

LE PROJET ANR COOL-AMMETROPOLIS

Résultats issus de nos observations atmosphériques.

Irène Xueref-Remy

OSU PYTHEAS / Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Ecologie marine et continentale

CNRS INSU / Aix-Marseille-Université

irene.xueref-remy@imbe.fr

CONTEXTE ET OBJECTIFS

1- L'inventaire d'émissions du CO₂ d'ATMOSUD sert de référence pour évaluer les trajectoires des émissions et définir les plans d'actions, mais il n'a jamais été vérifié.

Objectif 1 : vérifier indépendamment l'inventaire d'ATMOSUD sur les territoires de la métropole Aix-Marseille-Provence grâce à nos données et méthodes atmosphériques.

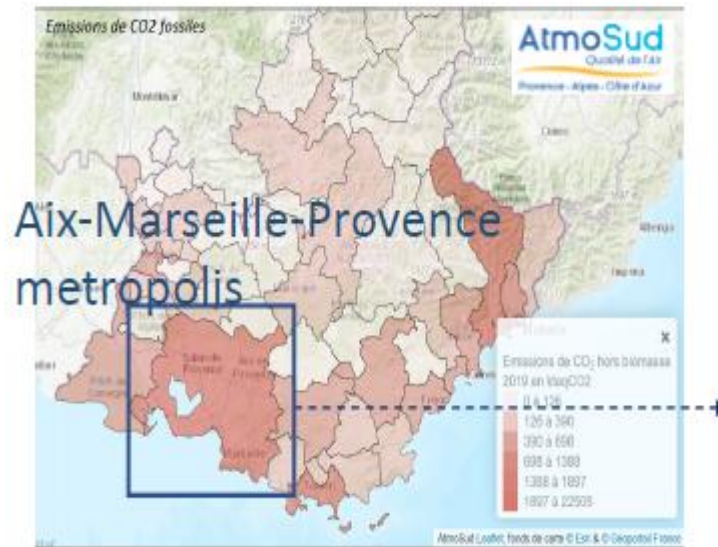
2- La modélisation du CO₂ et de l'ICU requiert de caractériser le mélange atmosphérique des émissions pour caler le modèle MESO-NH.

Objectif 2 : mesurer et analyser la dynamique atmosphérique (sur Marseille) et fournir des jeux de données de qualité pour évaluer les performances du modèle.

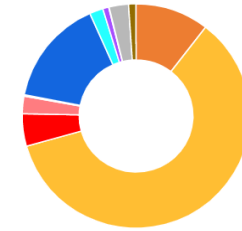
POINT DE DÉPART : QUE DIT L'INVENTAIRE D'ATMOSUD?



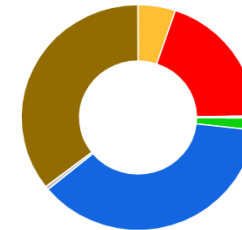
L'inventaire ATMOSUD couvre la Région SUD-PACA



Emissions de CO₂ de la métropole Aix-Marseille-Provence (2019)



96% de sources fossiles
(55% des sources fossiles régionales)



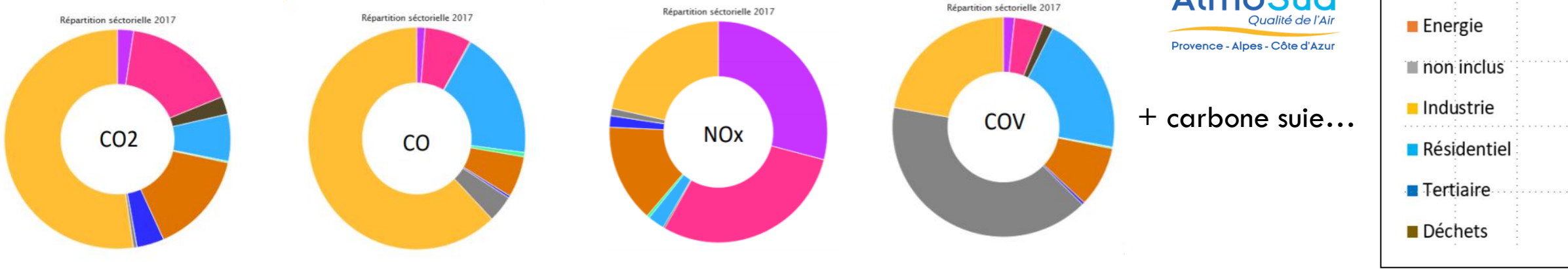
4% de sources biogéniques
(=24% des sources biogéniques régionales)
dont la combustion du bois = 0,8%

- Airborne
- Landfills
- River related transport
- Private buildings
- Energy production
- Railway activity
- Marine activity
- Road traffic
- Agriculture
- Non included emitters
- Industry (energy excluded)
- Commercial buildings

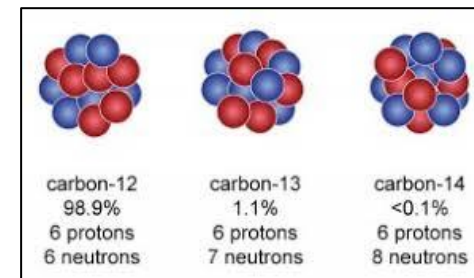
Les émissions de CO₂ liées à la combustion des énergies fossiles représentaient la quasi-totalité des émissions dans l'inventaire avant sa vérification par nos observations.

POINT DE DÉPART : QUELLES VARIABLES ATMOSPHÉRIQUES MESURER POUR APPLIQUER NOS MÉTHODES ?

- La concentration du CO₂ atmosphérique.
- La concentration d'espèces co-émises au CO₂ lors des processus de combustion.

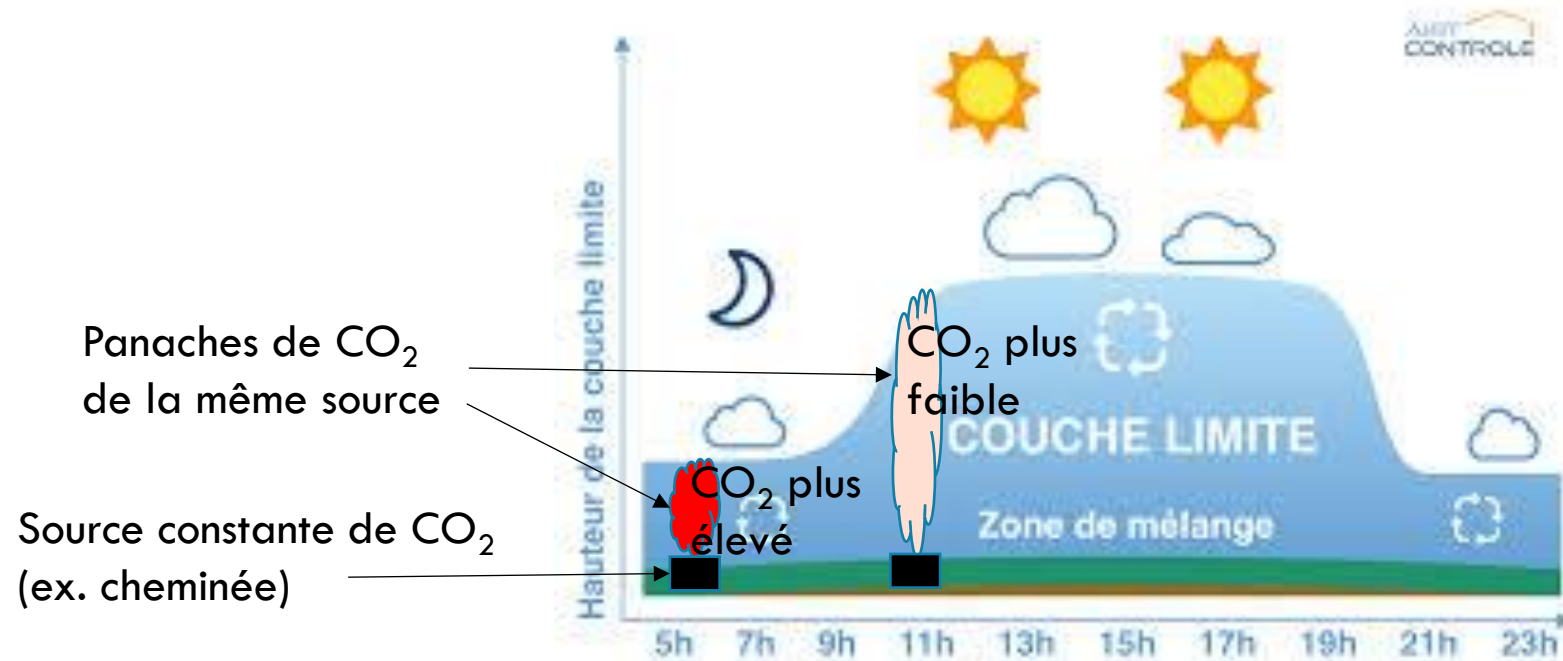


- Les isotopes du Carbone (¹⁴C et ¹³C), qui renseignent sur l'origine de la source (il n'y a plus aucun atome de ¹⁴C dans les combustibles fossiles car ils ont été désintégrés ; et la teneur en ¹³C diffère selon le type de combustible et sa région de formation).



POINT DE DÉPART : QUELLES VARIABLES ATMOSPHÉRIQUES MESURER POUR APPLIQUER NOS MÉTHODES ?

- Les paramètres météorologiques classiques (vent, température, pression, humidité).
- La hauteur de la couche limite atmosphérique (ou hauteur de mélange des émissions dans l'atmosphère, qui module fortement la concentration du CO₂ et que les modèles ont du mal à représenter).



MÉTHODOLOGIE : MISE EN PLACE D'UN OBSERVATOIRE DU CO₂ ET DES CONDITIONS ATMOSPHÉRIQUES SUR LA MÉTROPOLE (PAS SUR TOUTE ENCORE 😊)

- ❑ 6 observation sites (rural, urban, coastal, marine)
- ❑ Variables : **atmospheric CO₂** (Picarro CRDS analyzers, WMO scaled, precision <0,1 ppm), **emission tracers (CO, NOx...)**, **meteorological measurements, atmospheric boundary layer height** (CIMEL aerosols lidars).



* CAV
=ancien nom
du site
Marseille-
Longchamp



Thèse
d'Aurélié
Riandet
(IMBE)

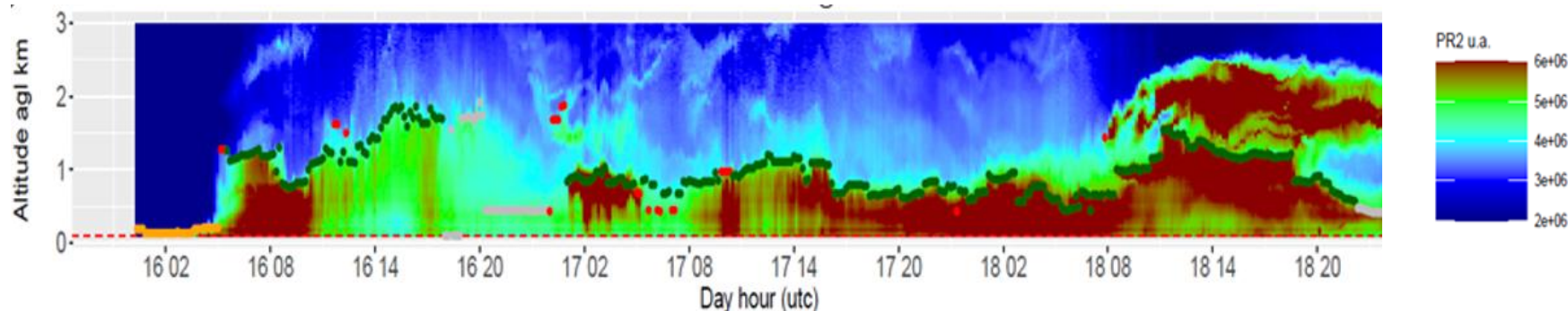
RÉSULTATS POUR AMÉLIORER LA MODÉLISATION DU MÉLANGE DES ÉMISSIONS (ET DONC LES SIMULATIONS DES SCÉNARIOS)



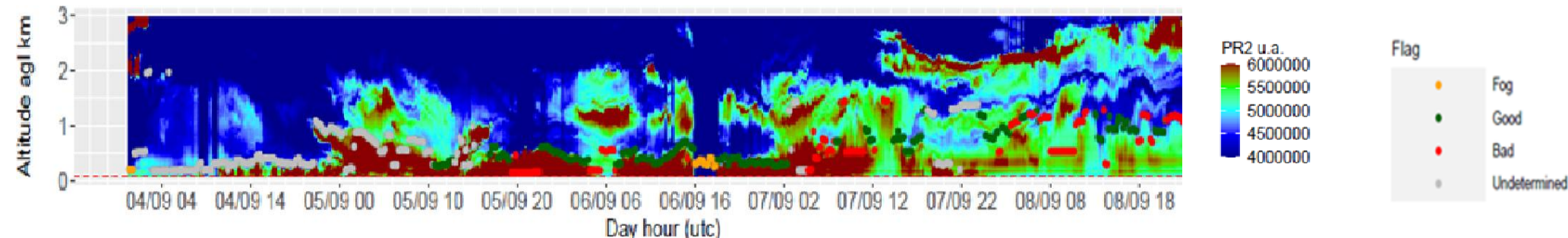
=> Mesure **par Lidar** de la couche limite atmosphérique à Marseille **ÉTÉ ET HIVER, JOUR ET NUIT**, pour la première fois (*campagne ESCOMPTE 2001 = été et jour*)

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) => PLUS+ DE MELANGE (CO₂ baisse)
La hCLA varie de 600 m (hiver, nuit) à 1.4 km (été, jour)



- ❑ **Brises de mer et de terre** (vents faibles locaux du SW et du NE) => MOINS DE MELANGE (CO₂ augmente)
La hCLA varie de moins de 250m (hiver, nuit) à 800 m (été, jour)



Le lidar aérosols R2D2 permet de détecter les gradients de concentrations d'aérosols caractéristiques de la hCLA.

Riandet et al,
Rem. Sensing,
2023

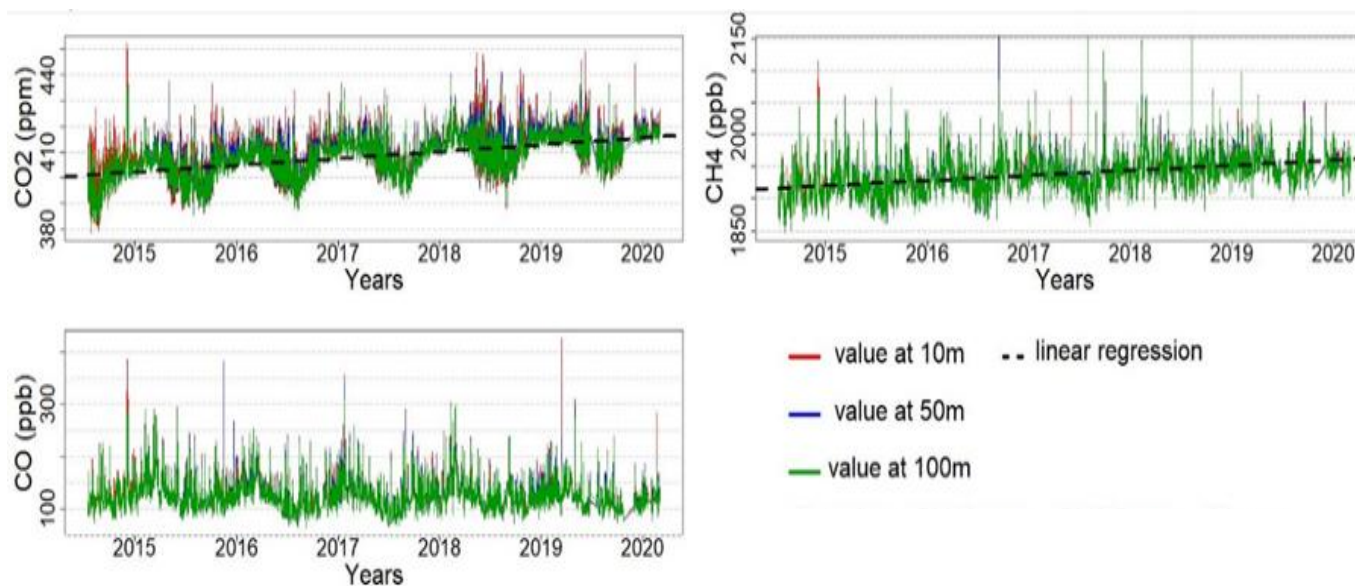
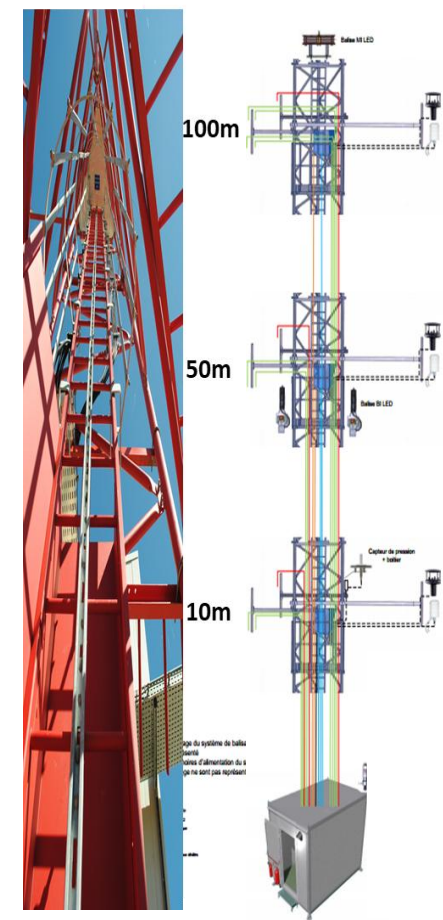


Thèse de
Ludovic
Lelandais
(IMBE
REGION
ATMOSUD)

RÉSULTATS POUR VÉRIFIER L'INVENTAIRE : D'ABORD ANALYSER ET COMPRENDRE LA VARIABILITÉ DU CO₂



➤ Le CO₂ ayant une durée de vie d'environ 100 ans, on étudie d'abord le site de référence régional, sans impacts de la métropole AMP : **Observatoire de Haute Provence (SNO ICOS-France)**



Lelandais et al, *Atm. Env.* 2022

L'évolution régionale (sans les impacts de l'AMP) des gaz à effet de serre à l'OHP est similaire à celle de MAUNA LOA (HAWAII) : +2,7 ppm/an pour le CO₂

20% des points proviennent d'émissions locales. Le reste est représentatif de l'atmosphère bien mélangée et permet de suivre l'évolution régionale du CO₂ (et du CH₄ & du CO) sur le long-terme.

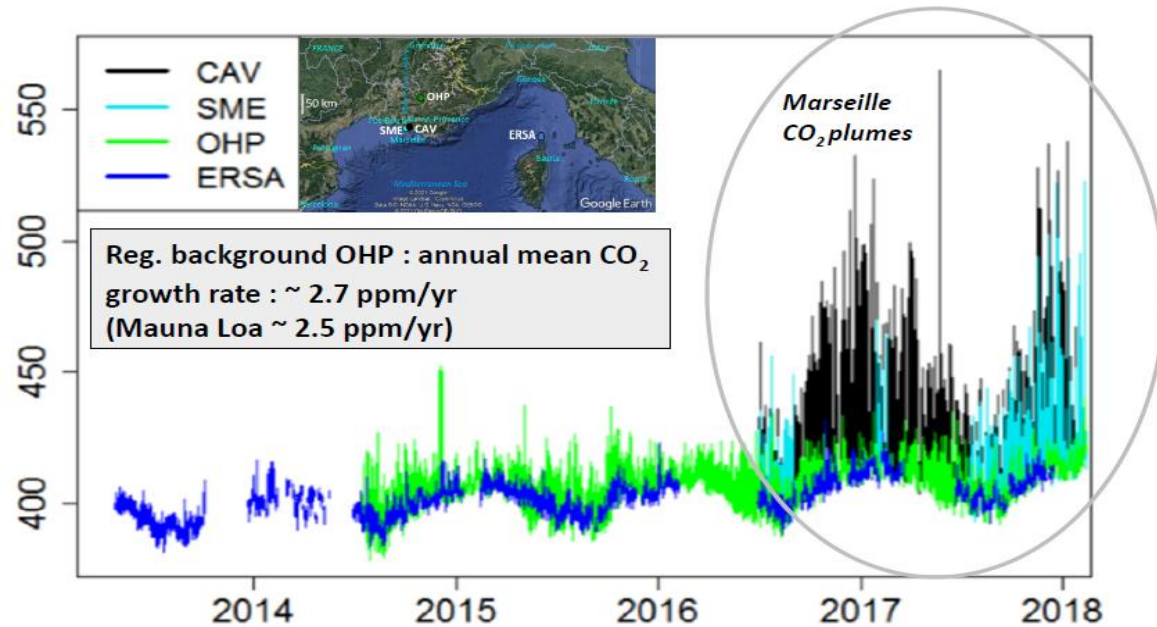
RÉSULTATS POUR VÉRIFIER L'INVENTAIRE : D'ABORD ANALYSER ET COMPRENDRE LA VARIABILITÉ DU CO₂



➤ On compare ensuite avec le site de Marseille-Longchamp (CAV) pour en déduire l'impact des émissions urbaines locales sur le CO₂ atmosphérique :

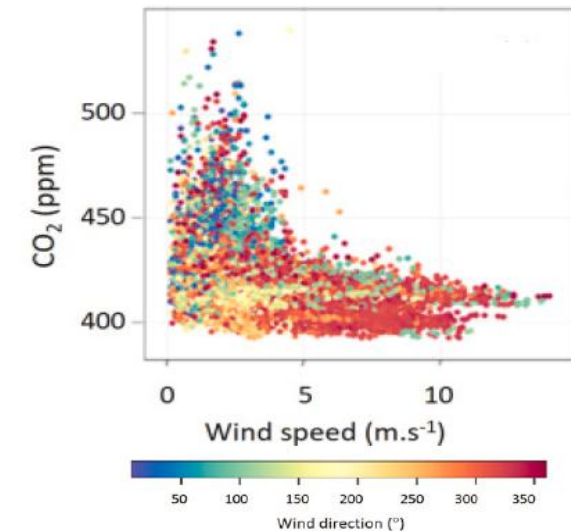


Site CAV = MRS-LCP



Xueref-Remy et al, *Atm. Env. X*, 2023

Les concentrations les plus élevées à Marseille ont lieu pour des vents inférieurs à 3 m.s⁻¹.



Les émissions locales, l'activité de la végétation et des sols, le vent et le mélange dans la couche limite atmosphérique contrôlent la concentration du CO₂ atmosphérique. Les brises de mer et de terre contribuent notamment à la variabilité du CO₂ atmosphérique sur Marseille.



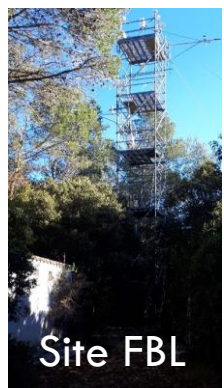
Thèse de
Ludovic
Lelandais
(IMBE
REGION
ATMOSUD)

RÉSULTATS POUR VÉRIFIER L'INVENTAIRE : IDENTIFIER LES SOURCES DE CO₂ À MARSEILLE GRÂCE AUX ISOTOPES

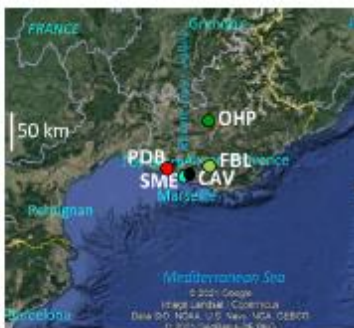


Marseille (CAV) :
site urbain

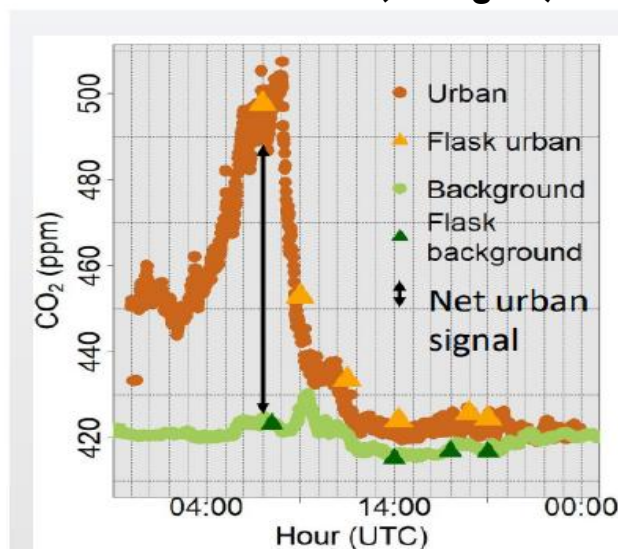
Fontblanche (FBL) :
site local de fond



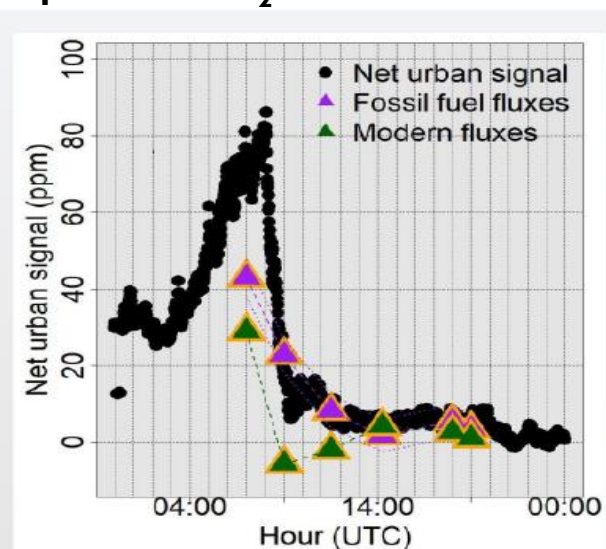
Site FBL



Prélèvements d'air (triangles) :



Répartition CO₂ fossile vs moderne :



Lelandais, thèse 2023
Lelandais et al, in prep

En comparaison, à Paris :
77% de sources fossiles
23% de sources modernes
(Lopez et al, 2013)

Répartition des sources de CO₂ à Marseille l'hiver (janvier 2020) :

53% de sources fossiles

dont 28% trafic et 23% résidentiel et tertiaire (chauffage incluant celui de l'eau sanitaire et cuisson au gaz naturel).

47% de sources modernes

dont 10% respiration humaine (1,5kg CO₂/jour/personne) et 10% respiration biosphérique (site FBL)

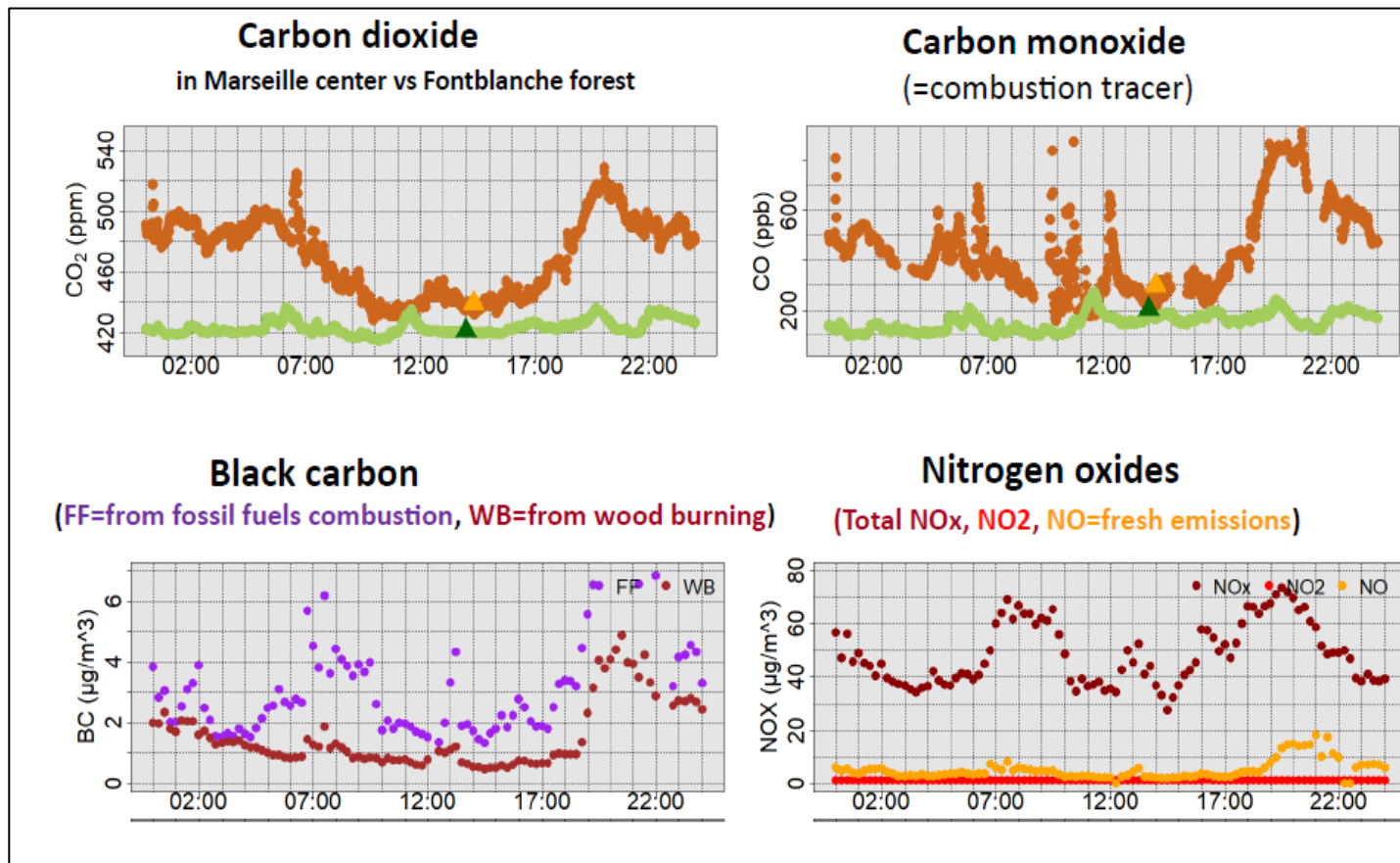
? Il manque encore 27% de sources modernes ?

Incertitudes ~30%



Thèse de
Ludovic
Lelandais
(IMBE
REGION
ATMOSUD)

RÉSULTATS POUR VÉRIFIER L'INVENTAIRE : IDENTIFIER LES SOURCES DE CO₂ À MARSEILLE GRÂCE AUX ESPÈCES CO-ÉMISES



Marseille (CAV) : site urbain
Fontblanche (FBL) : site local de fond



A Marseille uniquement (CAV)

Les mesures de carbone suie (black carbon BC) révèlent une source notable de CO₂ provenant de la **combustion du bois** (alors qu'elle est très faible dans l'inventaire!).

Lelandais, L., thèse, 2023
Lelandais et al, in prep

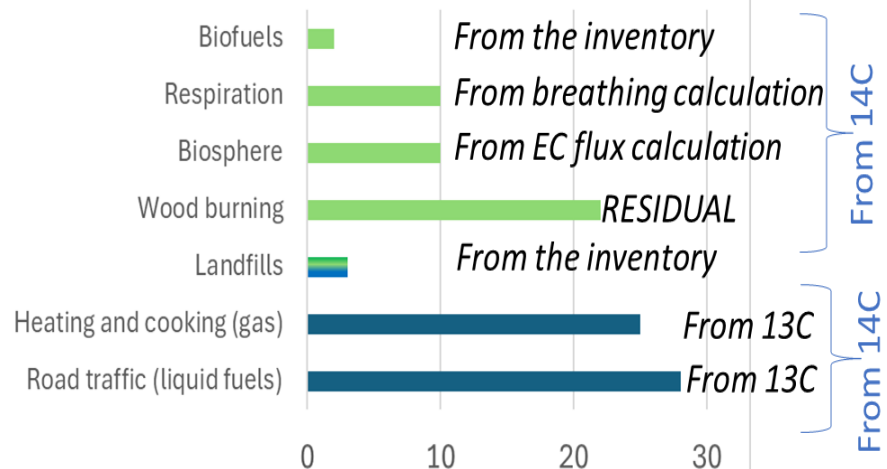


Thèse de
Ludovic
Lelandais
(IMBE
REGION
ATMOSUD)

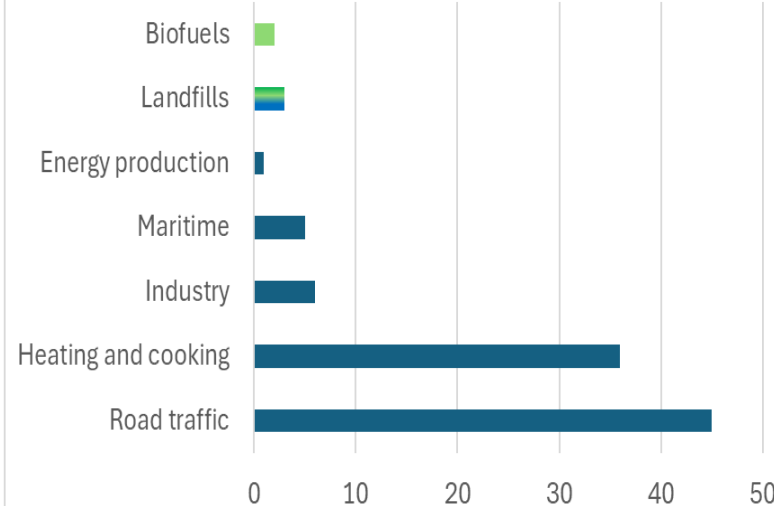
RÉSULTATS : CONFRONTATION ET AMÉLIORATION DE L'INVENTAIRE D'ATMOSUD (POUR AIDER LES ACTEURS ET DÉCIDEURS À MIEUX DÉFINIR LEURS ACTIONS ET TRAJECTOIRES DE RÉDUCTION D'ÉMISSIONS).



Notre approche atmosphérique



Inventaire ATMOSUD (2019)



- **La combustion du bois semble être une source de CO₂ assez importante (jusqu'à 20%) à Marseille, sous-estimée dans l'inventaire d'ATMOSUD 2019.**
- **L'inventaire des émissions de CO₂ d'ATMOSUD a été corrigé grâce à ces résultats et prend dorénavant en compte cette source.**

Contribution relative des différentes sources au total de CO₂ émis à Marseille (en %).
L'incertitude de notre approche atmosphérique est estimée à ~35%.

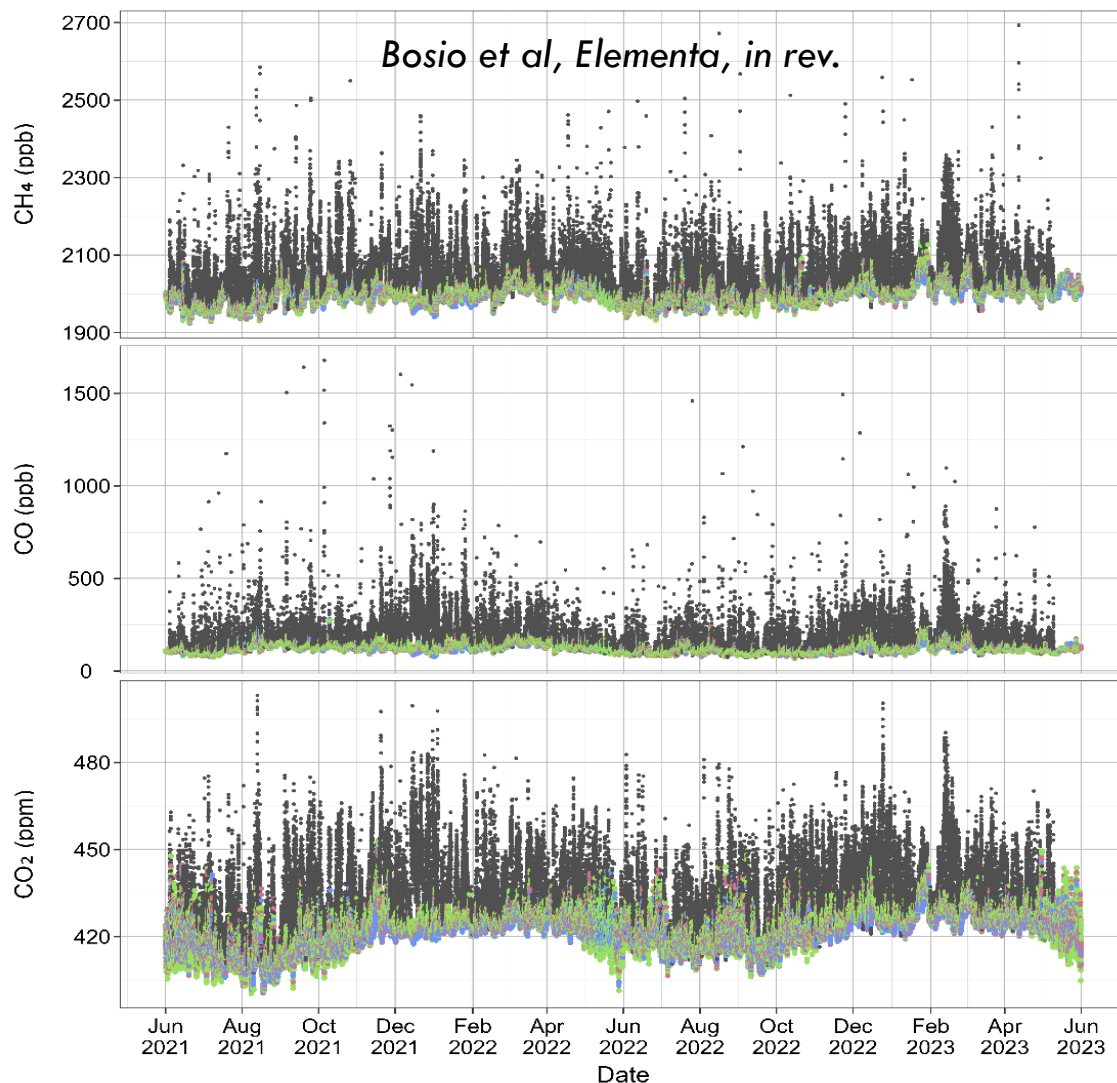
Lelandais, L., thèse, 2023
Lelandais et al, in prep



RÉSULTATS : ÉTUDE SIMILAIRE SUR FOS-BERRE



Thèse de
Pauline
Bosio
(IMBE
REGION
ATMOSUD)



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



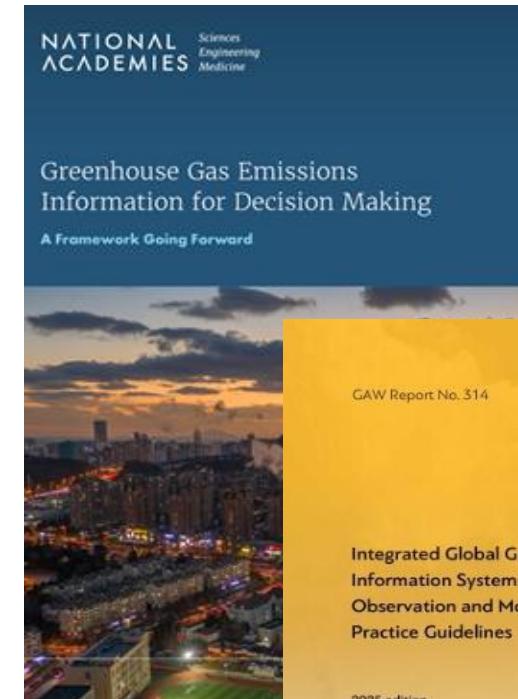
Vue sur le complexe industriel de LAVERA depuis la station de suivi des GES ANR COoL-AMmetropolis à Port-de-Bouc

En comparaison à l'inventaire d'ATMOSUD 2019 :

- Sous-estimation du CO ou surestimation du CO₂ probable dans l'inventaire
- Sous-estimation probable des émissions de CH₄ dans l'inventaire.

MESSAGES CLÉS ET PERSPECTIVES

- Nos travaux ont permis **d'améliorer l'inventaire des émissions CO₂ d'ATMOSUD** et la connaissance de **la dynamique atmosphérique à Marseille**.
- Ils ont été intégrés dans un rapport de **recommandations internationales à très haut niveau sur l'estimation des émissions de GES** ([NAS report 2022 pour la COP-22](#) présenté à la COP-22 et à la WMO en 2023).
- Ils sont intégrés au sein du **groupe international IG3IS de la WMO** dédié au suivi des GES atmosphériques en milieu urbain ([WMO-IG3IS report 2025](#) ; présentations 2025) et sont soutenus par l'infrastructure de recherche européenne **ICOS** (conférences 2022, 2024, 2026).
- Les mesures collectées depuis plus de 10 ans à Marseille et à l'OHP vont être exploitées pour tenter de mettre au point un indicateur de l'efficacité des actions mises en place à Marseille à partir du CO₂ atmosphérique, en comparant leur évolution à la trajectoire théorique du CO₂ atmosphérique vers la neutralité carbone en 2050 simulée par le modèle MESO-NH : **thèse Y. Ma IMBE 2026-2029, PEPR RESILIENCE**.



MERCI À TOUS LES CO-AUTEURS

Irène Xueref-Remy¹, Ludovic Lelandais¹, Aurélie Riandet¹, Pauline Bosio¹, Pierre-Eric Blanc², Alexandre Armengaud³, Sonia Oppo³, Michelle Leydet¹, Gregory Gille³, Sanne Palstra⁴, Bert Scheeren⁴, Huilin Chen⁴, Bert Kers⁴, Valérie Gros⁵, Stéphane Sauvage⁶, Thérèse Salameh⁶ et Marvin Dufresne⁶

1 – **Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Ecologie marine et continentale** : Aix Marseille Univ., Avignon Université, CNRS, IRD, **IMBE**, Marseille, France (irene.xueref-remy@imbe.fr)

2- **Observatoire de Haute Provence, UAR Pythéas**, CNRS, 04870 Saint-Michel-l'Observatoire, France (pierre-eric.blanc@osupytheas.fr)

3- **ATMOSUD**, 146 rue Paradis, 13006 Marseille, France (alexandre.armengaud@atmosud.org)

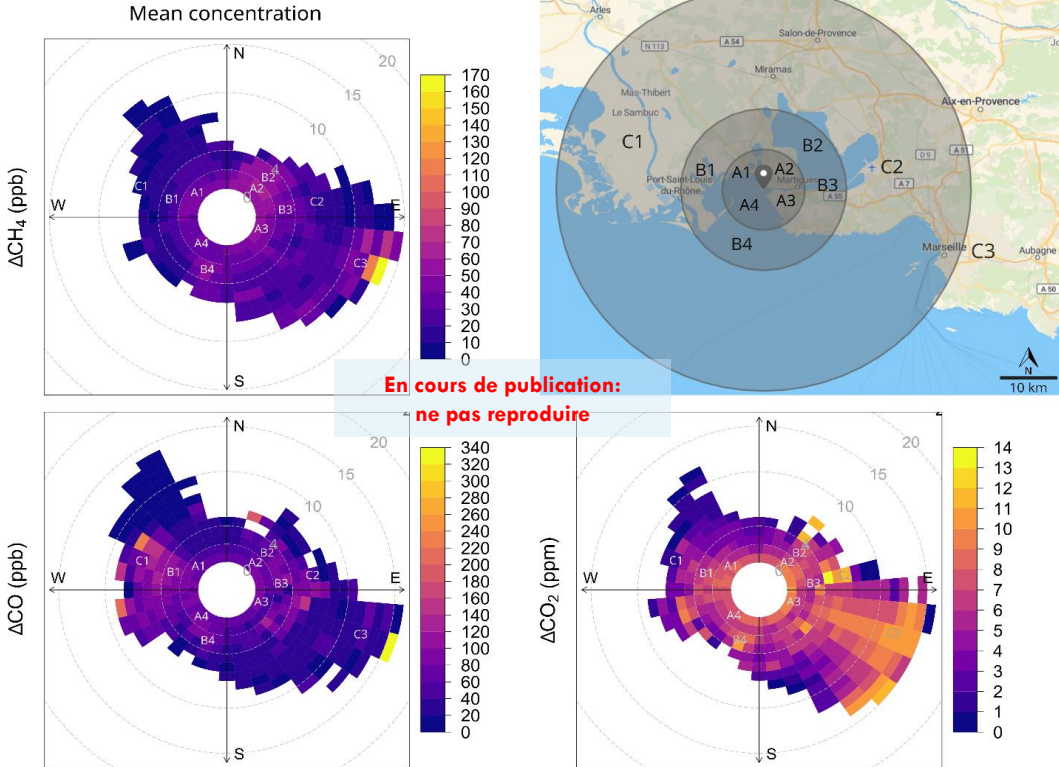
4- **Center for Isotope Research**, University of Groningen, 9747 AG Groningen, The Netherlands (cio@rug.nl)

5- **Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement**, Gif-sur-Yvette, France (valerie.gros@lscce.ipsl.fr)

6- **IMT Nord Europe**, Douai, France (therese.salameh@imt-nord-europe.fr)

Merci pour votre attention.





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	$\Delta CH_4/\Delta CO$	$\frac{\Delta CH_4/\Delta CO_2}{(1/1000)}$	$\frac{\Delta CO/\Delta CO_2}{(1/1000)}$
B1: Observé	0.31 ± 0.01	2.98 ± 0.08	9.55 ± 0.12
Inventaire	0.11	0.60	5.63
B2: Observé	0.56 ± 0.01	5.19 ± 0.05	8.28 ± 0.09
Inventaire	0.56	1.83	3.28
B3: Observé	0.77 ± 0.03	5.16 ± 0.23	8.10 ± 0.11
Inventaire	0.17	0.17	0.98
B4: Observé	0.37 ± 0.01	4.08 ± 0.03	13.10 ± 0.37
Inventaire	0.29	2.53	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 CO_2 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 CH_4 dans l'inventaire**.

Apport de nos super-sites de surveillance des GES

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 NO_x 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.**

