



La nuit des chercheurs

Mesure et surveillance de constituants atmosphériques chlorés à la station du Jungfraujoch en support au Protocole de Montréal pour la protection de l'ozone stratosphérique

ENJEU

L'ozone (O_3) est formé de trois atomes d'oxygène. Constituant mineur de l'atmosphère terrestre, il est principalement présent dans la stratosphère (couche atmosphérique entre 12 et 50 km d'altitude).

L'ozone stratosphérique joue un rôle bénéfique en filtrant le rayonnement ultraviolet (UV) émis par le soleil. Il limite ainsi la propagation de ces radiations jusqu'à la surface de la Terre et protège la biosphère de la frange la plus énergétique de ce rayonnement nocif.

MENACE

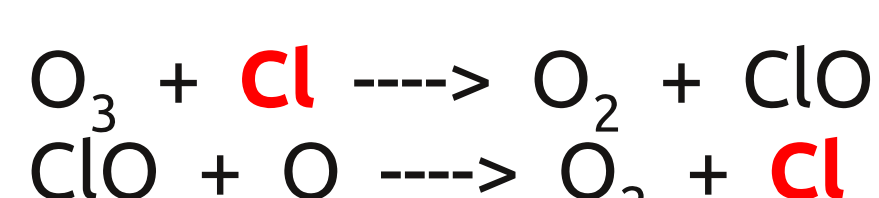
Les chlorofluorocarbones (CFC) sont des produits de synthèse découverts au début des années 1930. Non toxiques et pourvus de propriétés physico-chimiques particulièrement intéressantes, ils ont été utilisés de manière très intensive dans de très nombreuses applications industrielles et domestiques (gaz propulseur, réfrigération, isolation, nettoyage de circuits imprimés...) ce qui a conduit à des émissions massives vers l'atmosphère.

La FIGURE 1 illustre les émissions des principaux gaz chlorés depuis 1950, selon l'AFEAS [1]. La contribution des CFC y est reproduite en vert foncé. On remarque que ces émissions ont atteint leur maximum vers 1988.

La très grande stabilité des CFC dans la troposphère (entre le sol et ~12 km) leur permet d'atteindre progressivement la stratosphère où ils sont détruits par le rayonnement ultraviolet, libérant ainsi des atomes de chlore (**Cl**) et de fluor (F). Par exemple, la première dissociation du CFC-11 se produit suivant :



Le chlore ainsi libéré détruit l'ozone stratosphérique via une série de réactions en chaîne décrites en 1974 par Molina et Rowland (Prix Nobel de chimie pour ces travaux en 1995) :



Le chlore est ensuite piégé dans des molécules plus stables, telles l'acide chlorhydrique (HCl) et le nitrate de chlore ($ClONO_2$).



Site d'observation de l'Université de Liège, à la station scientifique internationale du Jungfraujoch, Alpes bernoises, 3580 m d'altitude.

RÉPONSE

Suite à la découverte du trou d'ozone au-dessus de l'Antarctique (Farman, 1985), la communauté internationale intensifie des négociations entamées entre états quelques années auparavant. Elle instaure un traité visant à protéger la couche d'ozone : le Protocole de Montréal est adopté en 1987 par 24 pays.

Ce texte prévoit de réduire la production de substances appauvrissant la couche d'ozone (SACO). Progressivement adopté par l'ensemble des pays, ce protocole sera renforcé à plusieurs reprises, notamment par les Amendements de Londres (1990) et de Copenhague (1992), conduisant au bannissement complet de plusieurs familles de composés chlorés.

Le Protocole de Montréal a abouti aux résultats escomptés : le total des émissions de SACO n'a cessé de décroître depuis la fin des années 1980 (cfr FIGURE 1).

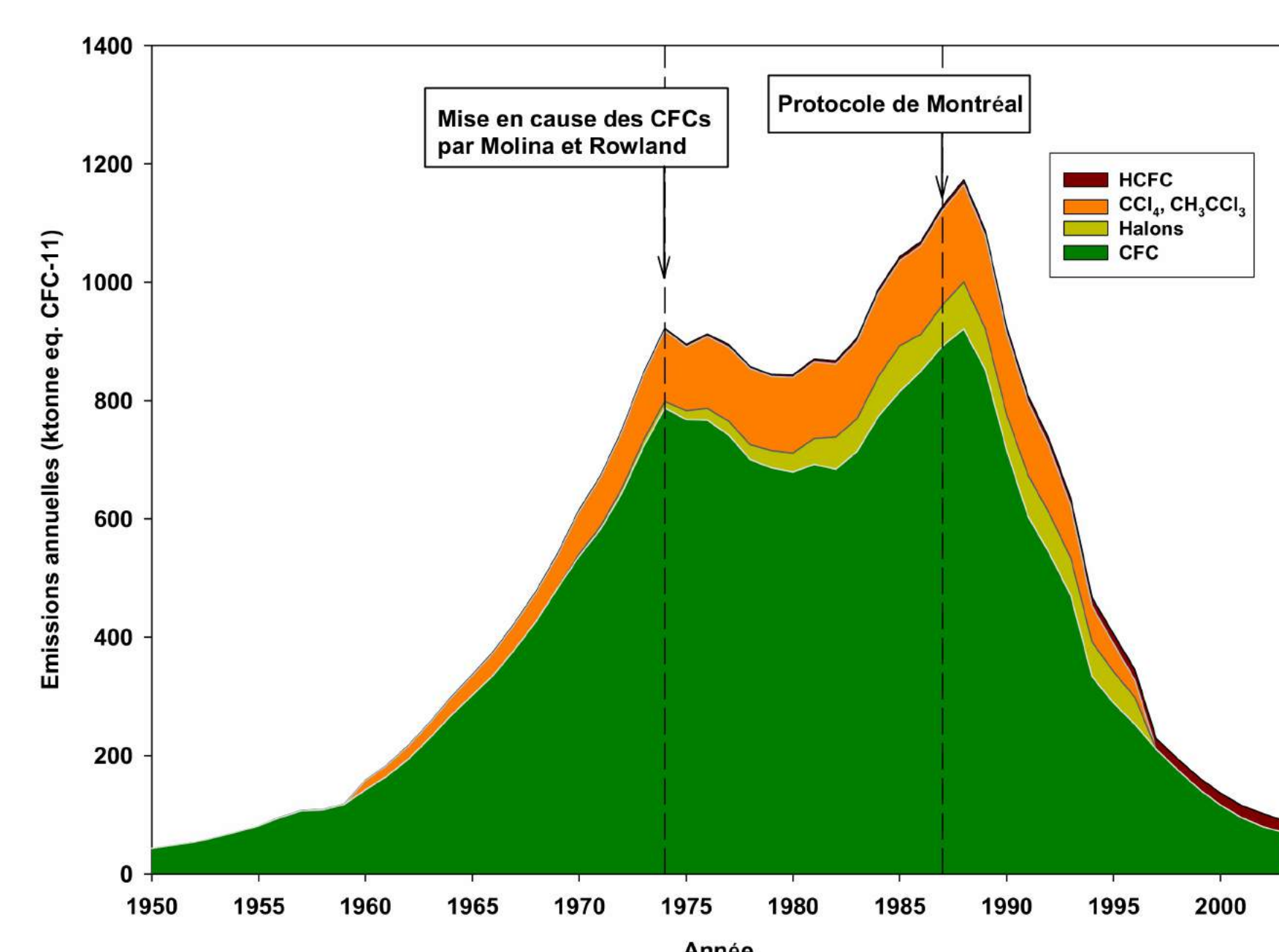


FIGURE 1 - Émissions mondiales dans l'atmosphère terrestre des principaux composés chlorés appauvrissant l'ozone, d'après AFEAS [1]. La contribution la plus importante est due aux CFC, en vert foncé.

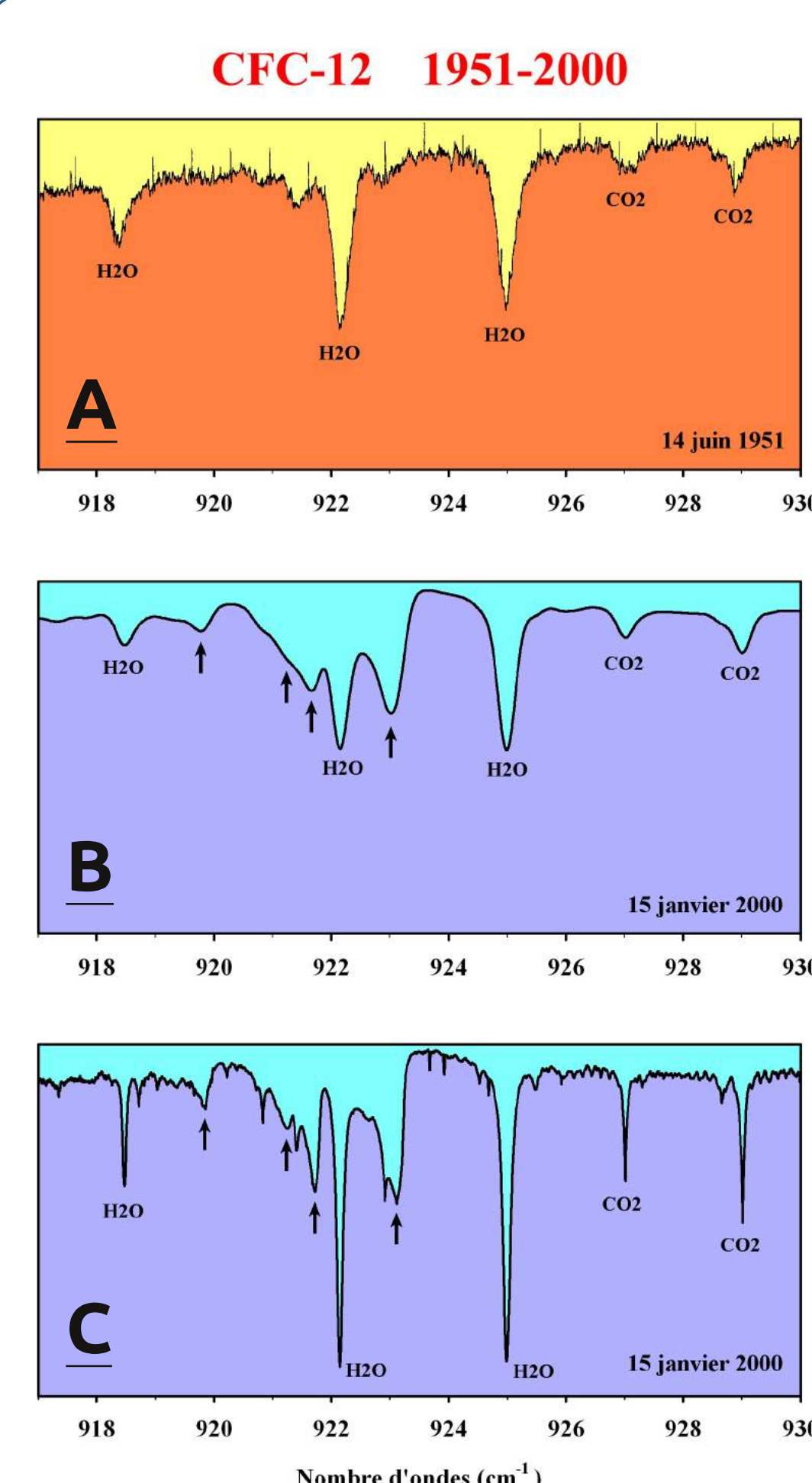


FIGURE 2 - Comparaison entre des observations IR enregistrées en 1951 (cadre A) et en 2000 (cadre C) à la station du Jungfraujoch. Le cadre B reproduit l'observation de 2000 dégradée au niveau de performance de l'instrument de 1951. Les absorptions spécifiques du CFC-12 (signature spectrale), identifiées par des flèches aux cadres B et C, sont absentes en 1951. Ce composé n'était donc pas présent en quantité importante au milieu du siècle dernier et son accumulation dans l'atmosphère de la Terre est donc relativement récente et rapide.

REFERENCES

- [1] AFEAS, Alternative Fluorocarbons Environmental Acceptability Study, see agage.mit.edu/data/afeas-data
- [2] Scientific Assessment of Ozone Depletion, World Meteorological Organization, 1998, 2002, 2006, 2010 et 2014.
- [3] Mahieu et al., Recent Northern Hemisphere stratospheric HCl increase due to atmospheric circulation changes, Nature, 515, 2014 [doi:10.1038/nature13857].

CONTRIBUTIONS DU GIRPAS

Les travaux du Groupe InfraRouge de Physique Atmosphérique et Solaire (GIRPAS) de l'ULiège ont permis les avancées et découvertes essentielles suivantes :

- La première détection en 1974 de la présence de l'acide fluorhydrique (HF) dans la stratosphère, grâce à des observations infrarouges (IR) enregistrées à bord de la nacelle ballon de l'Université de Liège démontre que les CFC atteignent la stratosphère et y sont dissociés pour former, entre autres composés, du HCl et du HF
- La comparaison entre des observations pionnières et d'autres plus récentes, toutes obtenues au Jungfraujoch par des chercheurs liégeois, va permettre de démontrer l'absence de signatures dues aux CFC dans les années 1950 (voir FIGURE 2) : leur présence dans l'atmosphère résulte donc bien d'activités humaines récentes
- L'analyse des observations liégeoises, effectuées de façon régulière à la station du Jungfraujoch, va confirmer la présence et ensuite l'accumulation de HCl et de HF dans la stratosphère. Les séries temporelles déduites de cette surveillance continue vont permettre de déterminer les taux de croissance du Cl et du F dans la stratosphère ainsi que de plusieurs CFC dans la troposphère. La FIGURE 3 reproduit plusieurs de ces séries temporelles
- Le GIRPAS a en outre été fortement impliqué dans l'analyse d'observations spatiales effectuées par la NASA et l'Agence Spatiale Canadienne. Cela nous a permis d'établir pour la première fois des bilans complets des espèces chlorées et fluorées dans l'atmosphère de la Terre, tant pour la stratosphère que pour la troposphère
- Les résultats de ces travaux de recherche ont été consignés dans des rapports de synthèse aidant à la prise de décision, au niveau international (Scientific Assessment of ozone Depletion [2]), européen, national, régional (Indicateurs clés de l'environnement wallon) ainsi que dans plusieurs dizaines d'articles scientifiques parus dans des revues de référence, dont la prestigieuse revue Nature. Une liste complète de ces publications est disponible sur le site internet du GIRPAS (<http://labos.ulg.ac.be/girpas/publications>).

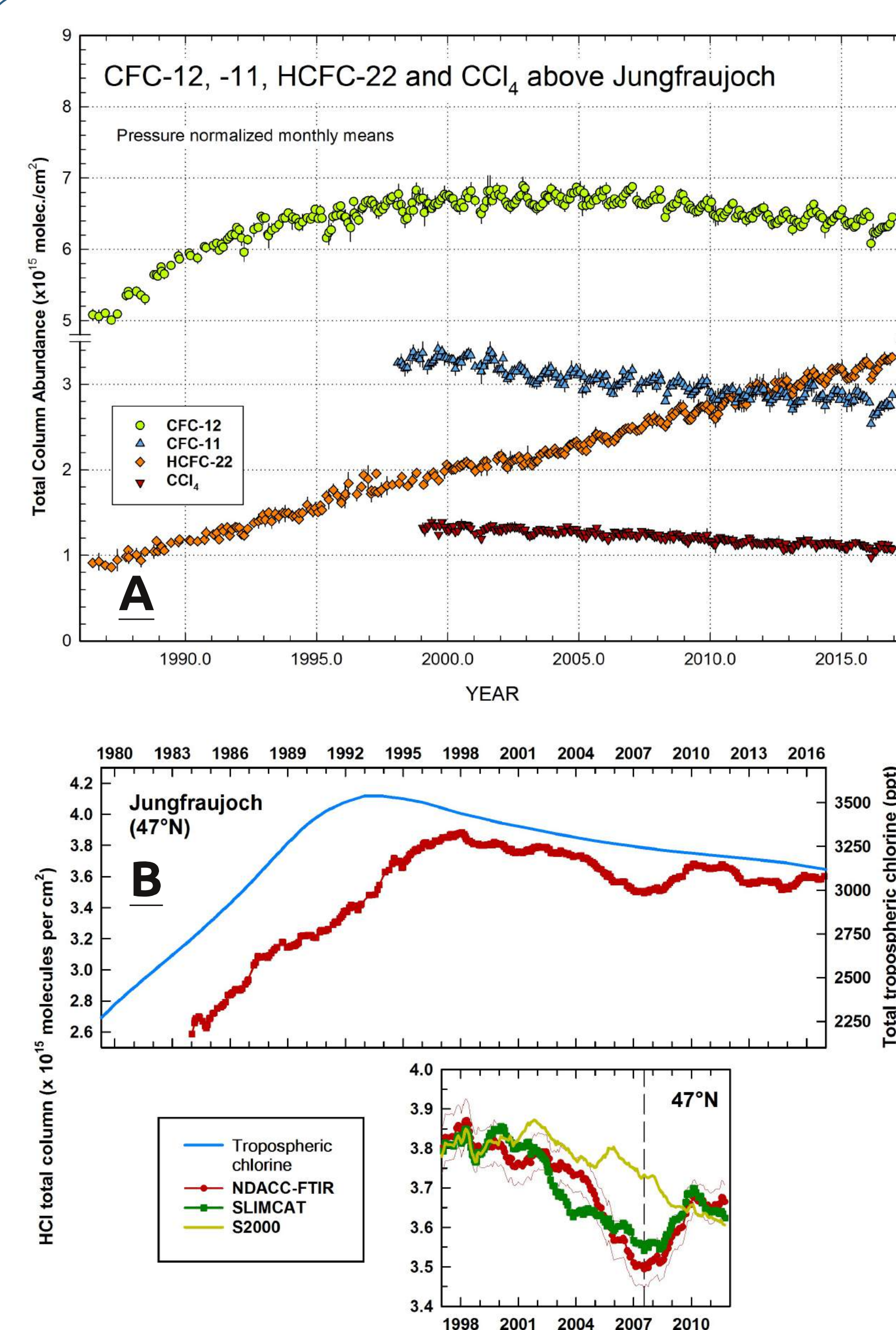


FIGURE 3 - Séries temporelles déduites d'observations effectuées au Jungfraujoch, montrant l'évolution à long terme de quatre gaz chlorés visés par le Protocole de Montréal (cadre A) ainsi que de HCl, le principal réservoir chloré stratosphérique (cadre B, en rouge).

On observe que l'abondance des deux principaux CFC se stabilise et décroît sous l'effet des dispositions prises par le Protocole de Montréal. Celles-ci ont conduit à une diminution de la charge en chlore dans la troposphère. Cette tendance s'est ensuite confirmée dans la stratosphère, dès 1997, comme le démontre la décroissance moyenne, lente mais significative ($\leq 1\%/an$), de HCl déduite de nos mesures.

Quant à la ré-augmentation temporaire de HCl entre 2007 et 2011, nous avons démontré qu'elle résultait d'un ralentissement temporaire et inattendu de la circulation atmosphérique dans l'hémisphère nord. Des émissions pirates de gaz chlorés ne sont donc pas en cause. Le Protocole de Montréal est donc bien à l'œuvre et ce traité conduira à la réduction du chlore dans l'atmosphère, permettant la résorption de l'ozone stratosphérique [3].

