



# Ozone troposphérique : enjeux et axes de recherches

Gérard Ancellet, DR CNRS

Laboratoire Atmosphère, Milieu, Observations Spatiales (LATMOS)

CNRS-SU-UVSQ

# Enjeux et questions scientifiques

Ozone polluant secondaire, ses processus de formation et destruction bien identifiés :

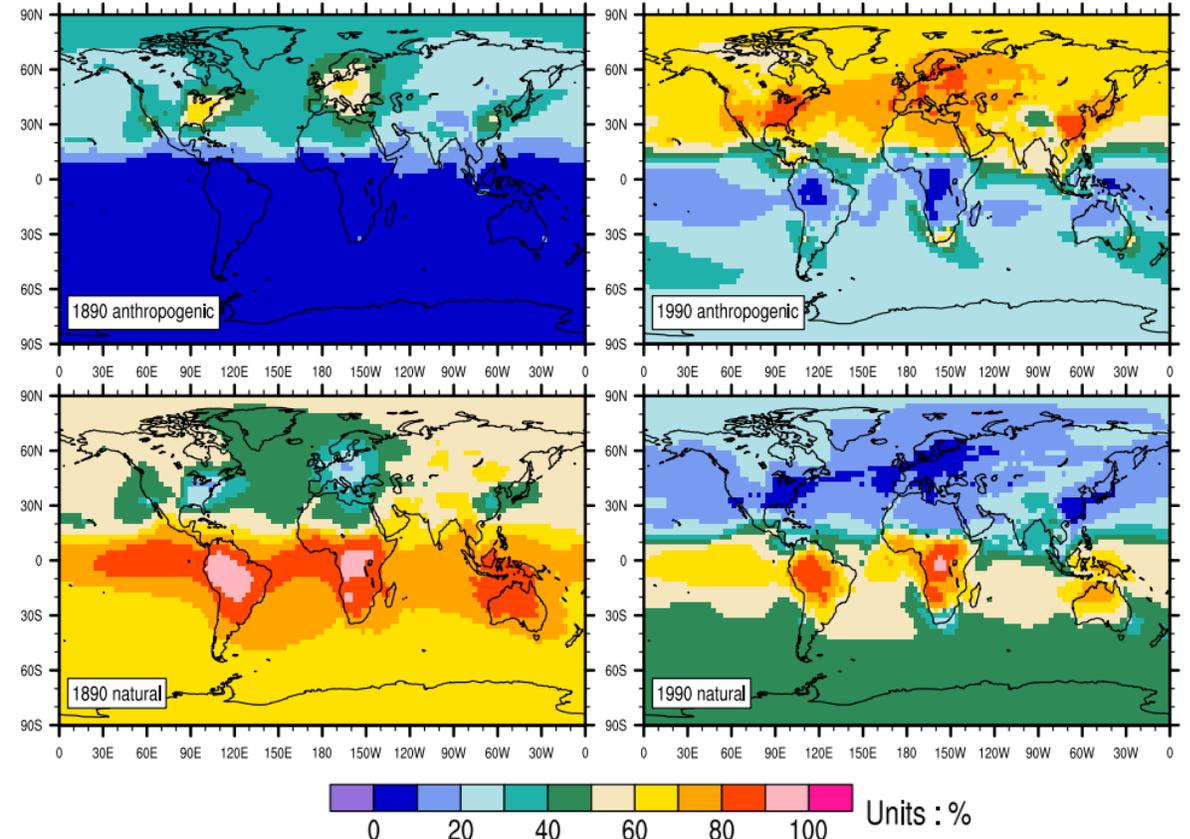
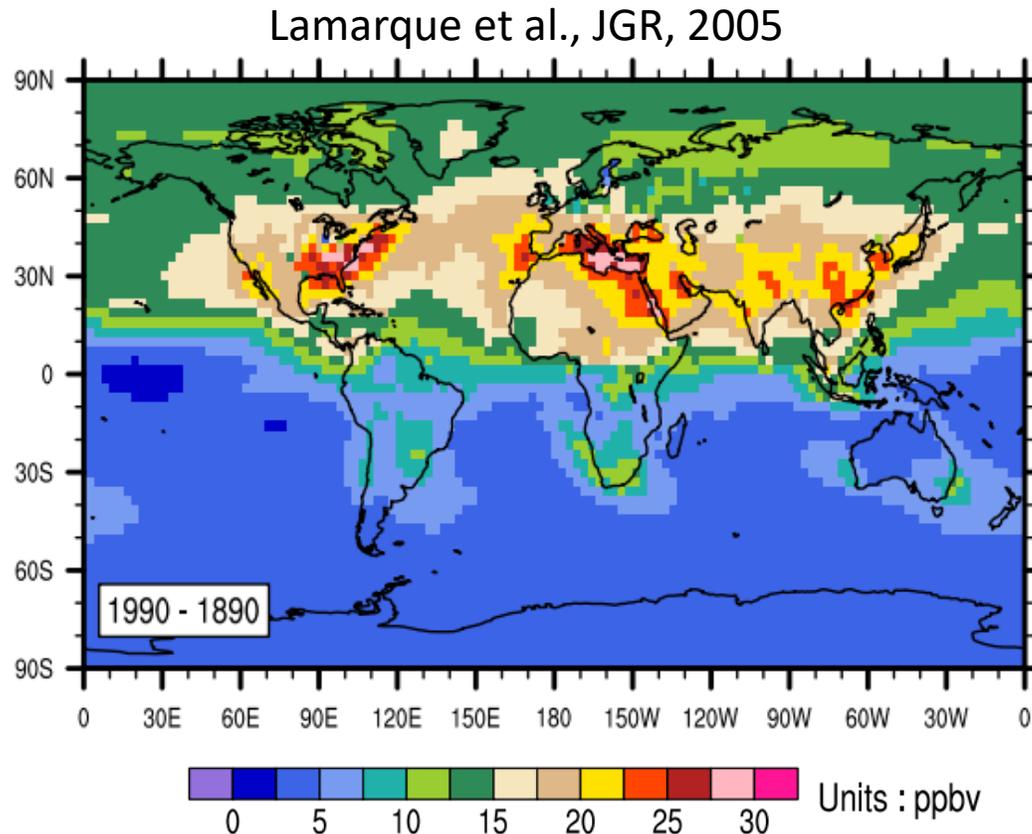
- Forte sensibilité aux émissions des oxydes d'azote ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ) et des composés organiques volatils (VOC) par processus naturels (végétation, sol, éclairs) ou par activité humaine (transport, industries...)
- Formation dans la basse atmosphère dépend fortement des conditions météorologiques locales (température, rayonnement, stabilité des échanges verticaux)
- Durée de vie de 1 - 20 jours : importance du transport à longue distance entre continents et du transport vertical depuis la stratosphère

Leur contribution respective et l'intégration des processus dans les modèles de simulation atmosphérique restent des questions d'actualité.

# Enjeux et questions scientifiques

- Forte augmentation depuis époque pré-industrielle 10 ppbv → 50 ppbv :
- 70-80% des concentrations de surface dans hémisphère nord dépendent des émissions anthropiques
- Principales sources naturelles : feux de forêts tropicaux ou boréaux, émission NOx par les éclairs ou les sols, transport depuis la stratosphère (<20% dans la basse atmosphère)

Quel futur dans la perspective du contrôle des émissions et du changement climatique ?

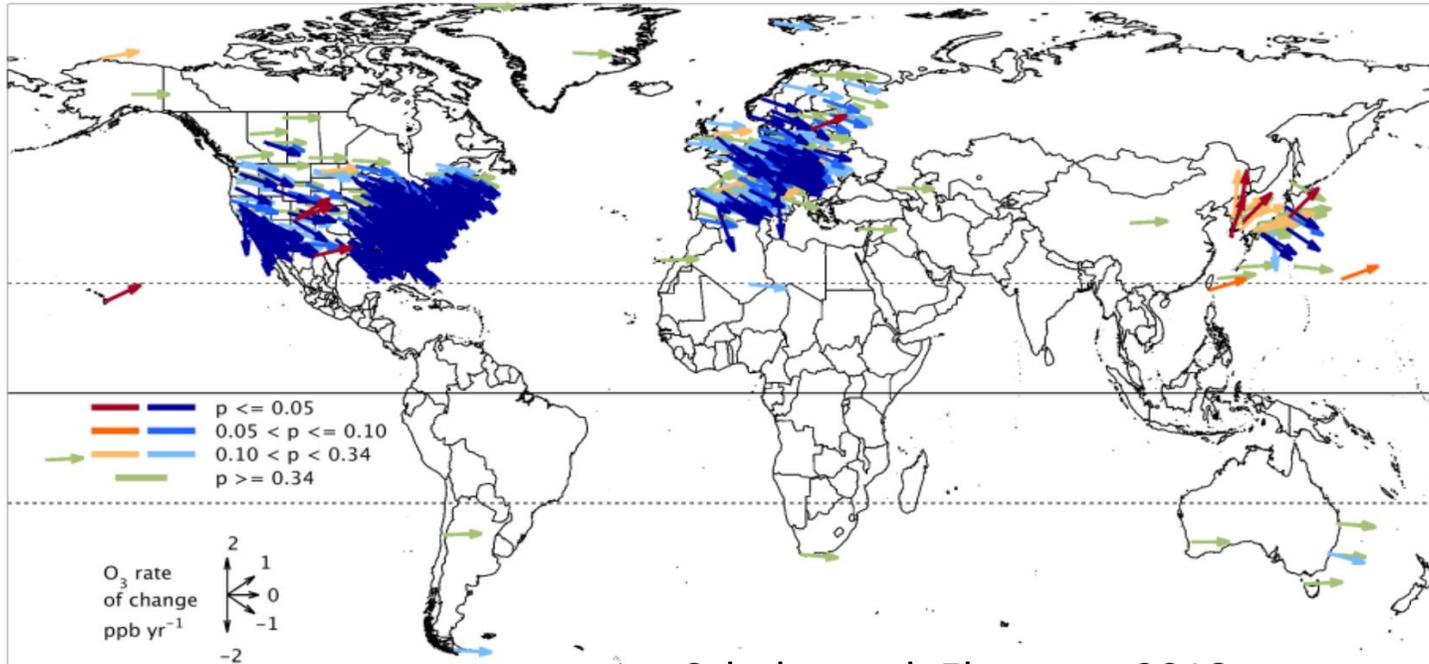


# Enjeux et questions scientifiques

Différences régionales sur les tendances décennales des concentrations en surface mais aussi des colonnes d'ozone troposphérique (en DU)

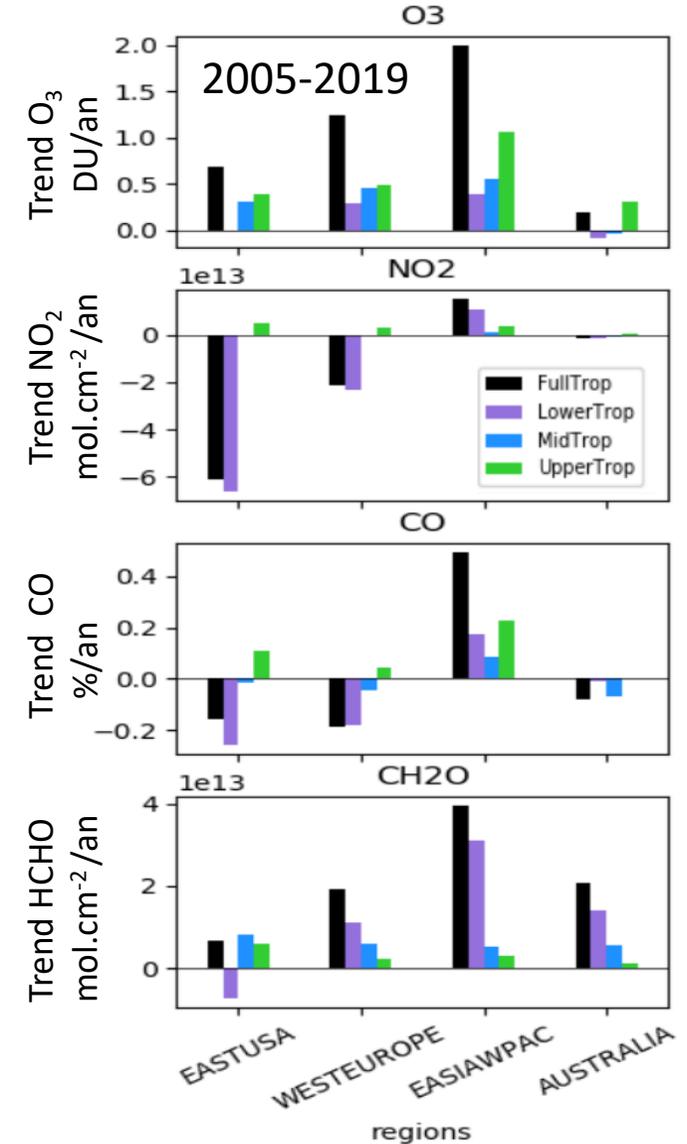
- Diminution O<sub>3</sub> en Europe et Amérique du Nord (NA), augmentation en Asie (EA)
- Diminution colonne NO<sub>x</sub> et COV en Europe et NA, augmentation EA
- Importance de distinguer les régimes sensibilité au NO<sub>x</sub> (NA) et sensibilité au COV (EA) pour guider les politiques de réductions des émissions

Trends of the ozone 98<sup>th</sup> percentile, summer Data extracted on: 2016-10-21  
98<sup>th</sup> percentile ozone, 2000-2014: 700 all rural sites



Schultz et al. Elementa 2018

Elshornbany, ACP, 2024



# Les programmes de recherche

- WMO 1980-2005 : variabilité couche ozone stratosphérique et des colonnes totales, contribution de la colonne troposphérique
- Projets européens d'étude la qualité de l'air 1990-2015 : campagnes de mesures sol, avion des processus chimiques et dynamiques (campagnes internationales par exemple ESCOMPTE 2001, CHARMEX/MISTRAL 2013 en région Provence-Alpes-Côte d'Azur), études au laboratoire des processus chimiques (chambres de simulation par exemple LCE Marseille)
- Mise en place des super sites de surveillance de l'atmosphère pour études variabilité décennale : réseau NDACC (ozone, aérosol), réseau ICOS (gaz à effet de serre)

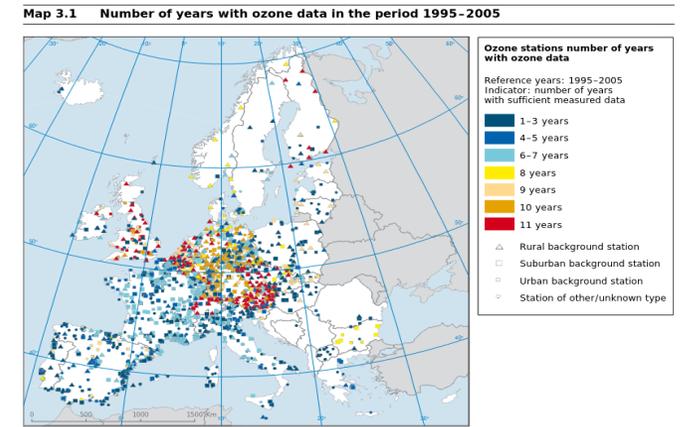


Paramètre et domaine	Instrument	1980	1990	2000	2010	2019
<b>Observables labellisées INSU</b>						
<b>NDACC-France (SNO INSU)</b>						
T 30-80 km	Lidar Température					
Colonne O3 et mesures Umkehr	Dobson					
O3 10-50 km	Lidar O3 strato					
O3 3-14 km	Lidar O3 tropo					
Spectre UV	Spectroradiomètre UV					
Colonne O3, NO2	Spectromètre UV-Vis					
O3, T, H2O 0-30 km	Sonde ballon					
Colonne Br0	Spectromètre Br0					
H2O 3-12 km	Lidar H2O					
<b>PHOTONS-AERONET (SNO INSU)</b>						
Epaisseur optique aérosols	Photomètre					
Epaisseur optique aérosols	Photomètre (Jour/nuit)					
Vapeur d'eau (colonne)	Photomètre (Jour/nuit)					
Distribution en taille aérosols	Photomètre (jour)					
Distribution en taille aérosols	Photomètre (nuit)					
Indice de réfraction aérosols	Photomètre					
Absorption des aérosols	Photomètre					
Flux solaire	Photomètre					
Forçage radiatif des aérosols	Photomètre					
<b>ICOS-France (SNO INSU)</b>						
CO2 10, 50 et 100 m AGL	Analyseur CRDS					
CO 10, 50 et 100 m AGL	Analyseur CRDS					
CH4 10, 50 et 100 m AGL	Analyseur CRDS					
H2O 10, 50 et 100 m AGL	Analyseur CRDS					
P, T, vent (5, 10, 50, 100 m)	Capteurs météo					
Hauteur de couche limite	Lidar aérosols					
Rétrodiffusion aérosols 200m-8 km	Lidar aérosols					

- Modélisation des processus chimiques et dynamiques (transport, nuages, rayonnement) pour analyser ces tendances et évènements extrêmes, prévision épisodes de pollution : système PREVAIR, travaux de l'INERIS
- Projet international Tropospheric Ozone Assessment Report (TOAR) 2015-2025 piloté par NOAA, WMO, CNRS...

# Les systèmes d'observation de l'ozone depuis le sol

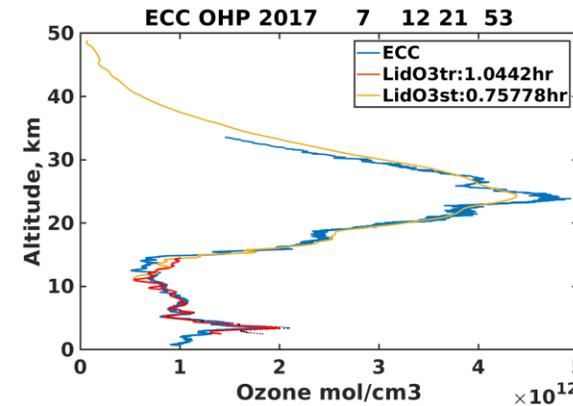
- Réseau européen d'observation en surface (contribution de AtmoSud)



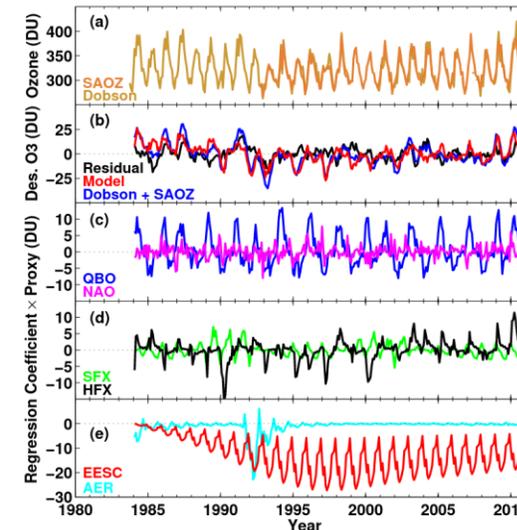
- Mesures profil vertical (OHP 1984-2024)

→ ozone sondes embarquées sous ballon météorologique

→ sondage laser (lidar) absorption différentielle UV

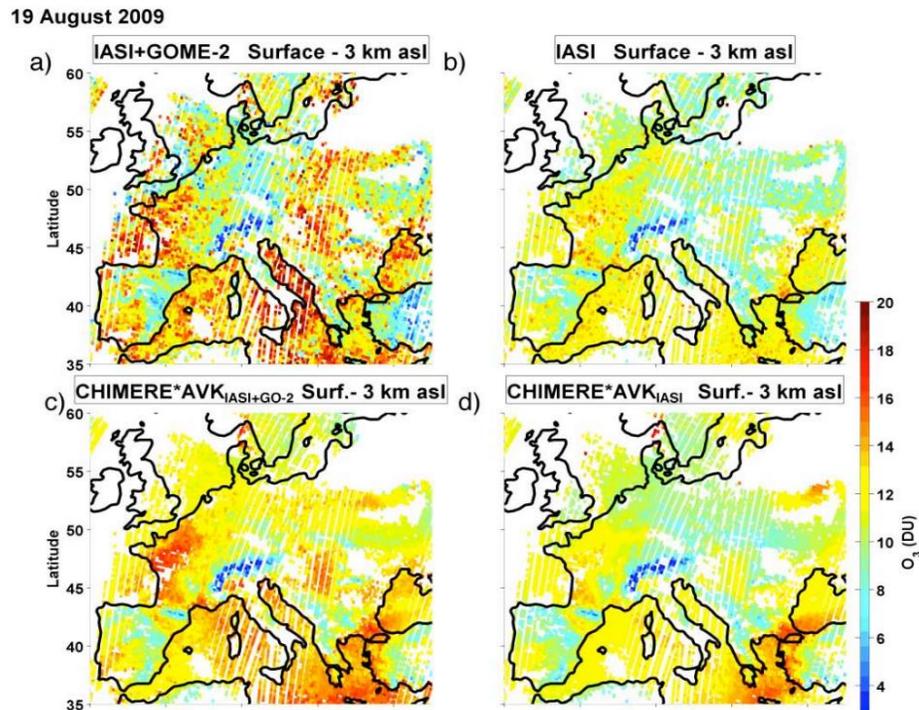
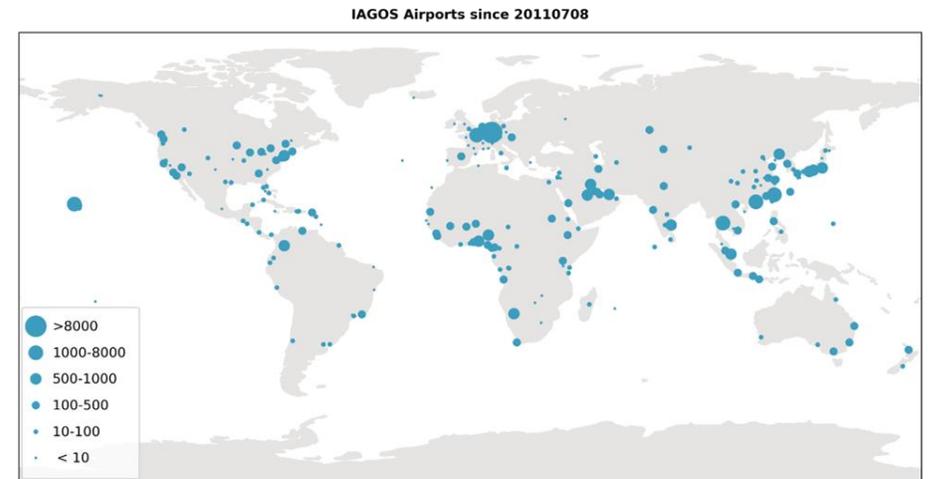


- Mesures colonnes totales (réseau de spectromètres d'analyse au sol du rayonnement UV, visible diffusé par atmosphère)



# Les systèmes d'observation de l'ozone : moyens mobiles

- Projet IAGOS (In service aircraft for a Global Observing System) : profil vertical de l'ozone et mesures à l'interface troposphère/stratosphère avec avions de lignes équipés de mesures in-situ 1984-2024



Cuesta et al.  
ACP, 2013

Mesures colonne d'ozone par satellite : colonne totale, profil vertical stratosphère et colonnes troposphériques (UV+IR)

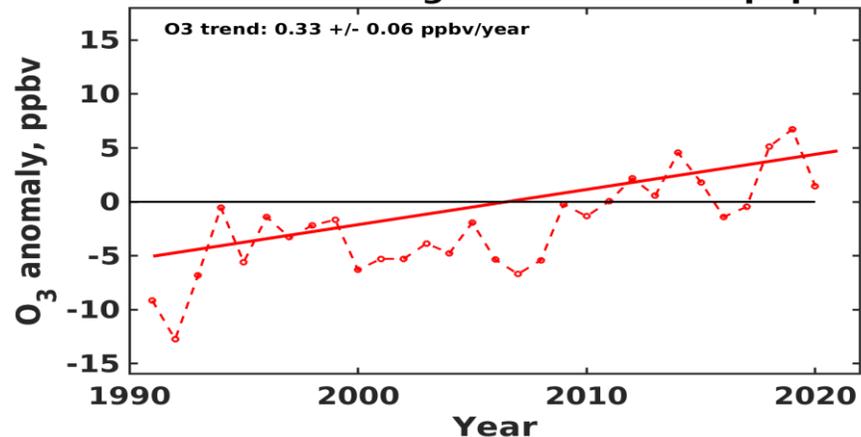
# Résultats récents du projet TOAR : tendances décennales de l'ozone (OHP, IAGOS)

Haute troposphère: ozone continue à augmenter 3 ppbv/décade: pas de lien avec source stratosphérique, impact transport à longue distance depuis Moyen-Orient/Asie

Basse atmosphère : pas de différence entre mesure de surface et mesures par ballon sonde, réduction significative en Europe et aux USA diminution de 1-2 ppbv/décade

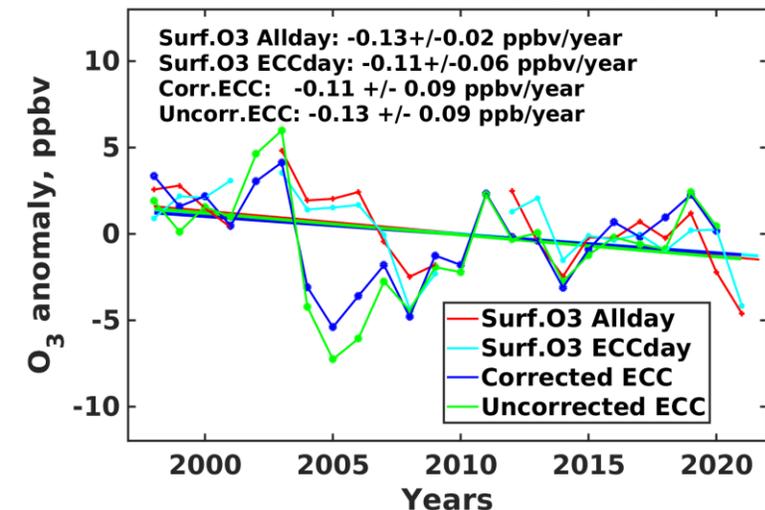
Cohérence entre mesure profils de OHP et ceux du projet IAGOS

**ECC+LIDAR All regions : Below Tropopause**

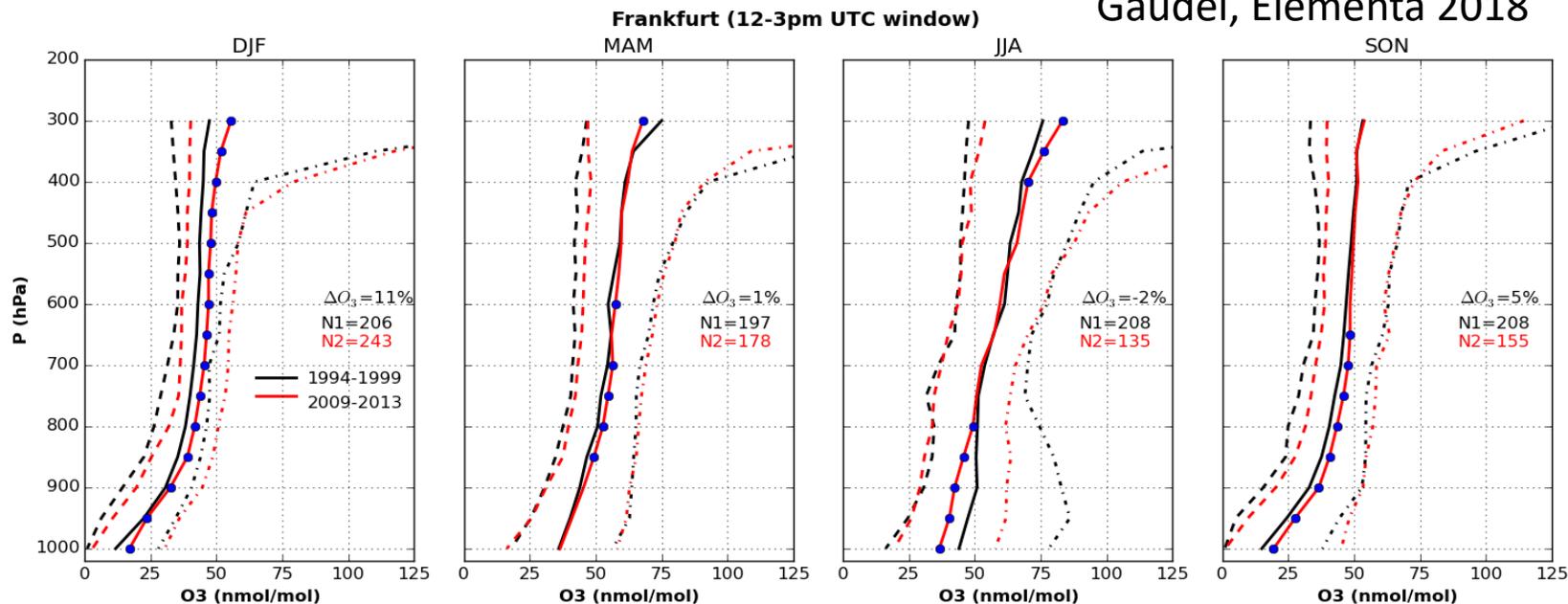


Ancellet, AMT, 2022

**OHP Surface O3 - 1998-2021**



Gaudel, Elementa 2018

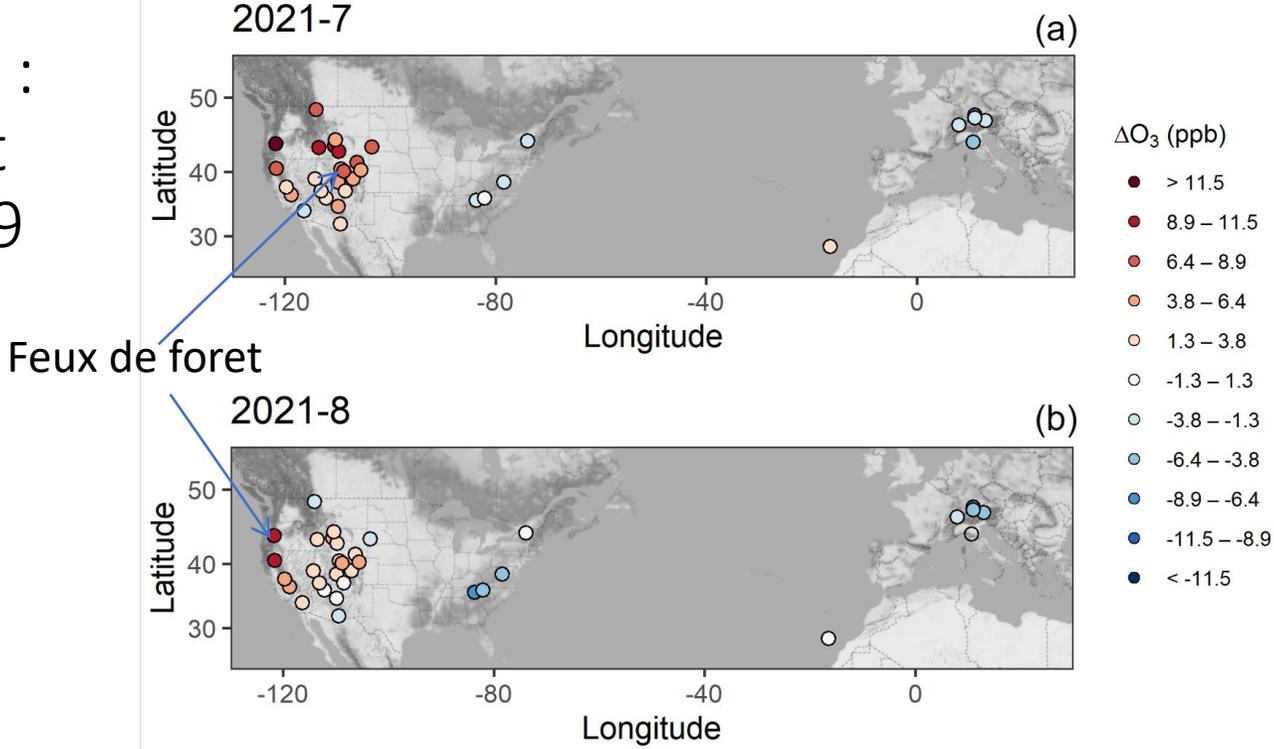


# Résultats récents du projet TOAR : réduction des émissions pendant confinement pandémie COVID-19

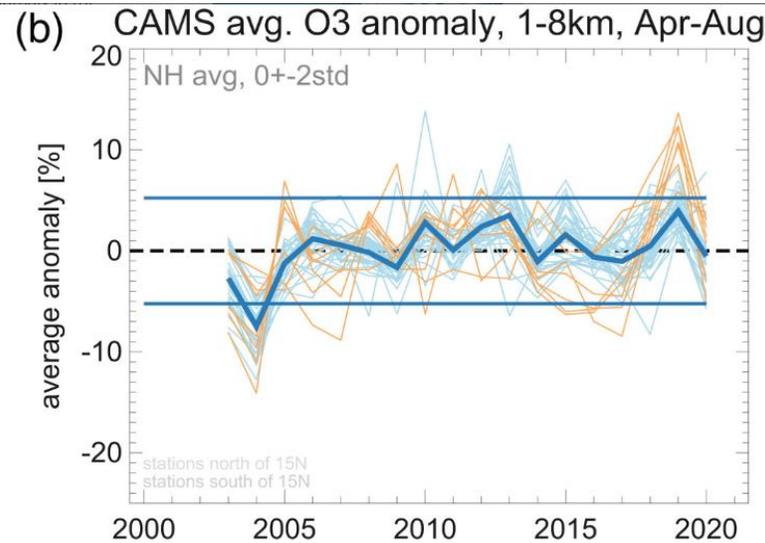
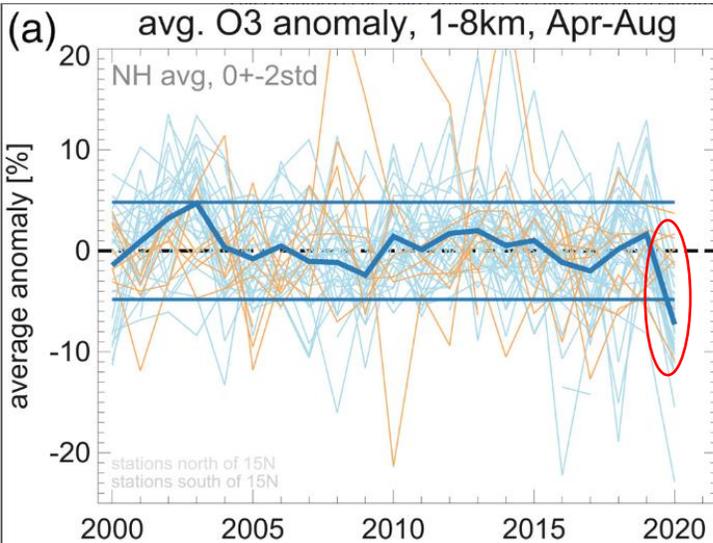
Période de confinement a permis de tester  
la réponse à un changement brutal des  
émissions

Diminution de l'ozone au-dessus de couche  
limite polluée (altitude > 2 km) en avril-  
août, détectée à la fois par station  
d'altitude et par les sondages ballon (sauf  
en Californie → feux de forêts)

Augmentation d'ozone dans les zones  
habituellement polluées (différence dans la  
sensibilité aux émissions de NO<sub>2</sub>)



Putero et al.  
ACP 2023

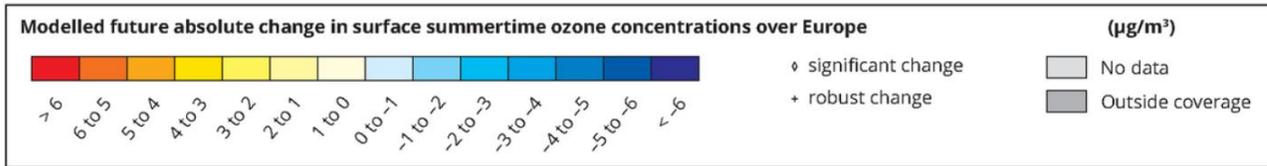
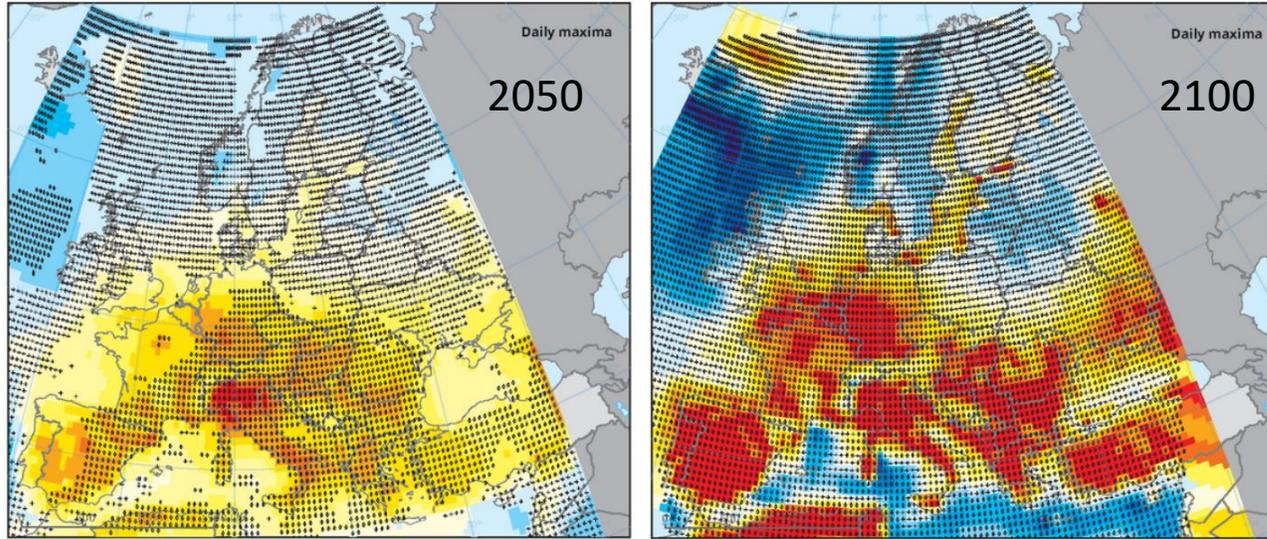


Steinbrecht GRL, 2021

# Résultats récents du projet TOAR : rôle du changement climatique en Europe

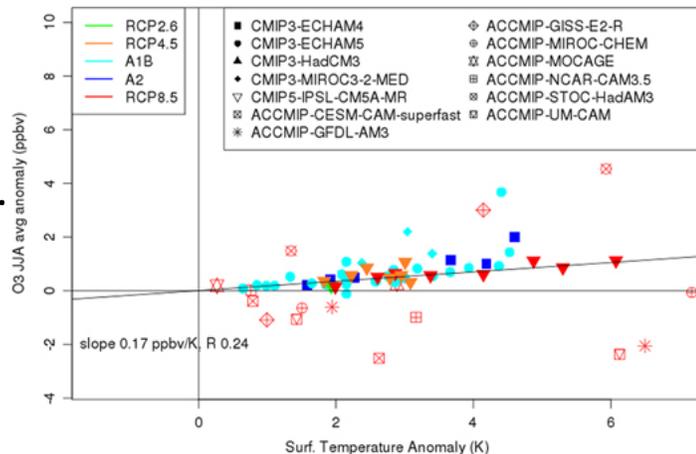
03/06/2024 14:04

Ground-level ozone effects on human health under the changing climate



Impact changement climatique	Processus production/destruction	Ozone concentrations
Temperature	Efficacité production photochimique	+
	Temps de vie espèce réservoir (PAN)	+
	Augmentation émissions biogéniques sol, végétation (NO, VOC)	+
Concentration $\text{CO}_2$	Diminution émissions biogéniques (isoprène)	-
Rayonnement	Efficacité production photochimique	+
Humidité	Efficacité destruction photochimique	-
Episode sécheresse	Efficacité production photochimique	+
	Moins depot au sol (stress climatique sur végétation)	+
	Moins émissions biogéniques (stress climatique sur végétation)	-
Fréquence des feux de forêt	Efficacité production photochimique (CO, VOC, $\text{NO}_x$ )	+
Fréquence des blocages anticycloniques	Stagnation des masses d'air polluées	+
	Augmentation des vagues de chaleur	+

Colette et al.  
ERL, 2015



Impact climatique sur les futures concentrations d'ozone est significatif mais ordre de grandeur identique aux tendances décennales négatives observées avec réduction actuelle des émissions

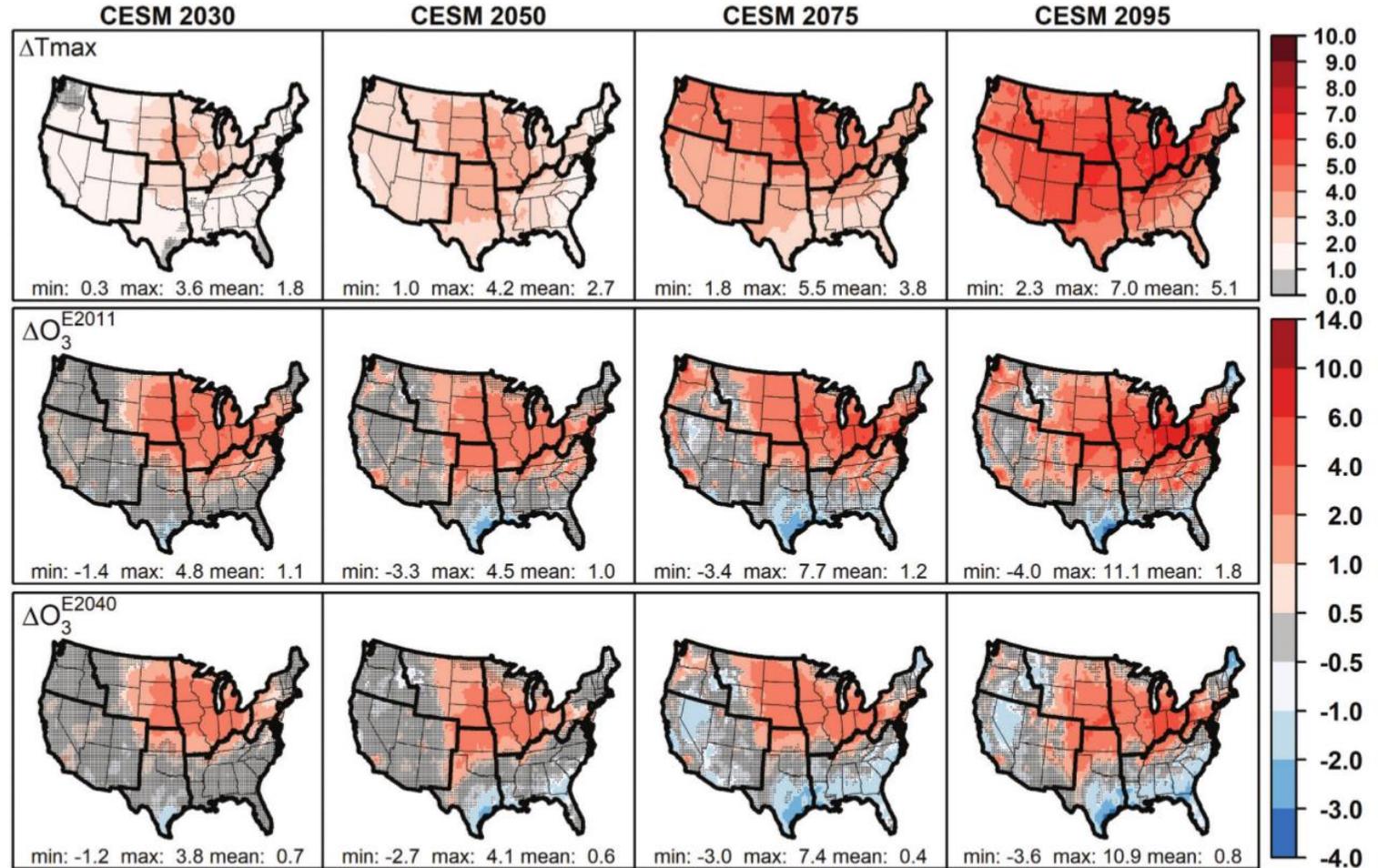
# Résultats récents du projet TOAR : rôle du changement climatique aux USA

Etude sur impact climatique aux USA conduit conclusions similaires

Comparaison entre impact climatique avec émissions actuelles (E2011) et émissions réduites selon projections 2040 (E2040)

Species	2011	2040	Difference (%)
CO	64.8	46.5	-28.2
NO <sub>x</sub>	12.9	6.3	-51.1
VOC	15.7	13.5	-14.1
SO <sub>2</sub>	5.8	2.0	-65.8
NH <sub>3</sub>	3.8	3.9	2.0
PM <sub>2.5</sub>	4.2	4.1	-2.5

Tg/yr



**Figure 4.** Changes relative to 2000 using meteorology downscaled from CESM. Top row: daily maximum temperatures (°C). Bottom two rows: MDA8 O<sub>3</sub> (ppb) using emissions from 2011 and 2040, respectively. All quantities shown are differences in May–September averages between the 11-year period centered on the indicated year and the downscaled representation of 1995–2005. Stippling indicates differences are not statistically significant at the  $p = .05$  level.