

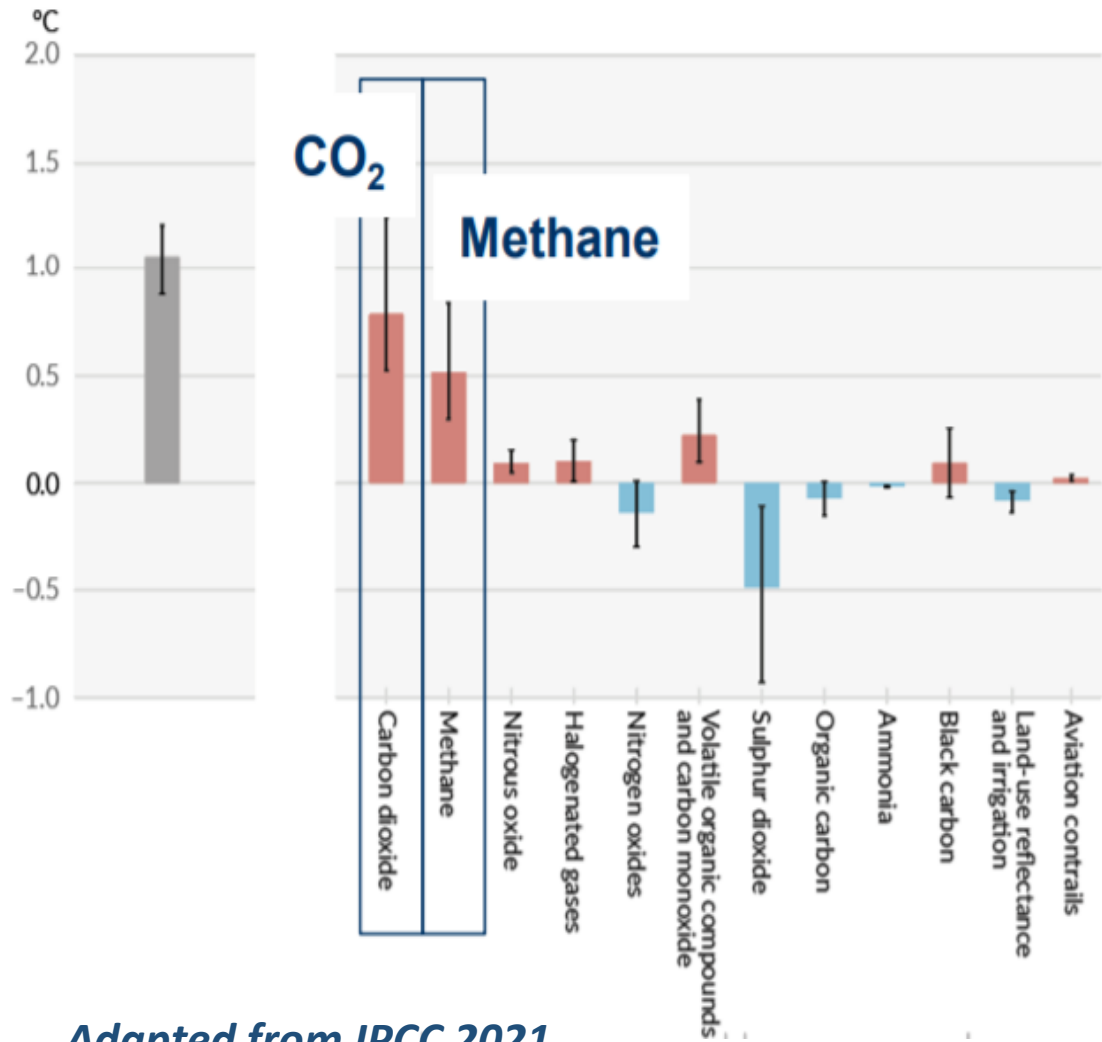
9h30-12h00

Apport des super sites de l'OHP, Marseille Longchamp et Port-de-Bouc pour le suivi des gaz à effet de serre en Région SUD-PACA.

Physicienne des Observatoires du Comité National des Astronomes et des Physiciens
Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Ecologie marine et continentale (IMBE)
irene.xueref-remy@imbe.fr

Merci à mes doctorants Ludovic Lelandais, Pauline Bosio et Aurélie Riandet ; à mes postdoctorants Brian Nathan, Khalid Mehmood et Marine Claeys ; à nos ingénieurs et assistants-ingénieurs Michelle Leydet, Pierre-Eric Blanc, Benoît Carré ; à l'ensemble de nos collègues chercheurs et enseignants-chercheurs collaborateurs de ces études ; et aux équipes d'ATMOSUD, pour leurs contributions à ces travaux.

Contexte scientifique et objectifs



Adapted from IPCC 2021

Le CO₂ et le CH₄ émis par les activités anthropiques depuis l'ère pré-industrielle sont les principales causes du réchauffement climatique (resp. ~60% et 30%).

Les incertitudes de la figure représentent de forts enjeux scientifiques, sociétaux et politiques : notamment, à l'échelle régionale les émissions sont mal évaluées avec des incertitudes pouvant atteindre plusieurs dizaines de pourcents.

Nos objectifs :

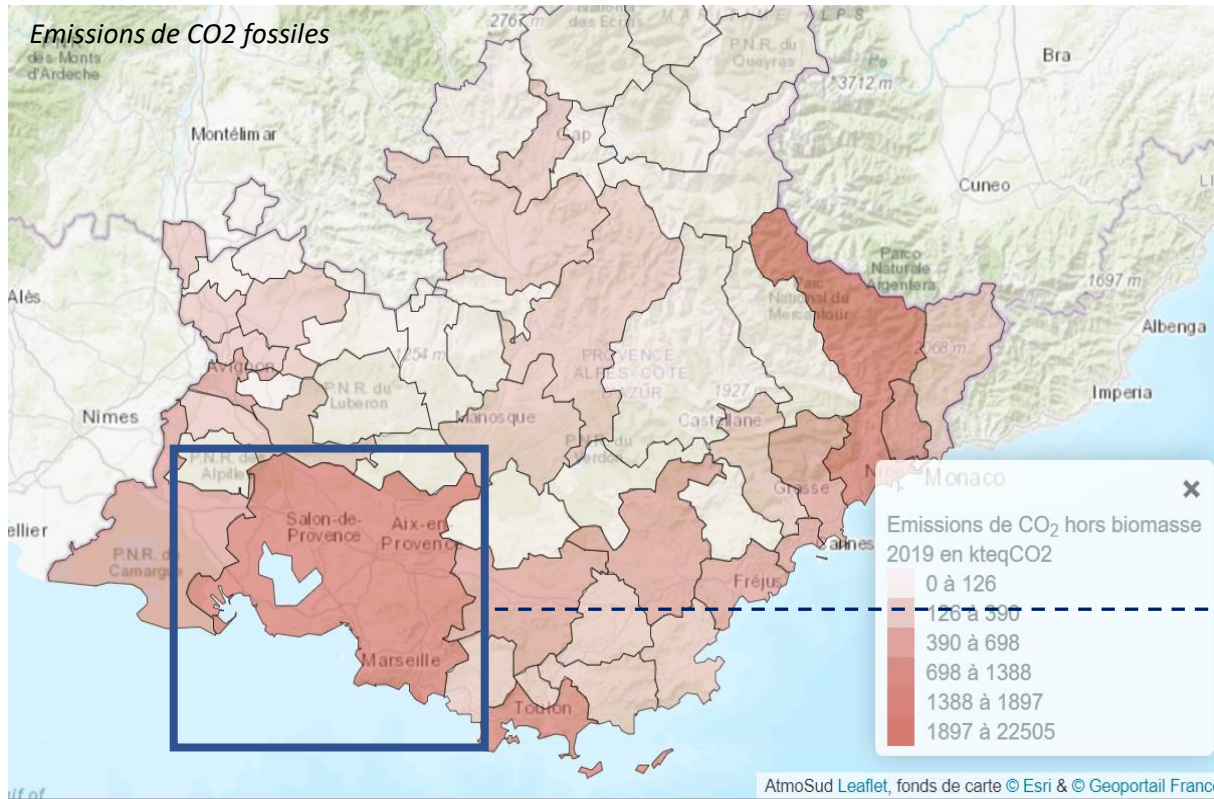
- Mieux estimer les émissions locales/régionales de ces 2 gaz à effet de serre (GES) par des méthodes atmosphériques.
- Améliorer les inventaires d'émissions de ces GES.
- Soutenir les décideurs politiques pour ajuster leurs trajectoires de réduction des émissions de CO₂ et de CH₄ (objectif de neutralité Carbone en 2050).
- Co-bénéfice : améliorer les performances des modèles de transport atmosphérique utilisés pour les prévisions météo et de qualité de l'air.

Apport des méthodes atmosphériques pour vérifier les inventaires d'émissions

Emissions de dioxyde de carbone régionales et métropolitaines

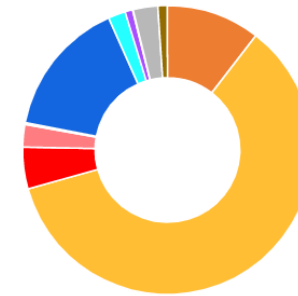
Source : <https://www.cigale.atmosud.org>

Région SUD-PACA :

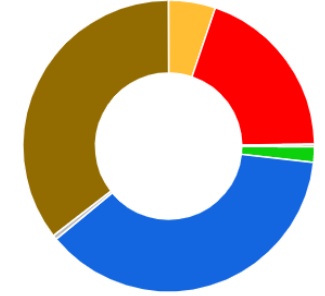


Région : ~ 45,5 MtCO₂/an = 15% des émissions nationales
dont 92% de sources fossiles et 8% de sources biogéniques

Métropole Aix-Marseille-Provence :



96% de sources fossiles
(=22,9 MtCO₂ soit 55% des sources fossiles de la région)



+ 4% de sources biogéniques
(=1 MtCO₂ soit 24% des sources biogéniques de la région)
dont CHAUFFAGE AU BOIS = 0,8%

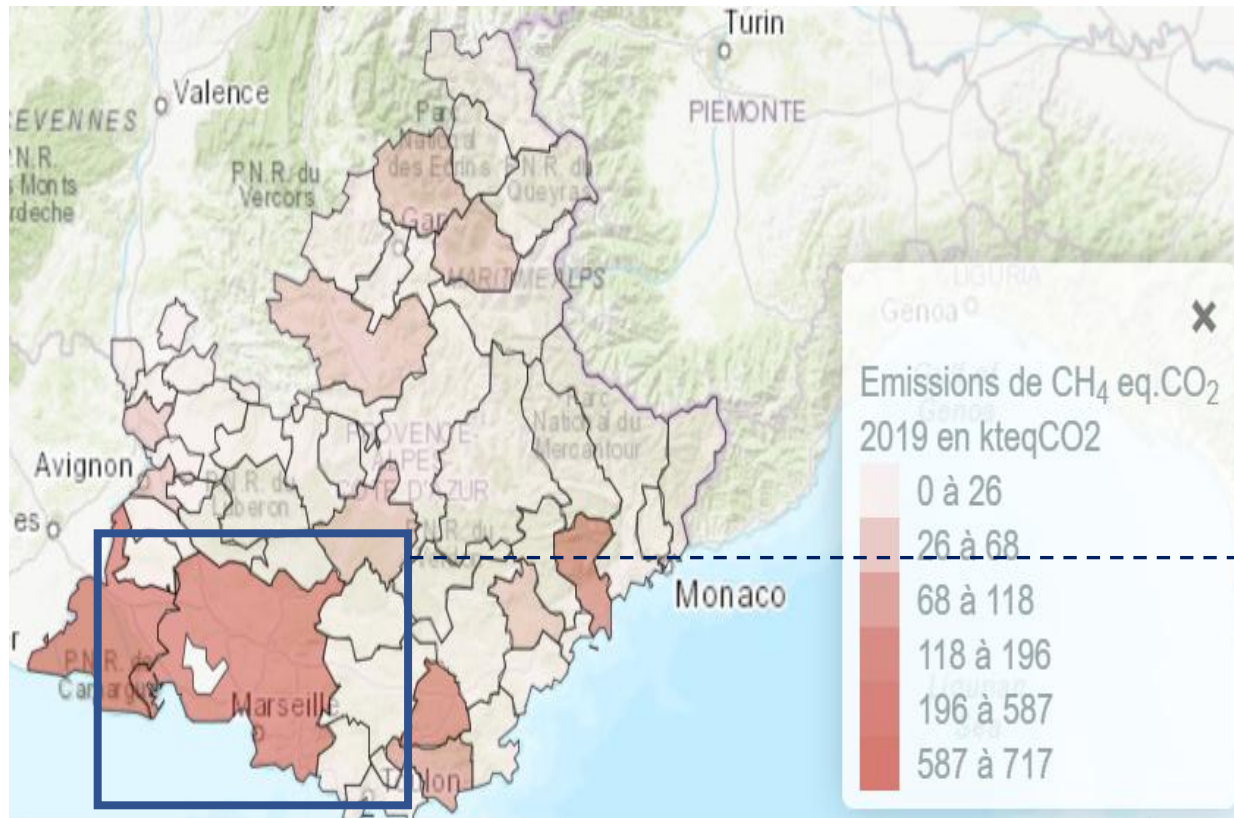
♪ Le saviez-vous? Les zones urbanisées et industrialisées représentent plus de 70% des émissions de CO₂ fossiles globales alors qu'elles ne recouvrent que 3% de la surface terrestre.

Apport des méthodes atmosphériques pour vérifier les inventaires d'émissions

Emissions de méthane régionales et métropolitaines

Source : <https://www.cigale.atmosud.org>

Région SUD-PACA :

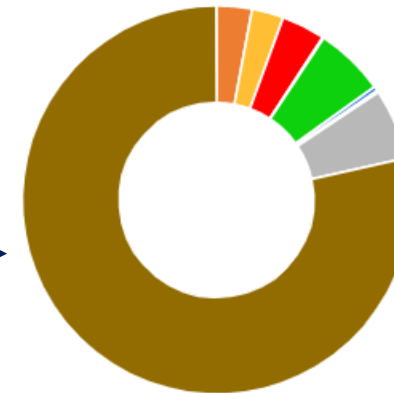


Région : ~ 2,3 MteqCO₂/an soit ~4 % des émissions nationales

Métropole Aix-Marseille-Provence :



Répartition sectorielle 2019



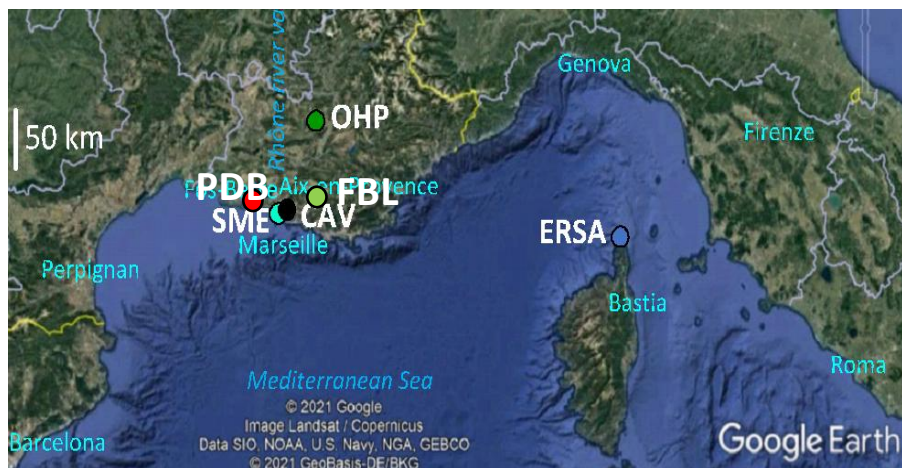
■ Total émissions CH₄ ~ 0,7 MteqCO₂ (soit 30,5% des émissions régionales).

■ Contribution majeure du secteur du traitement des déchets (>78%).

♪ Le saviez-vous? Le méthane (CH₄) a une durée de vie de 12 ans contre environ 100 ans pour le CO₂. De plus, le méthane a un pouvoir radiatif global 28 fois plus puissant que le CO₂. Ainsi, réduire les émissions de méthane est un levier d'action très intéressant afin d'agir plus vite pour la protection du climat.

Réseau d'observation du carbone régional (développé entre 2013 et 2021)

- ❑ 6 sites (rural, urbain, côtier, marin) dont 3 super-sites : OHP (rural), MRS-LCP (urbain) et PDB (urbano-industriel)
– les sites FBL et SME sites sont utilisés pour des campagnes uniquement.
Tous les sites sont équipés d'analyseurs CRDS (Cavity Ring Down Spectroscopy) et calibrés sur l'échelle internationale de référence de la WMO.



Variables collectées :

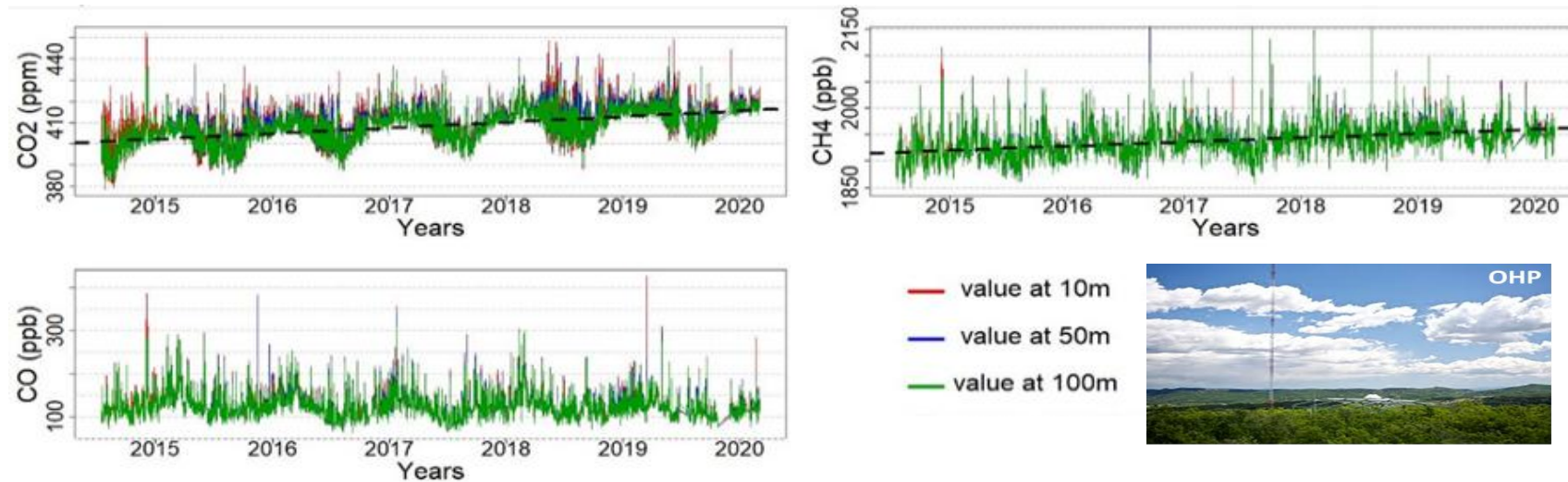
- CO₂ et CH₄ atmosphériques
- Traceurs d'émissions (CO, NOx...)
- Paramètres météo
- Hauteur de couche limite



♪ La couche limite est la couche atmosphérique en contact avec le sol et dans laquelle se dilue les émissions. Ses variations diurnes, synoptiques et saisonnières modulent les concentrations des espèces émises.

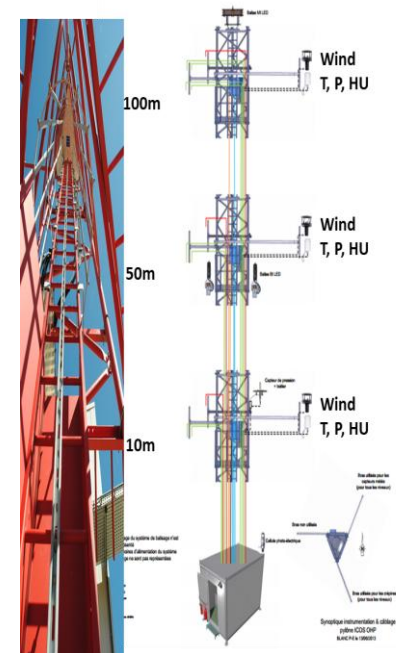
■ Site appartenant au réseau national ICOS-France : LA station de référence régionale des GES atmosphériques

Suivre l'évolution régionale sur le long-terme des GES (CO_2 , CH_4) & du CO (traceur de combustion) et comprendre leur variabilité en lien avec les événements régionaux à globaux (ENSO, éruptions volcaniques, sécheresses, ...).



L'évolution inter-annuelle des gaz à effet de serre à l'OHP est similaire à celle de MAUNA LOA (HAWAII) : +2,7 ppm/an pour le CO_2 , +8 ppb/an pour le CH_4

20% des points proviennent d'émissions locales. Le reste est représentatif de l'atmosphère bien mélangée et permet de suivre l'évolution du CO_2 et du CH_4 sur le long-terme.

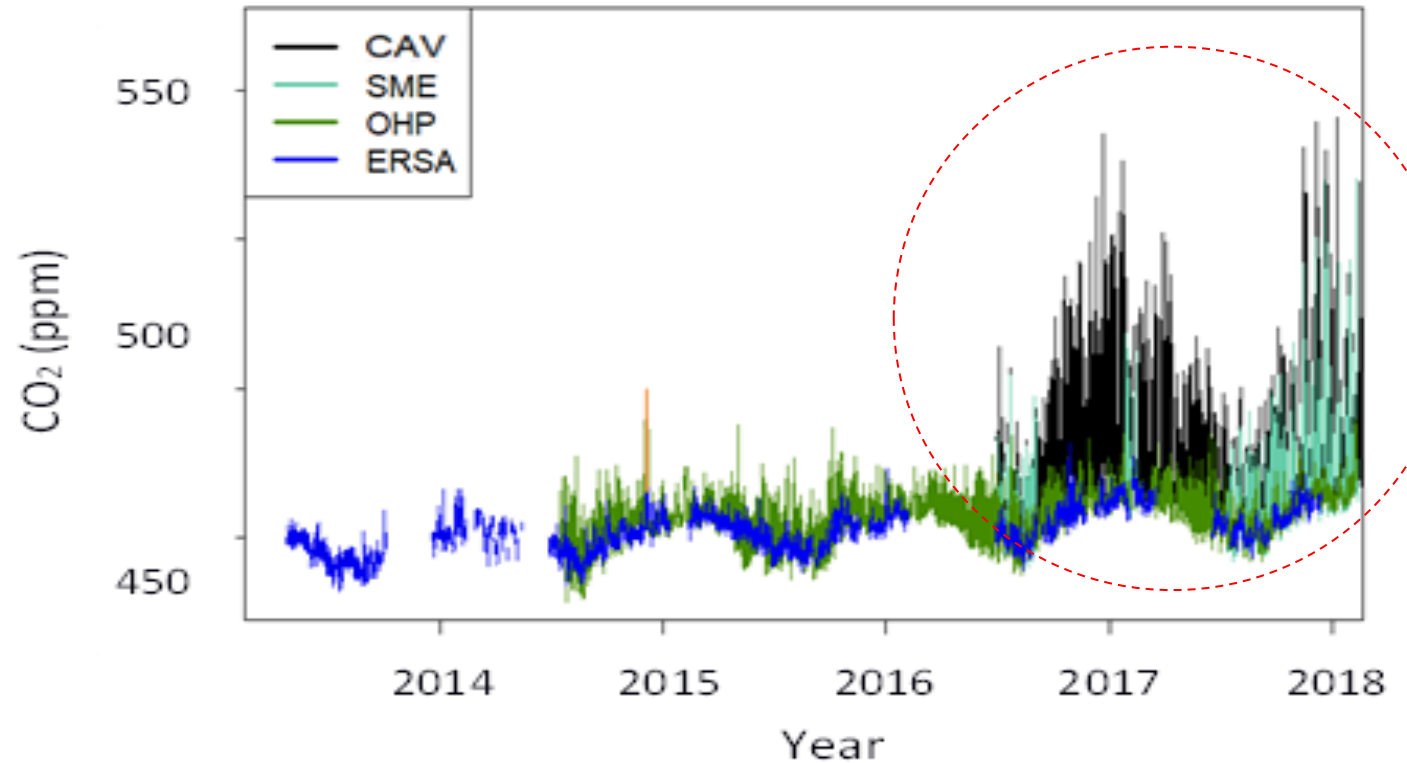


Observatoire régional du Carbone : Environnement urbain à Marseille-Longchamp

- Comprendre la variabilité du CO₂ atmosphérique en région SUD-PACA et le rôle des émissions anthropiques locales à régionales :



Panaches dus aux émissions locales de Marseille

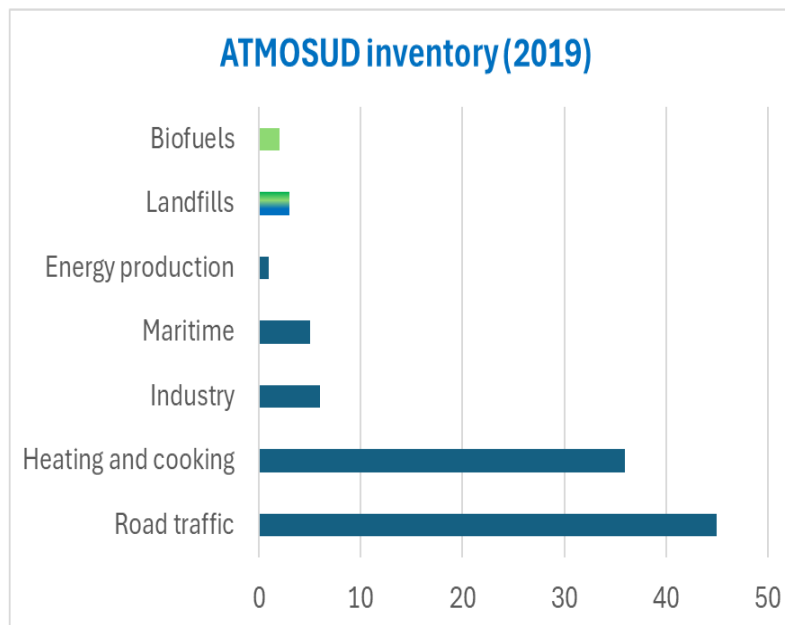
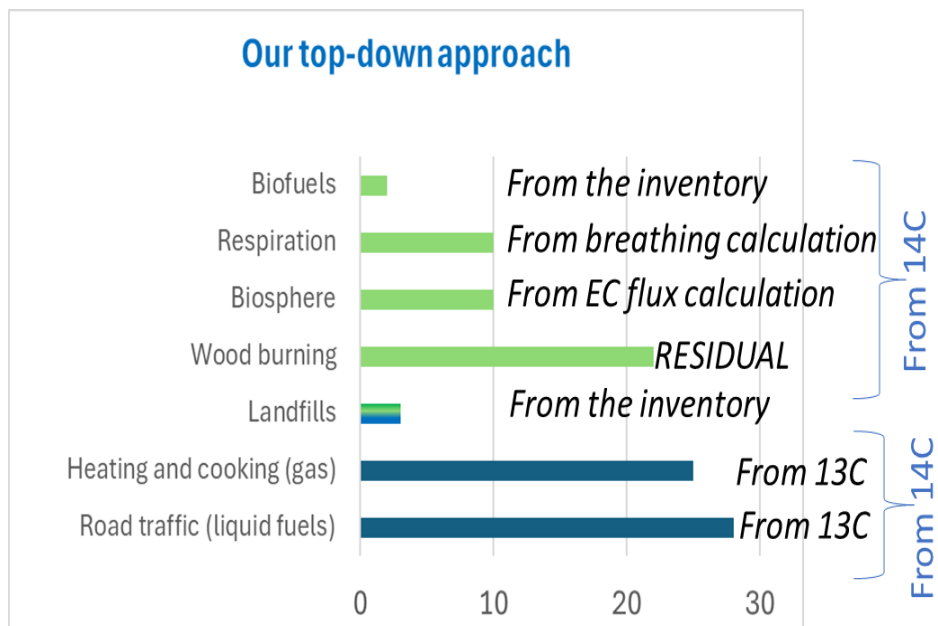


CAV est l'ancien nom du
site de Marseille-
Longchamp (MRS-LCP)

Observatoire régional du Carbone : Environnement urbain à Marseille-Longchamp

- Quantifier le rôle des **sources et des puits de carbone régionaux** (notamment sur les zones urbanisées et industrialisées) et **améliorer l'inventaire d'émissions** pour **aider les décideurs politiques à définir leurs trajectoires de réduction d'émissions** anthropiques de GES

=> *Projets OT-MED AMC et ANR COoL-AMmetropolis ; thèses L. Lelandais, A. Riandet, P. Bosio ; postdoctorat B. Nathan).*



Mesures utilisées : CO_2 , $^{14}\text{CO}_2$, $^{13}\text{CO}_2$, NO_x , CO, COV, carbone suie.

➤ **Le CHAUFFAGE AU BOIS semble une source de CO_2 assez importante (~20%) à Marseille, sous-estimée dans l'inventaire d'ATMOSUD.**

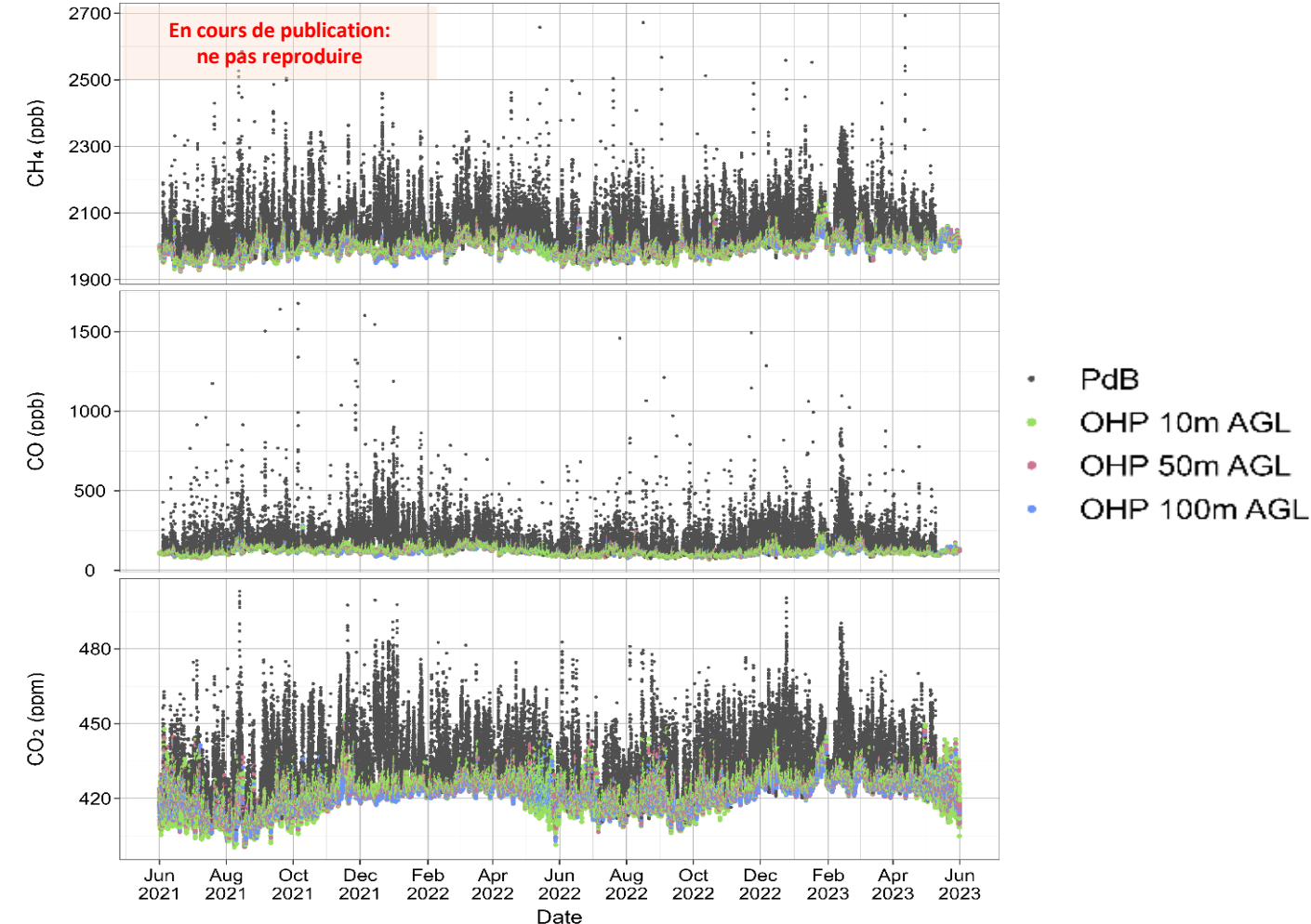
➤ **L'inventaire a été corrigé depuis.**

Relative contribution of the different sources to total CO_2 emissions in Marseille (in %)

Estimated uncertainty on the top-down approach is ~35%.

Lelandais et al, in prep

❑ Suivi du CO₂ et du CH₄ et soutien à la mise en place de la transition énergétique :



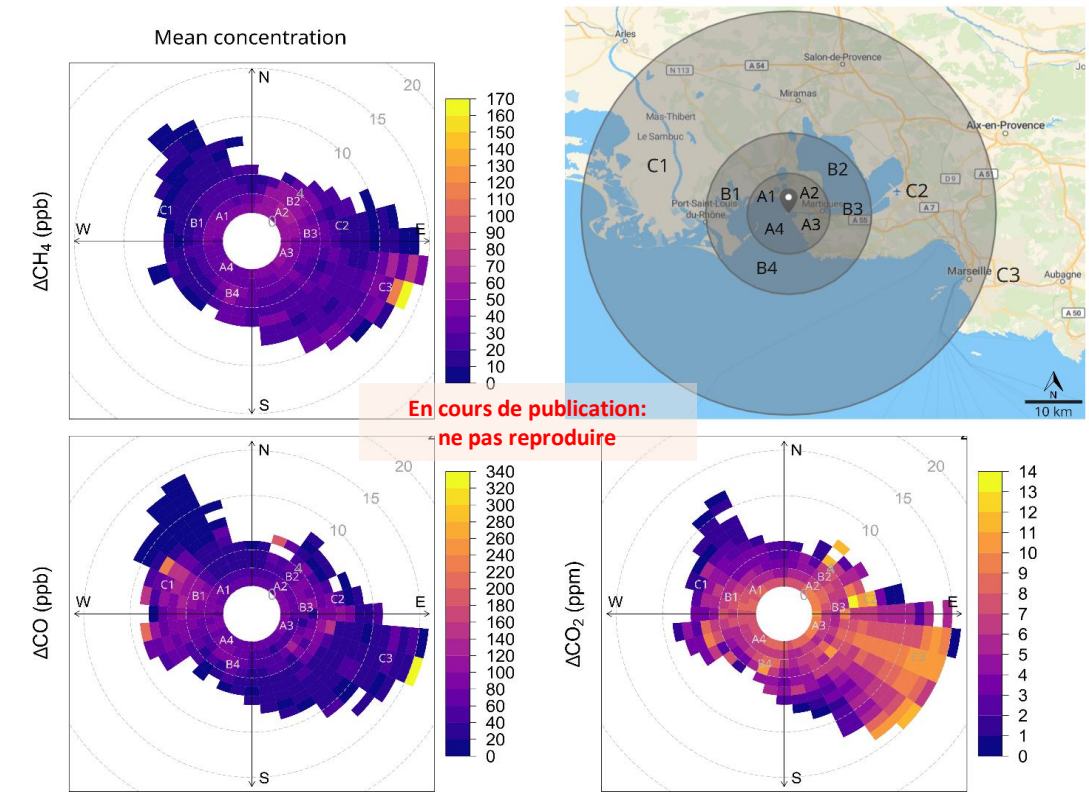
Concentration du CH₄, CO et CO₂ atmosphérique
à Port-de-Bouc en comparaison à l'OHP (juin 2021-mai 2023)

- Projets ANR COoL-AMmetropolis, Région-ATMOSUD METHY-GREEN et ITEM HYFLEX
- Thèse de Pauline Bosio (2022-2026), Postdoctorat de Khalid Sipra (2025-2026), Thèse d'Aurélie Riandet (2019-2023)



Vue sur le complexe industriel de LAVERA depuis la station de suivi des GES ANR COoL-Ammetropolis à Port-de-Bouc

Observatoire régional du Carbone : Environnement urbano-industriel à Port-de-Bouc



Rose des augmentations des concentrations de CH_4 , CO et CO_2 observées selon la direction et la vitesse du vent à Port-de-Bouc entre juin 2021 et mai 2023, après soustraction des concentrations moyennes de chaque gaz observé à l'OHP à chaque saison pour enlever la saisonnalité des signaux. Chaque cellule représente 10 degrés en direction de vent et 1 m/s en vitesse de vent.

Bosio et al, Elementa, in rev.

Secteur de vent	$\Delta\text{CH}_4/\Delta\text{CO}$	$\Delta\text{CH}_4/\Delta\text{CO}_2$ (1/1000)	$\Delta\text{CO}/\Delta\text{CO}_2$ (1/1000)
B1: Observé Inventaire	0.31 ± 0.01 0.11	2.98 ± 0.08 0.60	9.55 ± 0.12 5.63
B2: Observé Inventaire	0.56 ± 0.01 0.56	5.19 ± 0.05 1.83	8.28 ± 0.09 3.28
B3: Observé Inventaire	0.77 ± 0.03 0.17	5.16 ± 0.23 0.17	8.10 ± 0.11 0.98
B4: Observé Inventaire	0.37 ± 0.01 0.29	4.08 ± 0.03 2.53	13.10 ± 0.37 8.83

En cours de publication:
ne pas reproduire

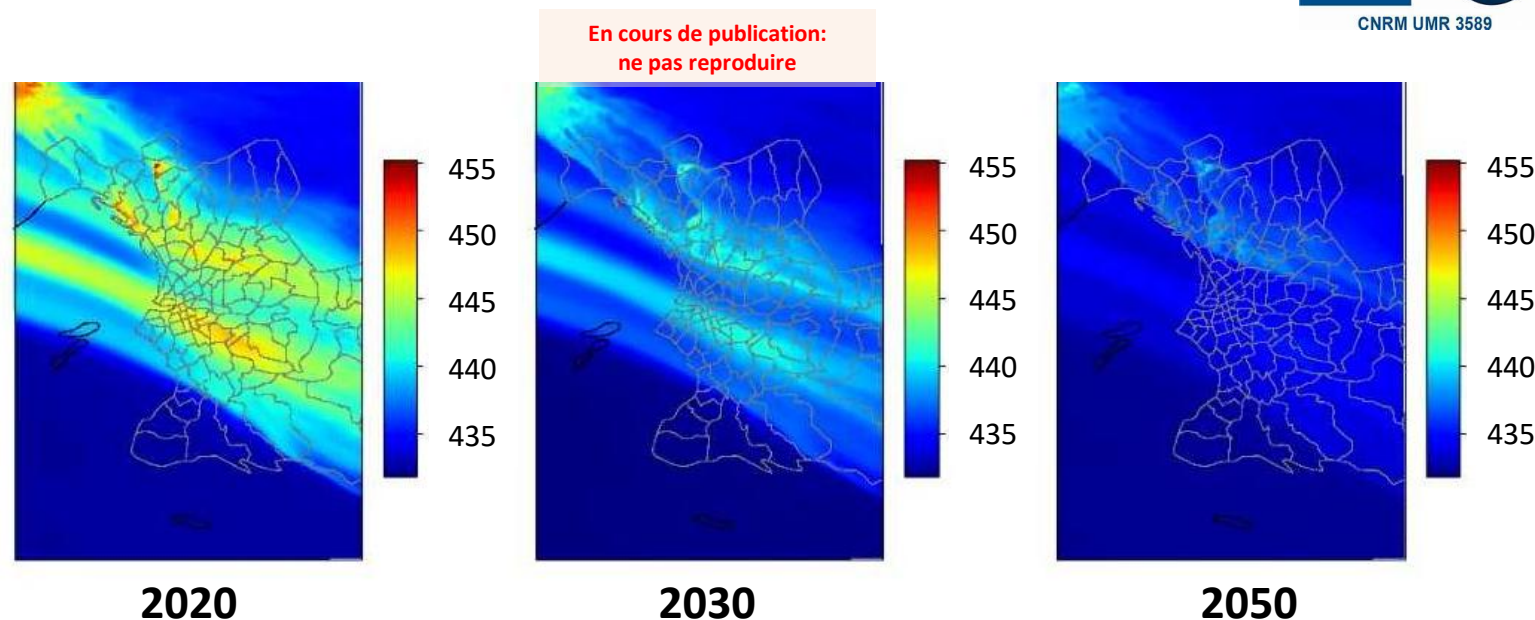
En comparaison à l'inventaire d'ATMOSUD 2019 :

- Les rapports CO/CO_2 sont plus forts dans l'atmosphère : cela suggère une sous-estimation du **CO** ou une sur-estimation du **CO₂** dans l'inventaire (notamment, absence du secteur maritime dans l'inventaire CO_2 et CO 2019).
- Dans plusieurs secteurs de vent, les rapports CH_4/CO et CH_4/CO_2 observés sont plus forts, suggérant une **sous-estimation des émissions de CH₄** dans l'inventaire.

Observatoire régional du Carbone : Scénarios de réduction du CO₂ en 2030 et 2050

- Réalisation de scénarios de réduction des émissions métropolitaines de CO₂ avec le modèle MESO-NH en partant de l'état des émissions en 2019 selon l'inventaire d'ATMOSUD.
- Les données des 3 super-sites ont permis de caler le modèle et d'estimer ses performances.

Projets ANR COoL-AMmetropolis et OT-MED AMC
Claeys et al, in prep
Nathan et al, Atmosphere, 2024



Simulations avec le [modèle MESO-NH](#) de la baisse de la concentration de CO₂ (en ppm) à 10 m d'altitude sur Marseille pour le scénario de sobriété du projet ANR COoL-AMmetropolis (coord. I.Xueref-Remy): ici les 20 janvier 2020, 2030 et 2050 à 6h UTC.

♪ A vos agendas : conférence finale du projet ANR COoL-AMmetropolis
au PHARO le jeudi 25 juin 2026 (sur inscription : contactez-nous!)

Améliorer la modélisation du mélange atmosphérique (et donc les outils de prévisions)

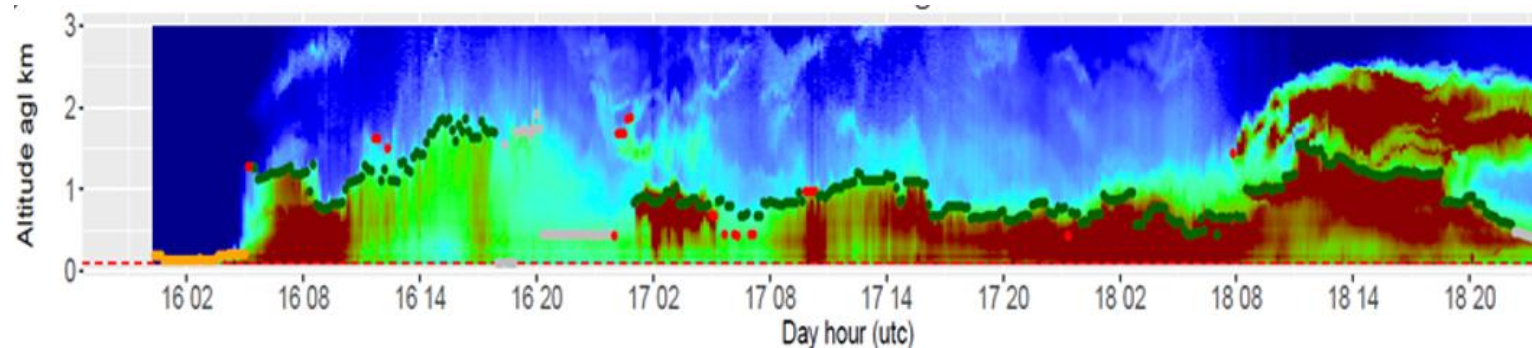
Mesure de la hauteur de couche limite atmosphérique (hCLA) à Marseille-Longchamp depuis 2021

- La hauteur de couche limite contrôle la dilution des émissions dans l'atmosphère et les concentrations résultantes
- Elle est difficile à modéliser et elle est donc la cause d'incertitudes dans les modèles atmosphériques
- Aucune information sur sa variabilité diurne et saisonnière* à Marseille avant 2021 => **déploiement d'un LIDAR aérosols (CIMEL CE376).**

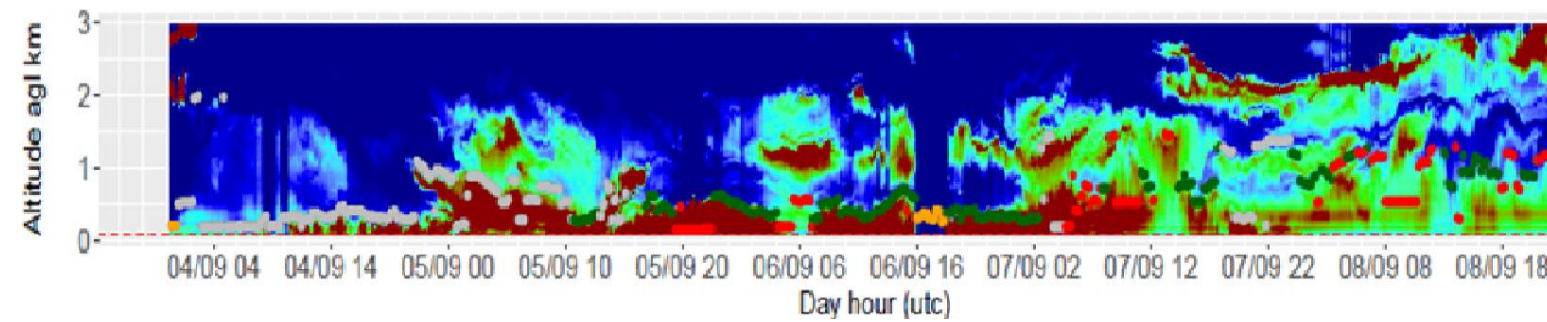
* La campagne ESCOMPTE de 2001 avait permis de caractériser la hCLA sur Marseille de jour l'été uniquement.

La hCLA (points verts) a été mesurée pour 2 régimes de vent typiques en été (ici) et en hiver :

- ❑ **MISTRAL** (vent puissant du nord-ouest entraînant une forte turbulence) :
La hCLA varie de 600 m (hiver, nuit) à 1.4 km (été, jour)



- ❑ **Brises de mer et de terre** (vents faibles locaux du sud-ouest et du nord-est) :
La hCLA varie de moins de 250m (hiver, nuit) à 800 m (été, jour)



Flag	
●	Fog
●	Good
●	Bad
●	Undetermined

Projet ANR COoL-AMmetropolis
Riandet et al, Rem. Sensing, 2023

En résumé

Les super sites OHP, MRS-LCP et PDB sont caractérisés par une **représentativité spatiale spécifique** indispensable pour étudier chaque environnement régional ainsi que par la **qualité, la continuité et la complémentarité** des mesures qui y sont collectées.

❑ **Nous avons un super site rural de référence pour suivre l'évolution régionale des GES : l'OHP**

Le site de l'OHP appartient au SNO ICOS-Fr INSU et est l'un des 12 sites français de suivi des GES sur le long-terme. Il est labellisé comme Site Instrumenté de l'INSU et de l'IR ACTRIS-Fr.

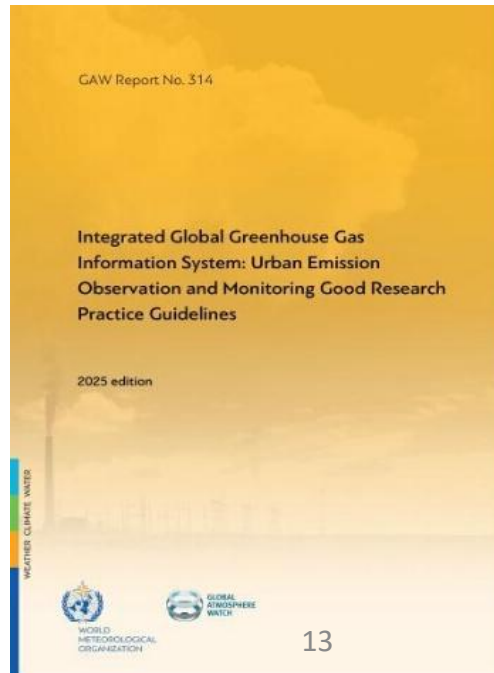
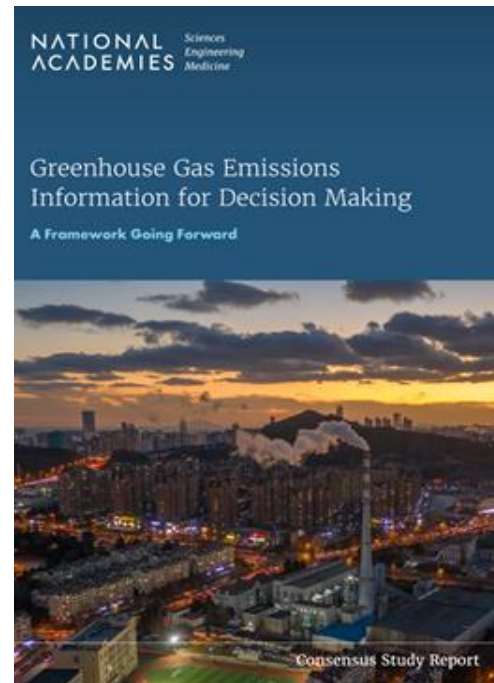
❑ **Nous avons un super site urbain de référence : Marseille-Longchamp**

Le site de MRS-LCP est aussi labellisé Site Instrumenté INSU pour l'IR ACTRIS-Fr. Il bénéficierait d'être équipé rapidement de mesures de CO atmosphérique de qualité pour distinguer les émissions de CO₂ et de CH₄ provenant de sources de combustion de sources naturelles.

❑ **Nous avons un site urbano-industriel de référence : Port-de-Bouc**

Le site de PDB est unique car très peu de sites de suivi du CO₂ et du CH₄ en milieu urbano-industriel existent, même à l'international. Il bénéficierait de collecter d'autres traceurs comme les NOx et le carbone suie pour améliorer le partitionnement des sources d'émissions.

Ces travaux ont permis d'améliorer l'inventaire d'ATMOSUD et les outils de modélisation atmosphérique, et de **délivrer des recommandations internationales à très haut niveau** sur l'estimation des émissions de GES (WMO-IG3IS report 2025 ; NAS report 2022 ; présentations à la WMO en 2023, en 2025 et bientôt en 2026). **L'IMBE est intégré dans le groupe international IG3IS de la WMO** dédié à l'étude des émissions de GES en milieu urbain ou industriel.



Perspectives



- ❑ **Projet ANR METHATRACK** (coord. I. Xueref-Remy, IMBE) (2026-2030) : en phase d'évaluation par l'ANR

Suivi des émissions de méthane sur la métropole d'Aix-Marseille-Provence et notamment dans la zone de Fos-Berre (avec un nouveau site proposé à Aix-en-Provence pour compléter notre observatoire régional du Carbone).

- ❑ **Projet CPER OHP-GEO** (coord. I. Xueref-Remy PYTHEAS, 2026-2029): financé

Achats prévus en 2026 d'une instrumentation COV et NOx et d'un lidar aérosols multi-voies pour l'OHP => intégration de ces activités dans l'IR ACTRIS-France, et pour le lidar dans ACTRIS-Europe.

- ❑ **Projet PEPR RESILIENCE** (coord. B. D'Anna LCE, 2025-2030): financé

Contribution de l'IMBE = Estimation de l'impact des aménagements urbains sur le CO₂ à Marseille avec le support d'un.e doctorant.e - sujet ci-dessous :

♪ **Sujet de thèse actuellement à pourvoir à l'IMBE :**

Peut-on mettre au point un indicateur de suivi de l'efficacité des mesures de réduction des émissions de CO₂ à Marseille à partir de nos mesures atmosphériques ?

(cadre du PEPR, sites impliqués: MRS-LCP, PDB & OHP, en collaboration forte avec ATMOSUD et le LCE).



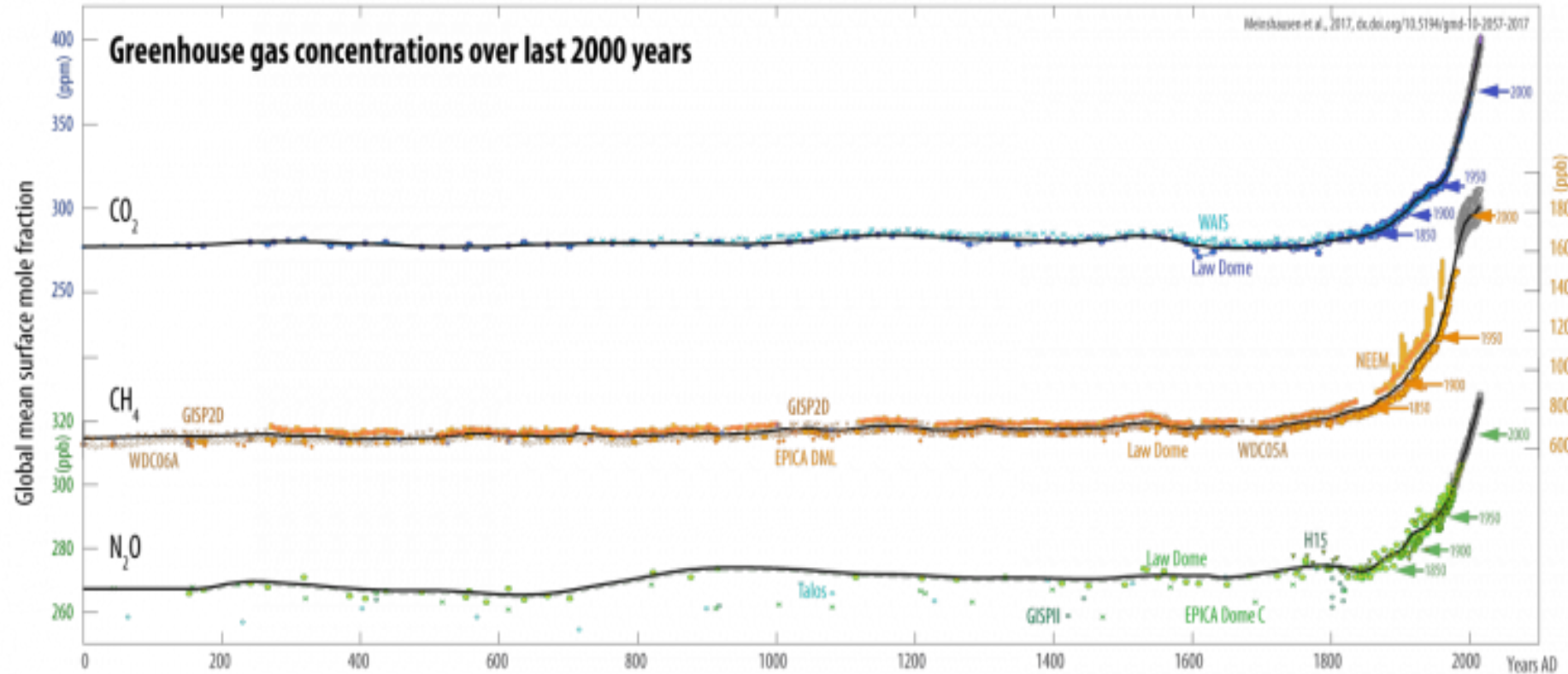
Merci pour votre attention

Contact : Irène Xueref-Remy, IMBE
irene.xueref-remy@imbe.fr



Evolution des teneurs en gaz à effet de serre depuis 2000 ans

=> Effet de serre additionnel en croissance très rapide=> l'ère Anthropocène



Source: Meinshausen et al, 2017

Evolution depuis 1850 (in 2023) :

CO₂ : 280 ppm to 419,3 ppm (+149,7%)

CH₄ : 800 ppb to 1890 ppb (+236%)

N₂O : 270 ppb to 334 ppb (+123,7%)

Taux de croissance annuel récent :

+2-3 ppm (+3,3 ppm en 2023!)

+5-12 ppb

+0,8-1,5 ppb

Observations / instrumentation

	Site type	Sampling height (mAGL)	CO ₂ , CH ₄ , meteo	CO	ABLh
OHP (ICOS-Fr)	Regional continental background	10,50, 100m	≥ 2014	≥ 2014	≥ 2020
ERSA (ICOS-Fr)	Marine background	50m	≥ 2013	≥ 2013	-
CAV	Urban	5m	≥ 2016	Campaigns	≥ 2020
SME	Coastal urban background	5m	2016-2018	2016-2018	-
FBL (ICOS-Eco)	Local continental background	17m	2018-2021 (meteo since 2010)	2018-2021	-
PDB	Urbano-industrial	5m	≥ 2021	≥ 2021	≥ 2015 (airport)



CO₂, CH₄ and CO CRDS measurements:

- CAV : PICARRO G2301 (no CO)
 - All other sites: PICARRO G2401
- => Calibrated on WMO international scales
=> Data treated according to ICOS (Hazan et al, 2016)
=> Accuracy and precision : CO₂ ~ 0,1 ppm, CO ~ 8 ppb

Meteorological measurements (MTO):

Campbell sensors (P, T, HU)

Intensive field campaigns:

¹⁴C and ¹³C in CO₂
Precision ~2 permils

+

VOCs

(CAV, PDB and FBL):

January 2020

July-August 2021

Boundary layer height (ABLh) from Lidars

extracted by a Haar wavelet method (Riandet et al, 2023) :

- At OHP and CAV :

CIMEL CE316 aerosol backscattered light Lidars

CIMEL CE318 Photometers

+ radiosoundings at OHP

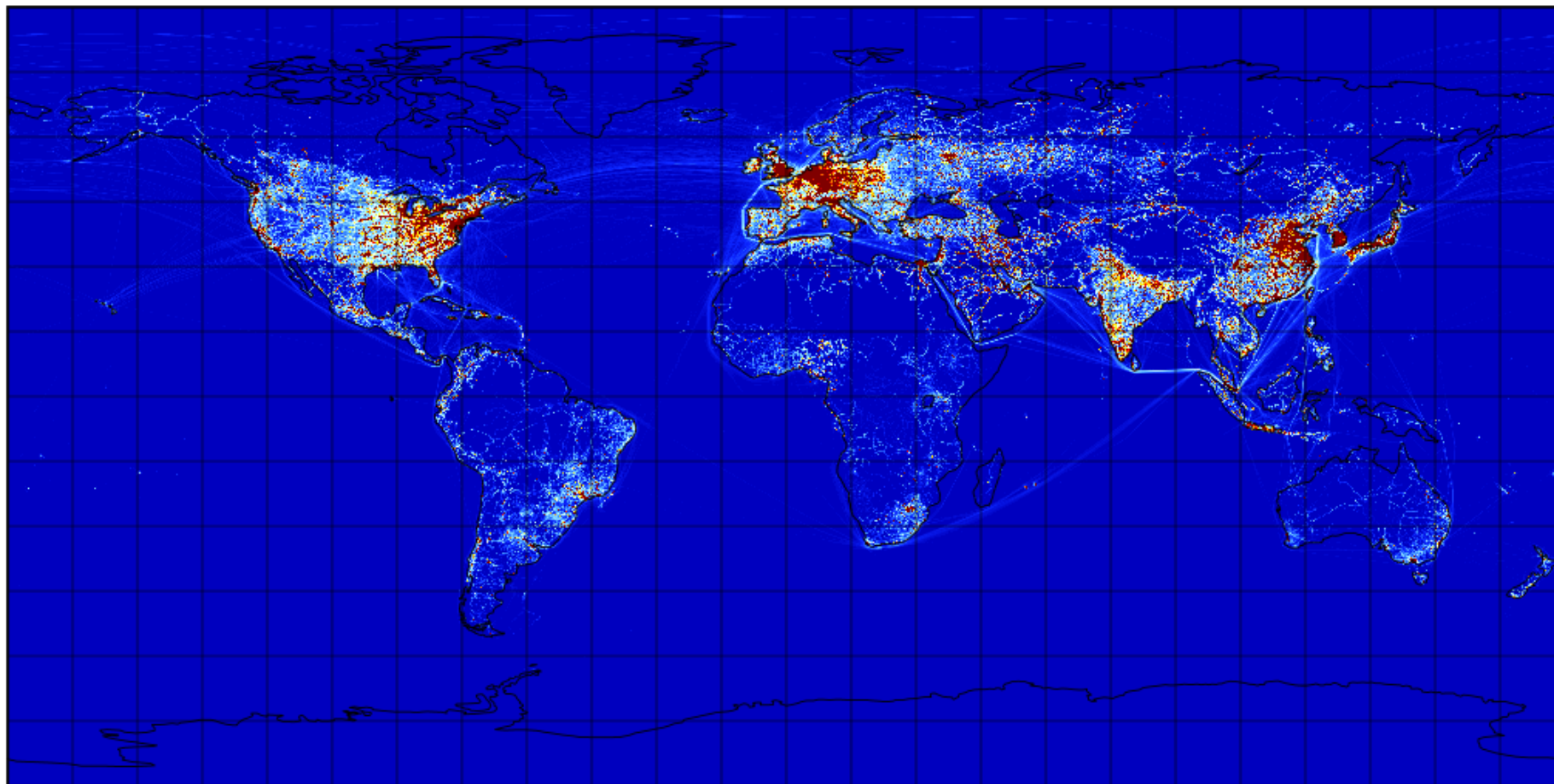
At Marignane (close to PDB): VAISALA CL31 ceilometer

Resolution : 15m, 1mn (averaged on 10mn)

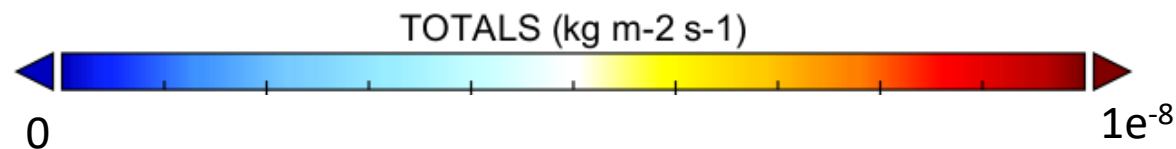
Emissions de CO₂ fossiles : « hotspots »

Chine et USA en première ligne – Benelux et Europe sont également de forts émetteurs.

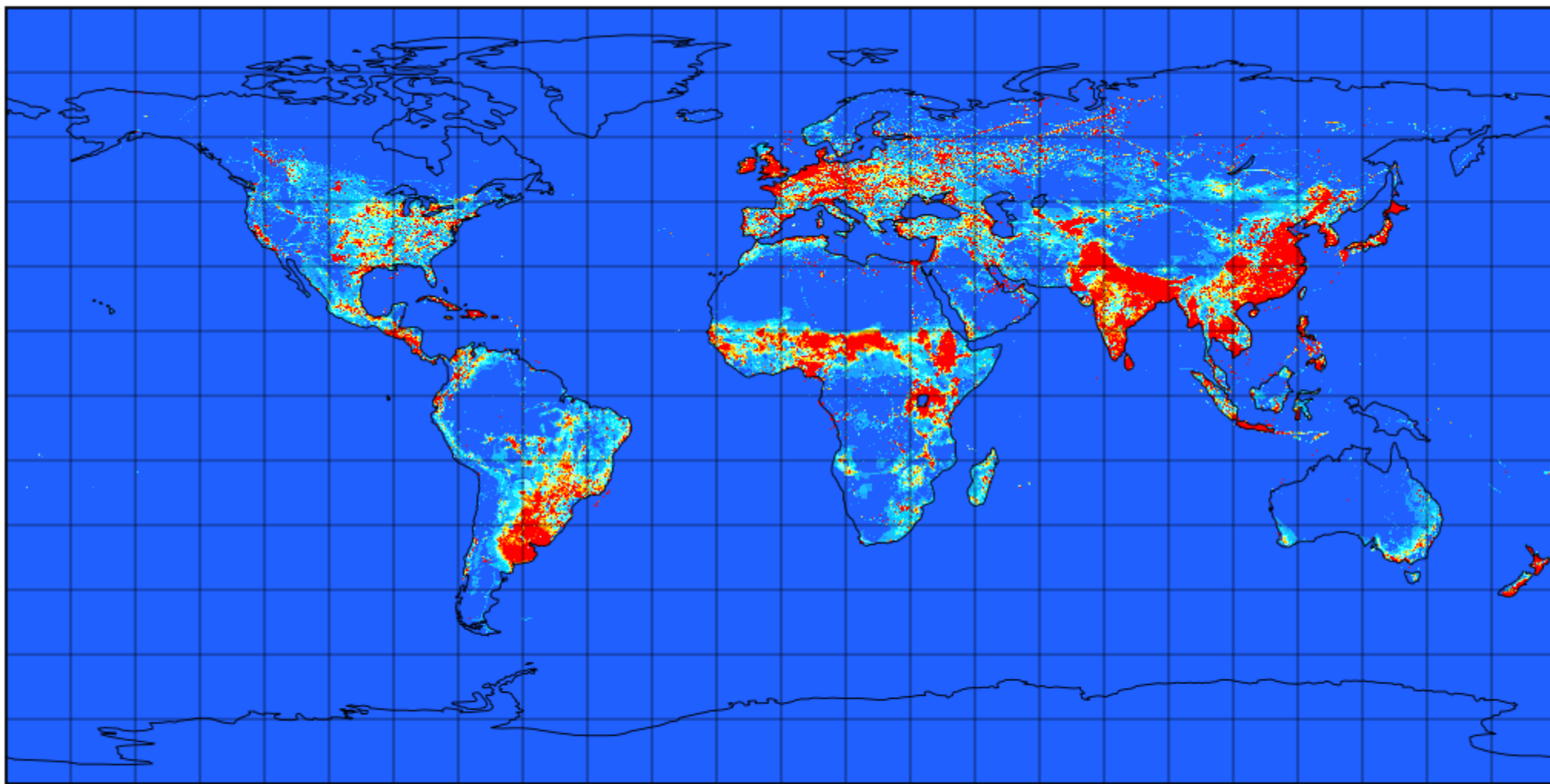
Rôle prédominant des zones urbanisées et industrialisées : ~70% des émissions de CO₂ fossile



EDGAR 2023



Emissions de méthane



TOTALS (kg m⁻² s⁻¹)

EDGAR 2023

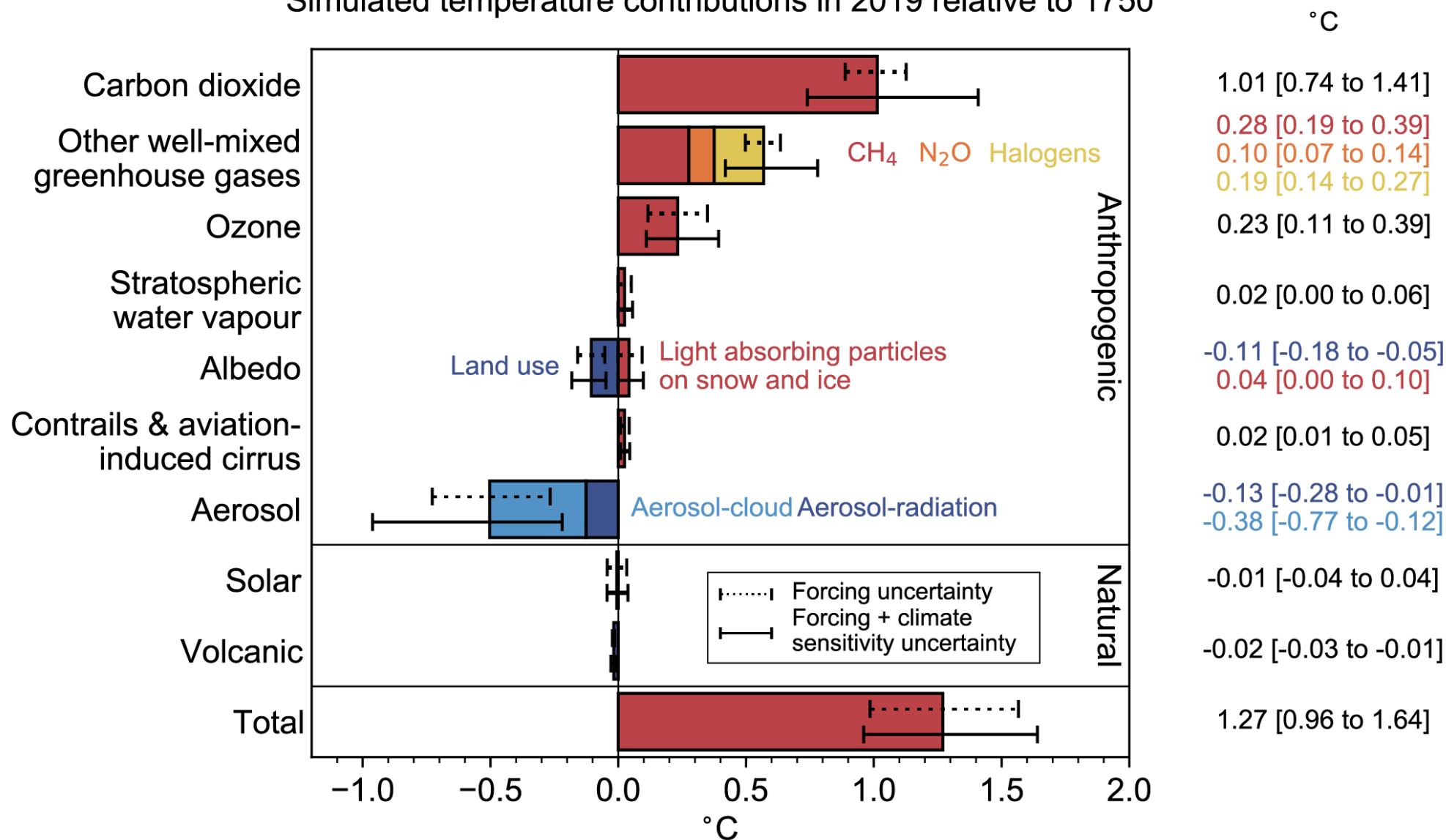


0

1e-10

Composés causant le réchauffement climatique (IPCC 2021)

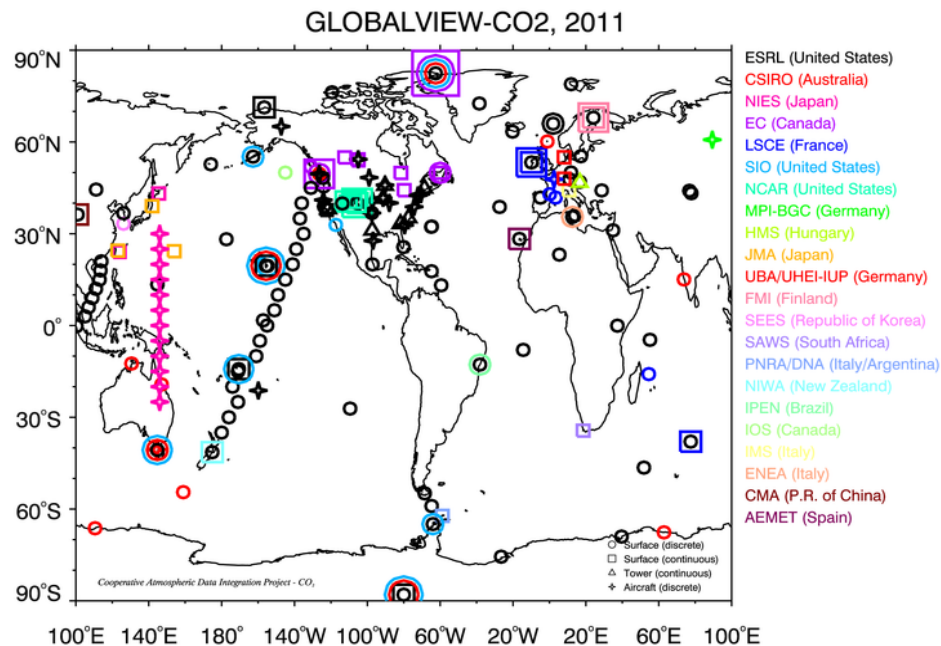
Simulated temperature contributions in 2019 relative to 1750



Incertitudes =
enjeux
scientifiques

Réseau global d'observation des GES atmosphérique (+ réseaux régionaux et urbains depuis 2010, non montrés ici)

Réseau français ICOS-France



Source : LSCE, ICOS-Fr and ICOS-ATC teams

