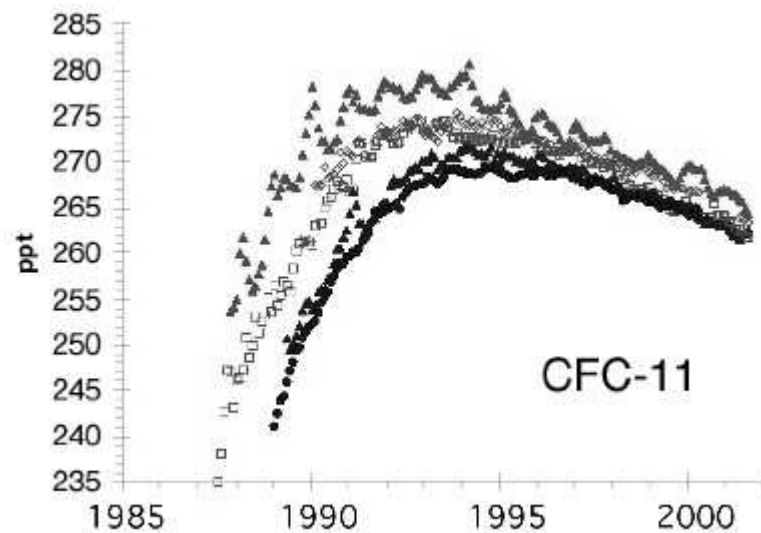


Prévision des concentrations des CFC

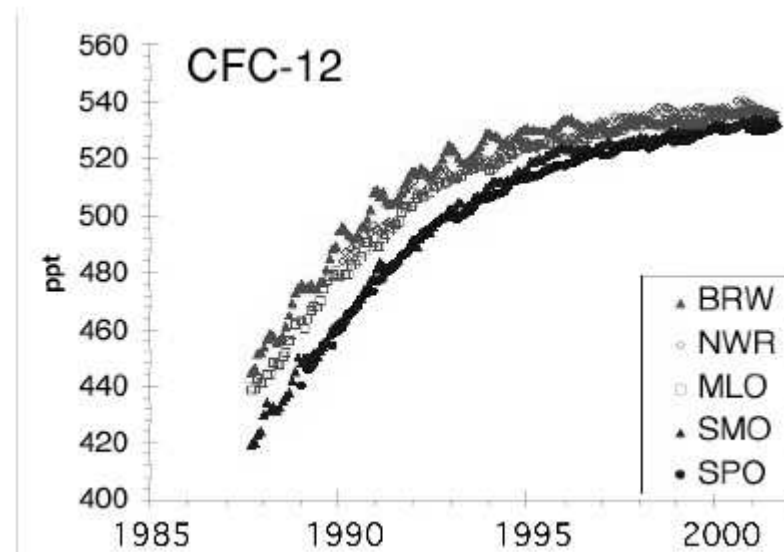


Répercussions des protocoles sur les concentrations atmosphériques

- 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...

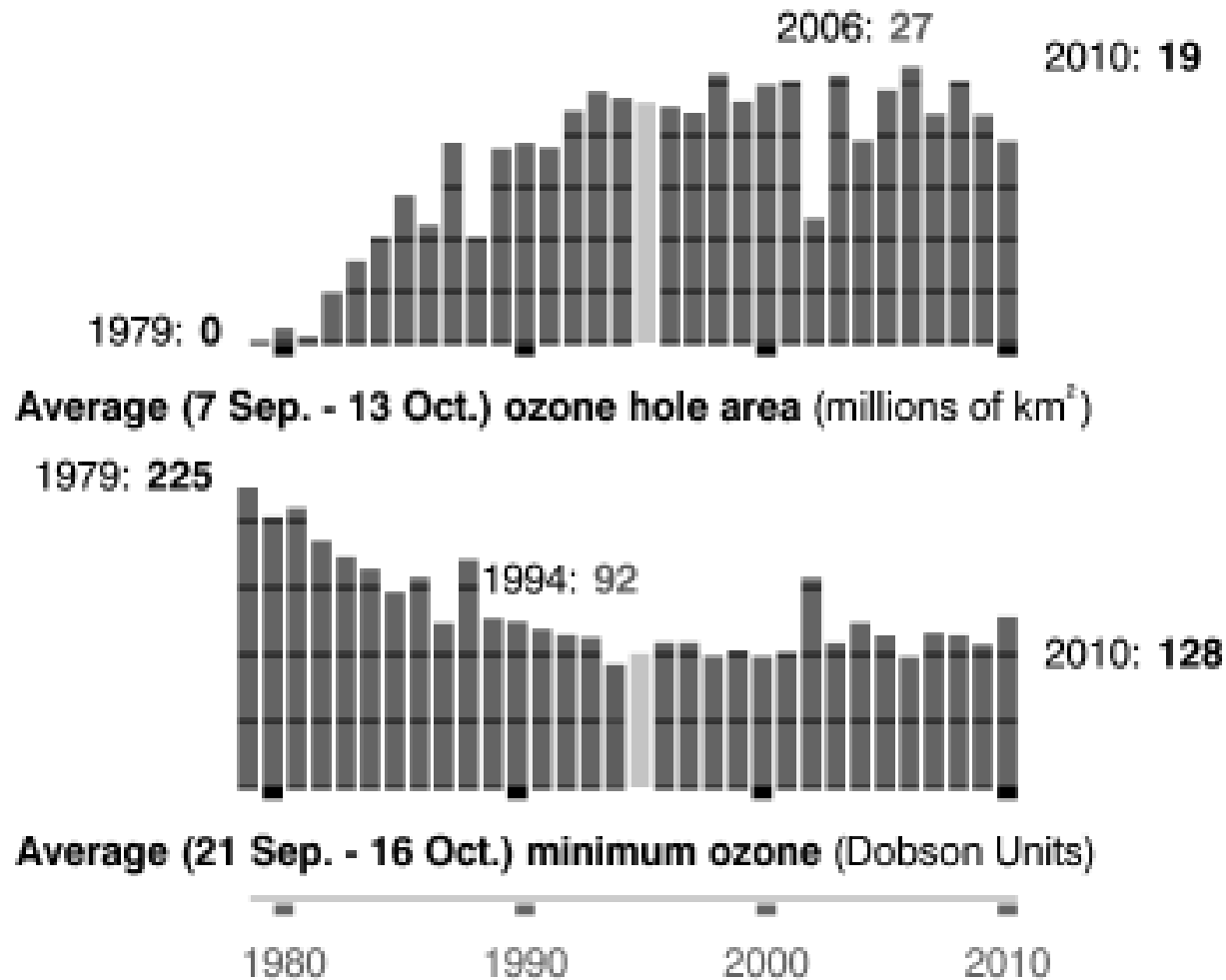


CCl₃F
(durée de vie 45 ans)



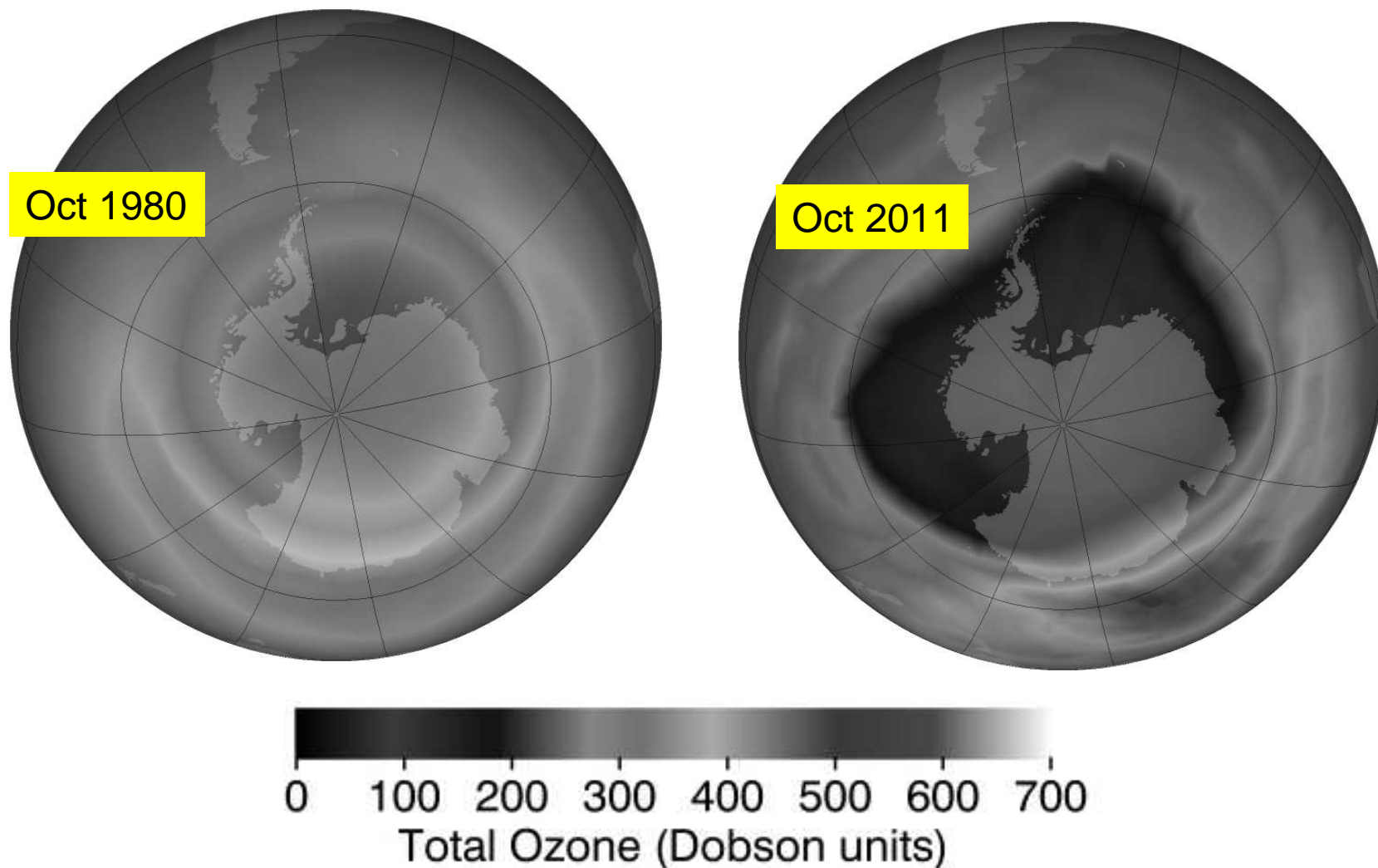
CCl₂F₂
(durée de vie 100 ans)

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...

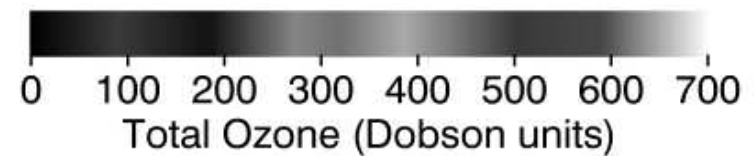
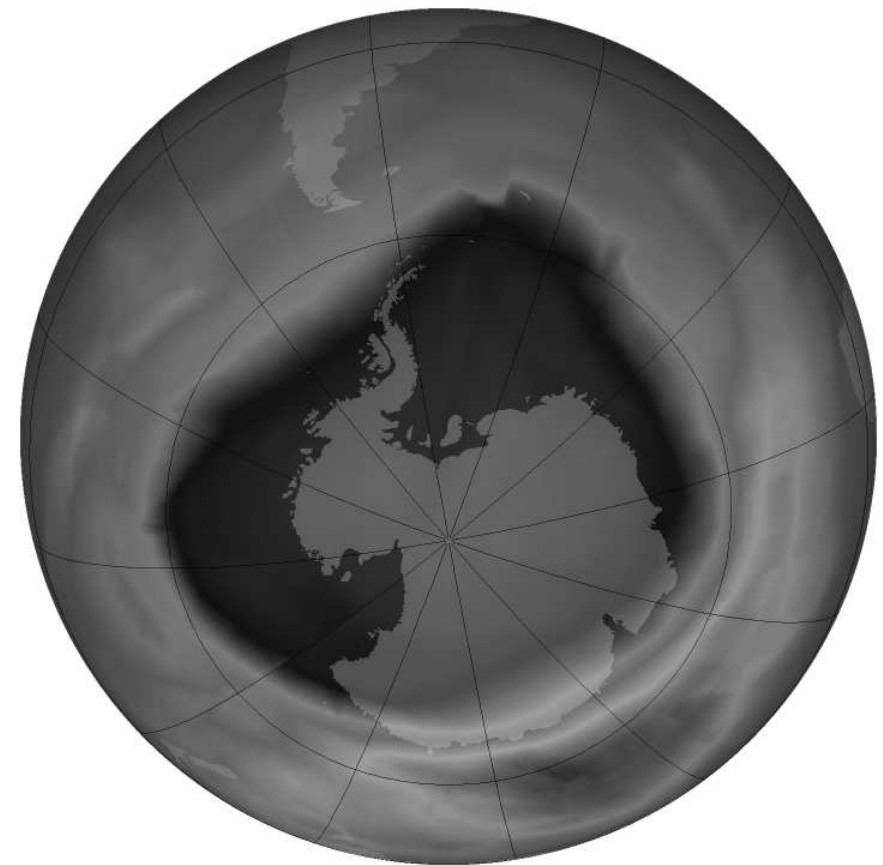
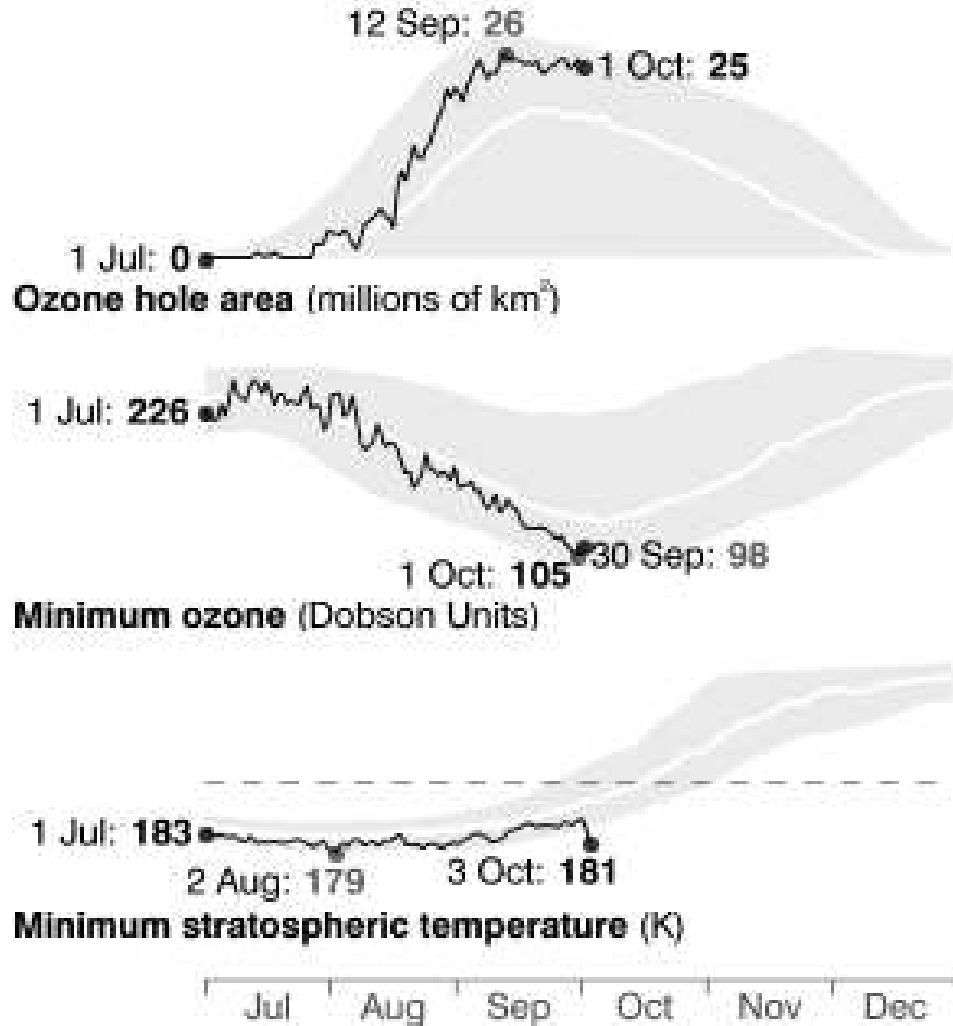


Le futur...

- **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 ?

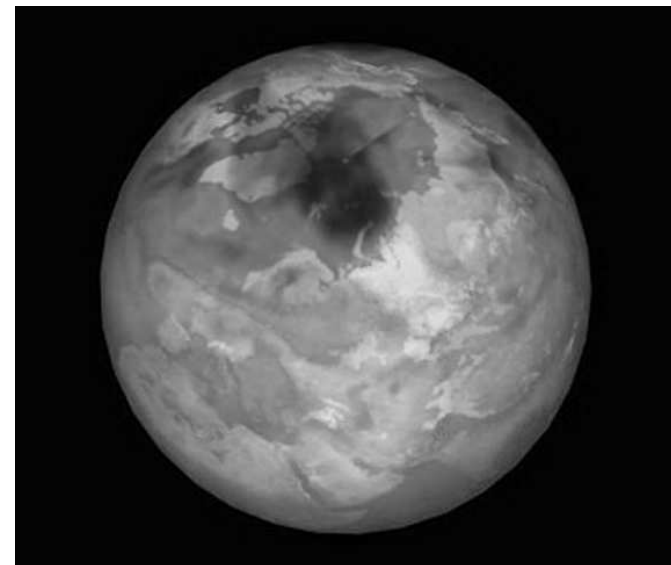
Le trou de la couche d'ozone le 01 octobre 2011..



<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#/>