

# L'ozone



Laurent Borrel (ENM/RP), Yann Esnault (SaE)

# L'ozone, molécule bénéfique ou nocive ?

Depuis les années 1990, les scientifiques soulignent la fragilité de la couche d'ozone et son importance pour la vie sur Terre. Dans le même temps, les autorités sanitaires communiquent, surtout en période ensoleillée, sur les dangers de l'ozone pour la santé.

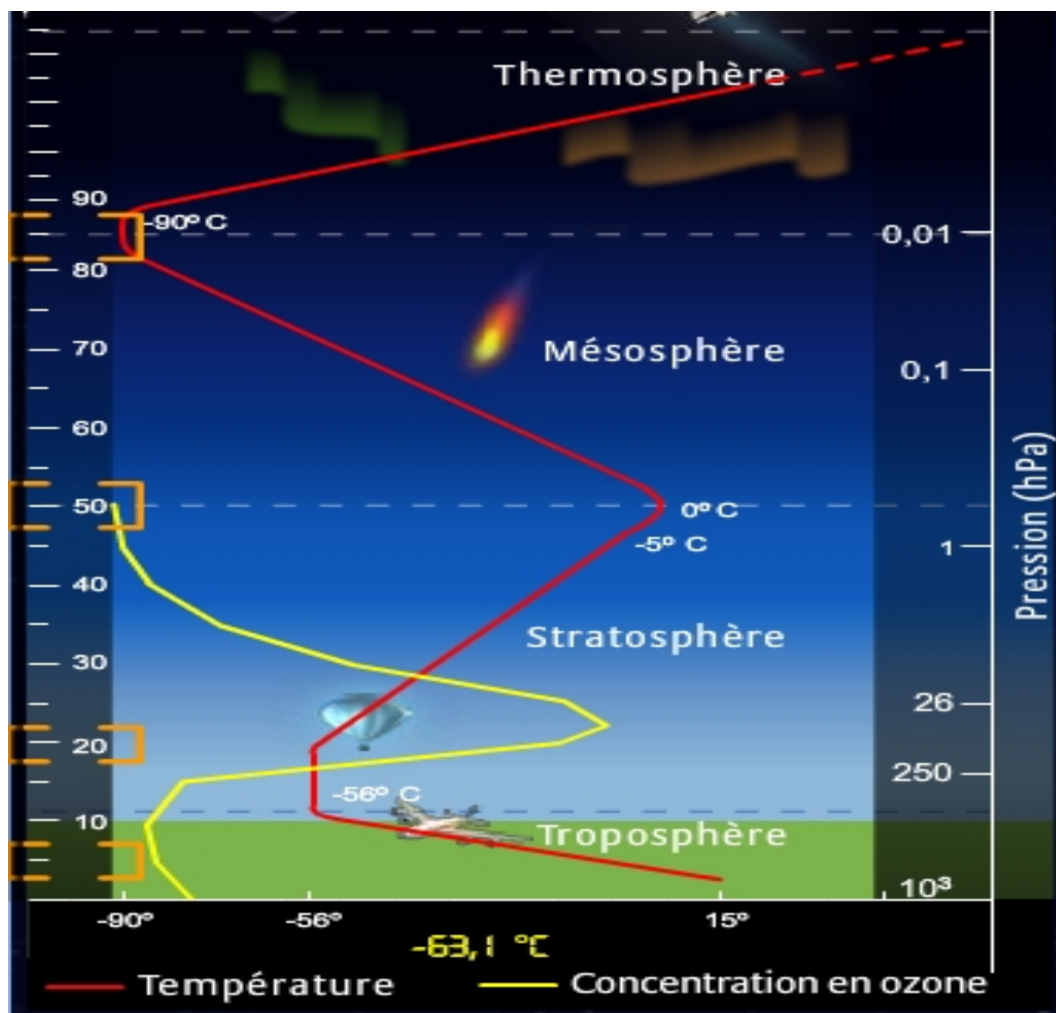
Existe-t-il donc un ozone favorable, un autre néfaste ?

Dans les deux cas, il s'agit bien de la même molécule composée de 3 atomes d'oxygène (formule chimique  $O_3$  ; à ne pas confondre avec le dioxygène,  $O_2$ !). Mais les effets de l'ozone ne sont pas les mêmes selon l'altitude où on le rencontre :

- l'ozone nous protège des rayons ultraviolets lorsqu'il se trouve en haute altitude (entre 15 et 25 km, dans la stratosphère) : on parle alors d'**ozone stratosphérique** (voir [l'animation sur le site Météo-Education](#))
- l'ozone est un oxydant très fort, dangereux s'il dépasse certaines concentrations dans les basses couches (**ozone troposphérique**), au contact des êtres vivants (voir [l'animation](#)). De plus, à ce niveau, sa capacité à capter le rayonnement devient un problème et il constitue alors un **gaz à effet de serre**.

# Répartition verticale de l'ozone

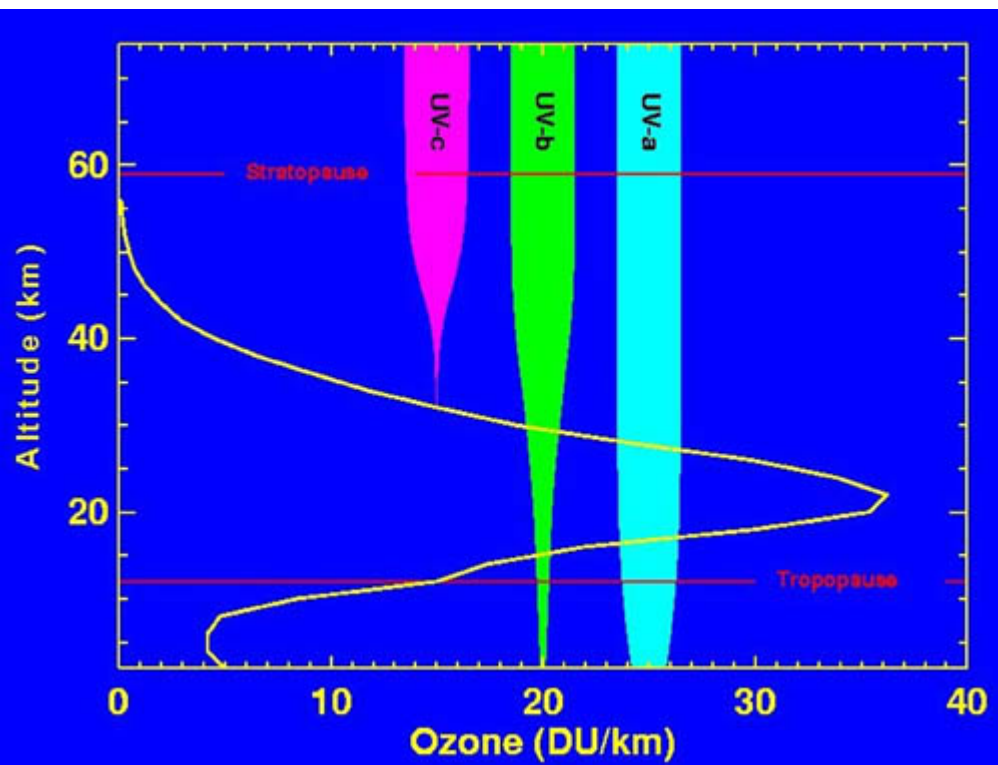
Le profil ci-dessous montre que l'ozone est principalement localisé dans la stratosphère (90% de l'ozone total).



Même dans la stratosphère, ce gaz reste un composant très minoritaire de l'atmosphère : 8 parties par million (ppm) dans la couche de la stratosphère où il est le plus abondant ! Comme cela est expliqué en annexe, on utilise une unité spécifique, l'unité Dobson, pour exprimer sa concentration.

# L'ozone stratosphérique, couche protectrice

L'ozone nous protège de la plupart des rayonnements ultraviolets (UV) émis par le Soleil. Plus ces rayonnements ont une longueur d'onde courte, plus ils sont énergétiques et plus ils sont dangereux pour nos cellules.



Les UVc, de plus courte longueur d'onde, sont entièrement arrêtés.

La majeure partie des UVb, principaux responsables des cancers de la peau et de son vieillissement, sont arrêtés.

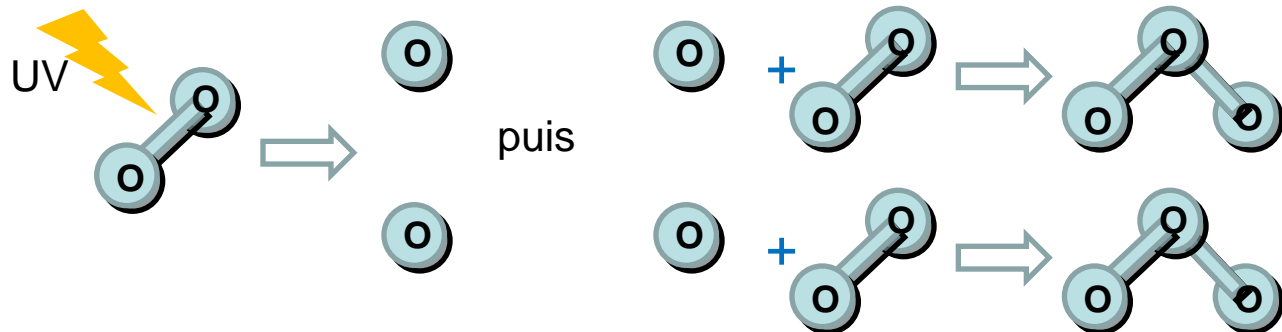
La majeure partie des UVa traversent.

**L'énergie de ces rayonnements, absorbée dans la stratosphère, se retrouve sous forme de chaleur.** C'est la raison pour laquelle, au dessus de la troposphère, la température cesse de diminuer et même augmente avec l'altitude (page précédente) !

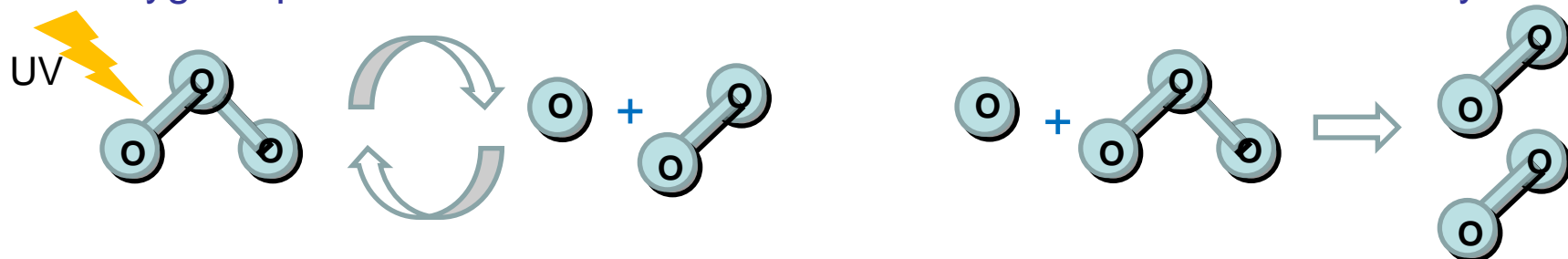
L'ozone est ici mesurée en unités Dobson (DU) par kilomètre : voir l'annexe à la fin du dossier pour des explications.

# L'équilibre chimique de l'ozone stratosphérique

- La production initiale de l'ozone repose sur la dissociation de molécules de dioxygène par les rayons ultraviolets (**photochimie**), en présence de diazote.



- L'ozone peut lui aussi être dissocié par les ultraviolets pour redonner du dioxygène, mais l'atome d'oxygène libéré se réassocie généralement avec du dioxygène pour redonner de l'ozone en libérant de la chaleur : on a un cycle.



- Plus rarement, l'atome d'oxygène rencontre une molécule d'ozone, qui est alors détruite pour redonner du dioxygène : sortie du cycle.

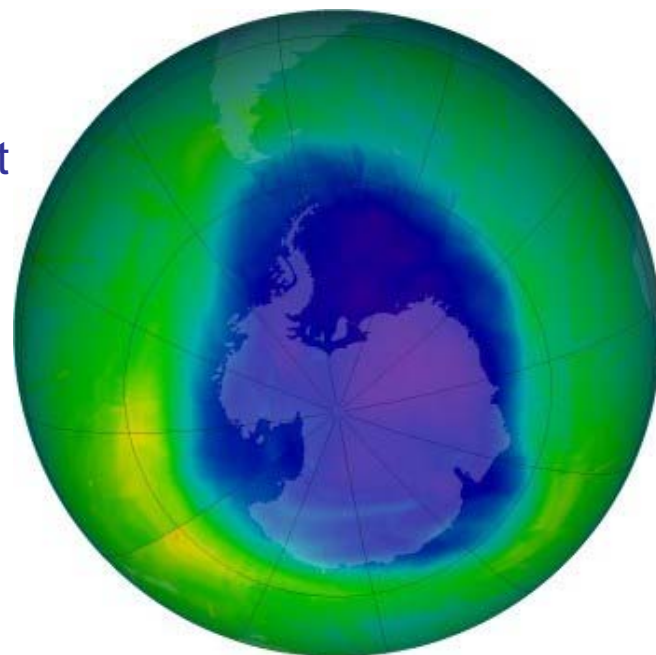
# L'équilibre chimique de l'ozone stratosphérique

- Ce cycle repose exclusivement sur les produits les plus abondants de l'atmosphère : l'oxygène et l'azote. Il est donc imperturbable.
- Toutefois, ces réactions ne suffisent pas à expliquer entièrement l'équilibre de l'ozone : la destruction de l'ozone se fait aussi selon un autre mécanisme, reposant sur des corps très peu abondants tels que le chlore. L'activité humaine, en libérant de telles substances, est donc capable de perturber les concentrations en  $O_3$ .
- Pour plus de détails sur ces mécanismes, on pourra se référer à la [page suivante](#) du site Météo-Education.

# Le trou dans la couche d'ozone

Ce cycle peut être perturbé à plusieurs conditions :

- Une concentration significative de produits chlorés : les nuages stratosphériques, très froids, qui se créent au dessus du pôle sud durant l'hiver austral contiennent des cristaux de glace qui sont des réservoirs de chlore.
- Un espace confiné permettant aux réactions de se développer : le vortex polaire qui se crée également au dessus de l'Antarctique durant l'hiver austral joue ce rôle.
- La présence de rayonnement : cette condition est obtenue à la fin de l'hiver austral, lorsque le soleil réapparaît. On a alors le maximum de destruction d'ozone, fin septembre/début octobre.
- Ensuite, le vortex disparaît et permet le comblement du trou d'ozone au détriment des moyennes latitudes.
- La limitation des émissions humaines de chlore peut seule enrayer la destruction de l'ozone stratosphérique.



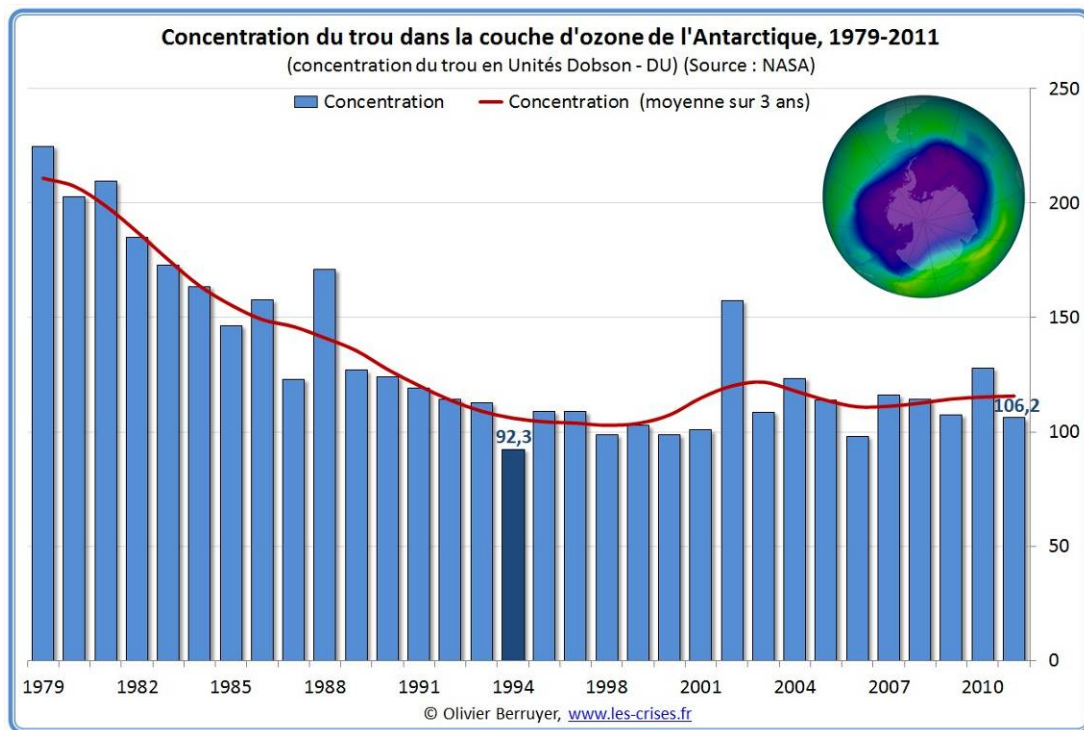
Total Ozone (Dobson Units)  
110 220 330 440 550

Le trou dans la couche d'ozone  
en septembre 2010 (©NASA)

# Le trou dans la couche d'ozone (2)

Comment en est on arrivé là ?

Nos sociétés de consommation ont fait un usage intensif de substances destructrices d'ozone, et notamment de certains composés chlorés, les chlorofluorocarbures (CFC), qui étaient présents par exemple dans les bombes aérosols.



Le Protocole de Montréal, entré en vigueur en 1989, a banni les CFC. Depuis les années 2000, l'ozone stratosphérique a cessé de régresser, et la couche d'ozone devrait être complètement reconstituée vers 2050 !



# Remarques sur l'ozone stratosphérique

- Notons que c'est la vie qui est responsable de la présence de dioxygène en abondance dans l'atmosphère terrestre, et donc de la couche d'ozone protectrice... qui a permis à la vie de prospérer à la surface de la Terre !
- Attention à une erreur très commune : **confondre le problème du changement climatique global et celui du trou dans la couche d'ozone**. La raison de cette confusion est que l'ozone, dans la troposphère, est aussi un gaz à effet de serre. Il faut donc lutter contre la formation d'ozone troposphérique (et ce, d'autant plus que ce gaz, comme on va le voir, est nocif pour les êtres vivants). Mais il est tout aussi important de préserver l'ozone dans la stratosphère ! Car sinon, qui nous protégerait des UV ?

# L'ozone troposphérique

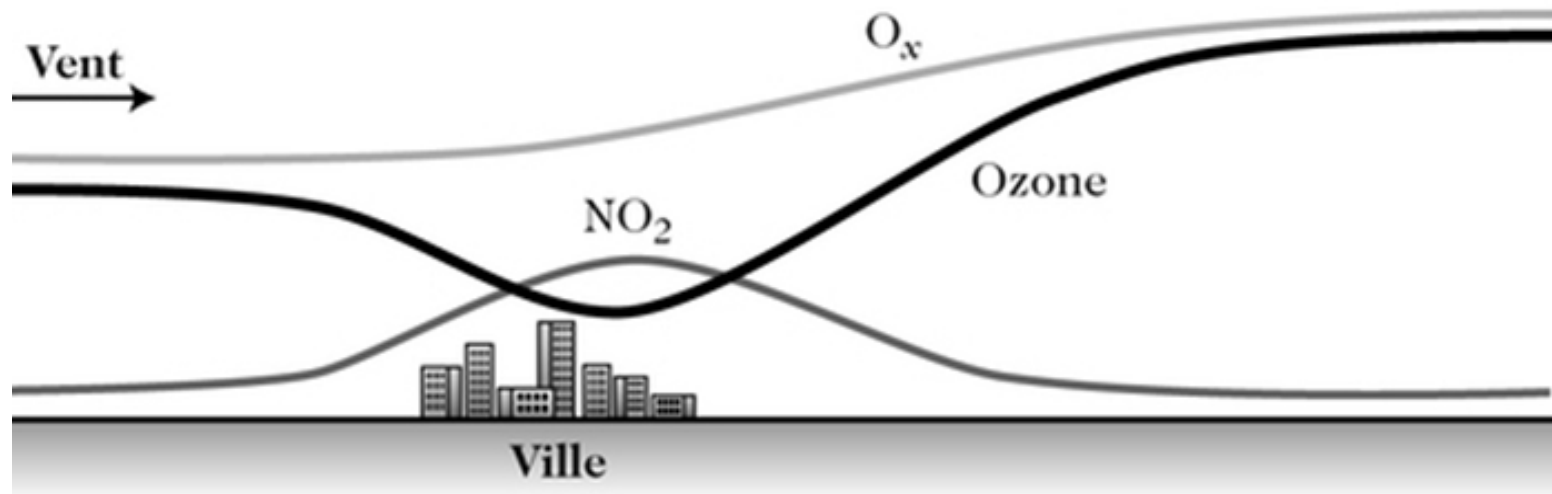
- Vous connaissez son odeur... c'est celle que vous sentez après un arc électrique... ou après un orage.
- C'est un composé très oxydant, nuisible pour les êtres vivants :
  - il affecte les poumons et les yeux,
  - il fait des trous (nécrose) dans les feuilles des végétaux.
- Cet ozone troposphérique n'est pas produit directement par l'activité humaine ; il résulte de la dissociation du dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ) en monoxyde d'azote ( $\text{NO}$ ), en présence de rayonnement.

L'ozone est donc qualifié de “polluant secondaire”, issu de polluants primaires ( $\text{NO}_2$  principalement).

L'étude des réactions (on pourra se référer à la [page suivante](#)) montre que la production croît avec le rapport de concentrations  $[\text{NO}_2]/[\text{NO}]$ .

## L'ozone troposphérique (2)

- Des composés tels que le monoxyde de carbone ou les hydrocarbures imbrûlés intensifient cette réaction. C'est pourquoi les pics d'ozone apparaissent généralement en aval des agglomérations.
- Evaluer le niveau de pollution oxydante nécessite de prendre en compte la somme des concentrations **d'ozone et de dioxyde d'azote** notée  $O_x$  dans l'image ci-dessous ; on voit que l'émission de NO au niveau de la ville aboutit à la formation de  $NO_2$  **aux dépens de l'ozone** ; mais que, plus loin, **l'ozone se reforme aux dépens de  $NO_2$** , pour atteindre un niveau plus élevé.



# Annexe 1 : Unité de mesure de l'ozone

- On quantifie l'ozone contenu dans l'atmosphère par le nombre de molécules dans une colonne de base égale à  $1 \text{ cm}^2$  s'étendant du sol au sommet de l'atmosphère.
- L'unité officielle de mesure de l'ozone est l'Unité Dobson (Dobson Unit, **DU**). Elle correspond au nombre de molécules d'ozone contenues dans un volume cylindrique de base égale à  $1 \text{ cm}^2$  et de hauteur égale à 0,01 millimètre, **dans les conditions standard de température et de pression** (273 K et 1013 HPa).
- La valeur moyenne d'ozone mesurée dans l'atmosphère est de 300 DU, soit une épaisseur de 3 mm.

Est-ce cohérent avec le profil vertical de la diapositive n°3, qui montre une couche d'ozone s'étendant jusqu'à une quarantaine de km ? Oui, car aux altitudes concernées, la pression est extrêmement faible, de l'ordre de quelques HPa. Si on "recomprimait" cette colonne et les molécules qu'elle contient jusqu'aux conditions standard (1013 HPa), on la réduirait bien à une épaisseur de 3 mm.

- Application : 1 DU correspond à quel nombre de molécules d'ozone dans la colonne ? (Solution diapo suivante)

# Solution de l'application

Nombre de molécules d'ozone correspondant à une épaisseur de 1 DU :

➤ On s'intéresse (cf. Définition) au nombre de molécules contenues dans un cylindre de base  $1 \text{ cm}^2$ , de hauteur  $0,01 \text{ mm}$ .

Soit un volume de  $10^{-6}$  litre.

➤ Une mole de molécules, dans les conditions standard de température et de pression, occupe un volume de  $22,4$  litres et contient  $6,02 \cdot 10^{23}$  molécules (nombre d'Avogadro).

➤ Conclusion, 1 DU correspond au nombre de molécules suivant :  
 $(6,02 \times 10^{23} \times 10^{-6}) / 22,4 = 2,69 \times 10^{16}$  molécules.

# Annexe 2 : Historique de la découverte de l'ozone stratosphérique

- La description de l'ozone date du 19<sup>e</sup> siècle
- Les premières mesures sont réalisées au début du 20<sup>e</sup> siècle (Paris Montsouris)
- En 1929, Chapman (GB) présente le mécanisme qui porte désormais son nom et qui explique la formation de l'ozone **en grande partie**.
- Les recherches menées durant les 50 années suivantes permettent de compléter le cycle de Chapman par la chimie catalytique et d'expliquer la totalité de la chimie de l'ozone. Cela met en évidence la fragilité de l'équilibre.
- En 1979, le trou dans la couche d'ozone stratosphérique est mis en évidence expérimentalement.