

Année universitaire 2024-2025

Sujet de stage de M2 ou de fin d'études à pourvoir

Avec poursuite en thèse de doctorat possible (financement de -la thèse acquis).

Titre : Suivi du CO₂ atmosphérique à Marseille en vue d'aider à la prise de mesures de réduction des émissions de CO₂ sur ce territoire et en vue de suivre l'efficacité de ces mesures sur le long-terme, dans le but de soutenir la mise en place d'une ville durable et résiliente au changement climatique.

(MACARON : Marseille Actions for mitigating CO₂ emissions : Atmospheric Reduction inferred from Observations to help reaching Neutrality)

Responsable: Irène Xueref-Remy, Physicienne des Observatoires // Professeur des Universités

Lieu : Aix-Marseille Université / Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Ecologie marine et continentale, Aix-en-Provence

Démarrage du stage : 1er semestre 2025.

Financement : PEPR « RESILIENCE » (Agence Nationale de la Recherche).

Descriptif :

Le CO₂ constitue le principal gaz à effet de serre anthropique contribuant au réchauffement climatique observé depuis l'ère industrielle, principalement du fait de la combustion de charbon, de pétrole et de gaz (IPCC AR6 WGI, 2021). **Les villes émettent plus de 70% du CO₂ issu de la combustion de ces énergies fossiles (Seto and Dakal, 2014).** Elles **représentent donc un lieu d'action prioritaire pour réduire ces émissions afin de répondre à l'urgence climatique.** Les estimations des émissions des villes reposent sur des inventaires d'émissions dont les incertitudes sont parfois très fortes, atteignant plusieurs dizaines de pourcents à l'échelle d'une ville (Andres et al, 2016; Fischer et al, 2017; Oda et al, 2019). Cela pose un double problème pour être certain que les mesures de réduction d'émissions de CO₂ urbaines qui sont prises par les décideurs politiques sont efficaces : en effet, **d'une part il faut s'assurer que les estimations d'émissions actuelles, sur lesquelles vont se baser les mesures de réduction futures, sont correctes ; et d'autre part il faut s'assurer que les mesures de réduction qui seront prises au cours des années à venir pour atteindre la neutralité carbone avant 2050 (étape nécessaire pour atteindre les objectifs de l'Accord de Paris) permettront de respecter la trajectoire planifiée.** Il existe une solution à ce double problème : **les estimations d'émissions délivrées par les inventaires peuvent être vérifiées/améliorées par des méthodes atmosphériques indépendantes** dont l'efficacité a déjà été prouvées dans plusieurs villes du monde (ex. Xueref-Remy et al, 2023 ; Xueref-Remy et al, 2018 ; Ammoura et al, 2016 ; Turnbull et al, 2015 ; Lopez et al, 2013). **Ces méthodes reposent sur l'analyse de mesures atmosphériques passées et actuelles à haute résolution, in-situ et télédélectées.**

La ville de Marseille souhaite fortement réduire ses émissions de gaz à effet de serre, majoritairement de CO₂, pour s'approcher de la neutralité carbone dès 2030. Elle est lauréate du projet européen « 100 villes neutres en Carbone en 2030 ». Afin de vérifier l'efficacité des mesures de réduction qu'elle va prendre pour atteindre cet objectif, ce projet de recherche propose de mettre au point une méthode reposant sur les mesures continues du CO₂ atmosphérique et d'autres espèces co-émises lors des processus de combustion, effectuées depuis 2014 à Marseille et aux alentours pour : **1/ vérifier-améliorer l'inventaire d'émissions de CO₂ de Marseille actuel** fourni par l'Agence Régionale de Surveillance de la Qualité de l'Air ATMOSUD, **et 2/ utiliser les moyens locaux de surveillance atmosphérique disponibles au sein de la communauté scientifique et d'ATMOSUD pour permettre d'estimer au fil du temps si les mesures de réduction**

d'émissions prises par les décideurs politiques de Marseille conduisent à une réduction efficace du CO₂ et si la trajectoire en cours permettra d'atteindre l'objectif fixé ; ou bien si ces mesures devront être revues à la hausse.

Ce sujet de stage vise à démarrer les premières analyses d'un projet doctoral destiné à mettre au point une méthode atmosphérique qui permettra de favoriser la mise en place et le suivi efficace des politiques de réduction d'émissions de CO₂ sur Marseille à partir d'un Observatoire atmosphérique dédié. Il s'agit de caractériser comment les émissions anthropiques (trafic, chauffage...), les flux de CO₂ (végétation principalement) et les conditions atmosphériques modulent chacun la concentration de CO₂ atmosphérique et des espèces co-émises au CO₂ à Marseille, afin ensuite d'être capable, à partir de l'évolution de ces concentrations et de tests sur les périodes de confinements COVID, de **définir un ou plusieurs indicateurs fiables permettant d'améliorer l'inventaire d'émissions d'ATMOSUD et de suivre l'évolution future des émissions de CO₂ à Marseille et des sources associées.**

Ce projet repose sur des mesures continues locales et régionales de la concentration du CO₂ atmosphérique et d'espèces co-émises lors des processus de combustion (monoxyde de carbone, oxydes d'azote, carbone suie, isotopes du carbone, composés organiques volatils...), sur des mesures de la dynamique atmosphérique par télédétection LIDAR, sur des mesures météorologiques et sur des étalons de calibration ultra-précis reliés à l'échelle de l'Organisation Mondiale de la Météorologie (WMO). **Ces moyens d'observation continus sont en fonctionnement** sur le site ATMOSUD de Marseille Longchamp (MAR) depuis 2016, sur le site de l'Observatoire de Haute Provence (OHP) appartenant au réseau ICOS-France depuis 2014, et sur le site d'observation ICOS-France de Fontblanche (20 km à l'Est de Marseille) depuis 2012.

Ce type d'approche a été développé depuis 2009 sur Paris (projet ANR CO₂-MEGAPARIS piloté par la responsable du stage et du projet doctoral associé : ex. Xueref-Remy et al, 2018 ; Ammoura et al, 2016 ; Ammoura et al, 2014 ; Lopez et al, 2013 ; Pal et al, 2012), Los Angeles (projet NASA MEGACITIES : ex. Verlhust et al, 2017) et Indianapolis (projet NIST INFLUX : ex. Turnbull et al, 2015 ; Cambaliza et al, 2014), et depuis 2016 sur Marseille également par la responsable du stage et du projet doctoral associé, en collaboration avec ATMOSUD (projet OT-MED AMC ; projet ANR COoL-AMmetropolis ; projet Région CO₂-SUD.AMm ; projet Région MAGES ; projet ECCOREV CLIMQUAL : ex. Xueref-Remy et al, 2023 ; Riandet et al, 2022 ; Lelandais et al, 2022). Ce savoir et ce savoir-faire seront transmis au/à la candidat(e), dont la formation lui permettra de vite acquérir les outils et méthodes proposées.

Le/la stagiaire sera chargé(e) d'avancer sur l'un ou plusieurs des points suivants, selon son profil :

1/ Les concentrations de CO₂ et autres espèces observées seront **analysées sur différentes échelles temporelles** : horaire, diurne, synoptique, mensuelle, saisonnière et inter-annuelle, pour caractériser leur variabilité à ces échelles et identifier les relations entre les pics de concentrations et d'activités (ex. trafic, chauffage). **Les rapports entre le CO₂ et les espèces co-émises étant différents selon les secteurs d'activités, ces rapports seront calculés à ces différentes échelles temporelles et comparés à l'inventaire d'ATMOSUD pour vérifier et améliorer si besoin ce dernier.**

2/ Les émissions urbaines de CO₂ et des espèces co-émises se diluent dans l'atmosphère au gré de leur intensité et elles modulent ainsi les concentrations atmosphériques de ces espèces. Mais les concentrations sont modulées aussi par les conditions atmosphériques (vent, convection...). Les concentrations observées seront donc classées par type de situation atmosphérique à l'aide des données météorologiques et de hauteurs de la couche limite atmosphérique (hCLA = la couche de l'atmosphère dans laquelle les émissions se mélangent). **Les concentrations observées ainsi classées seront comparables pour des conditions atmosphériques similaires : elles seront comparées sur des périodes de conditions similaires d'une même année, et d'une année à l'autre** (ex. Petit et al, 2021).

3/ La méthode sera testée pendant et en dehors des périodes de confinement liées à la pandémie de COVID-19 pour évaluer comment la concentration du CO₂ et des espèces co-émises, ainsi que les rapports du CO₂ à ces espèces, ont évolué pour identifier des réductions et/ou modification des sources d'émissions de CO₂ sur Marseille. Une étude préliminaire semble en effet montrer que **les émissions de CO₂ du trafic ont diminué mais que les émissions de chauffage au bois ont augmenté au printemps 2020 au cœur de Marseille** (Xueref-Remy et al, 2020).

Les analyses seront réalisées avec le logiciel R et des modèles de transport/dispersion atmosphériques de type HYSPLIT (<https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>). Le/la stagiaire pourra évaluer l'apport des mesures spatiales émergentes de CO₂ sur Marseille, en collaboration éventuelle avec le laboratoire JPL de la NASA à Los Angeles.

Références :

- Ammoura, L., Xueref-Remy, I., Gros, V., Baudic, A., Bonsang, B., Petit, J.-E., Perrussel, O., Bonnaire, N., Sciare, J. and F. Chevallier (2014), *Atmospheric measurements of ratios between CO₂ and co-emitted species from traffic: a tunnel study in the Paris megacity*, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 12871-12882, <https://doi.org/doi:10.5194/acp-14-12871-2014>
- Ammoura, L., Xueref-Remy, I., Vogel, F., Gros, V., Baudic, A., Bonsang, B., Delmotte, M., Té, Y., and Chevallier, F. (2016) *Exploiting stagnant conditions to derive robust emission ratio estimates for CO₂, CO and volatile organic compounds in Paris*, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 15653–15664, <https://doi.org/10.5194/acp-16-15653-2016>, 2016
- Andres, R. J., Boden, T. A., & Higdon, D. M. (2016) *Gridded uncertainty in fossil fuel carbon dioxide emission maps, a CDIAC example*, *Atmos. Chem. Phys.*, 16(23), 14979-14995. <https://doi.org/10.5194/acp-16-14979-2016>
- Cambaliza, M.O., P.B. Shepson, D. Caulton, B. Stirm, D. Samarov, K. Gurney, J. Turnbull, K.J. Davis, A. Possolo, A. Karion, C. Sweeney, B. Moser, A. Hendricks, T. Lauvaux, K. Mays, J. Whetstone, J. Huang, I. Razlivanov, N. Miles, and S.J. Richardson (2014) *Assessment of uncertainties of an aircraft-based mass-balance approach for quantifying urban greenhouse gas emissions*, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 9029-9050, <https://doi.org/10.5194/acp-14-9029-2014>
- Fischer, M. L., Parazoo, N., Brophy, K., Cui, X. G., Jeong, S., Liu, J. J., Keeling, R., Taylor, T. E., Gurney, K., Oda, T., & Graven, H. (2017) *Simulating estimation of California fossil fuel and biosphere carbon dioxide exchanges combining in situ tower and satellite column observations*, *J. Geophys. Res.-Atmospheres*, 122(6), 3653-3671, <https://doi.org/10.1002/2016jd025617>
- IPCC AR6 WGI Summary for Policymakers (2021) : https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf
- Lac, C., R.P. Donnelly, V. Masson, S. Pal, S. Riette, S. Donier, S. Queguiner, G. Tanguy, L. Ammoura and I. Xueref-Remy (2013), *CO₂ dispersion modelling over Paris region within the CO₂-MEGAPARIS project*, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 4941-4961, <https://doi.org/10.5194/acp-13-4941-2013>
- Lelandais, L., I. Xueref-Remy, A. Riandet, P.E. Blanc, A. Armengaud, S. Oppo, C. Yohia, M. Ramonet, M. Delmotte (2022), *Analysis of 5.5 years of atmospheric CO₂, CH₄, CO continuous observations (2014–2020) and their correlations, at the Observatoire de Haute Provence, a station of the ICOS-France national greenhouse gases observation network*, *Atmos. Env.*, 119020, ISSN 1352-2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119020>.
- Lelandais, L., Xueref-Remy, I., Riandet, A., Dufresne, M., Sauvage, S., Pastra, S., Scherren, B., and Armengaud, A. (2022), *Characteristics of the urban CO₂ plume from Marseille city in the southern France : variability and sources identification using co-emitted species and isotopic ratios*, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-7855, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-7855>
- Lopez, M., Schmidt, M., Delmotte, M., Colomb, A., Gros, V., Janssen, C., Lehman, S. J., Mondelain, D., Perrussel, O., Ramonet, M., Xueref-Remy, I. and P. Bousquet (2013), *CO, NO_x and 13CO₂ as tracers for fossil fuel CO₂ : results from a pilot study in Paris during winter 2010*, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 7343–7358, <https://doi.org/10.5194/acp-13-7343-2013>
- Nathan, B.; Xueref-Remy, I.; Lauvaux, T.; Yohia, C.; Piga, D.; Piazzola, J.; Oda, T.; Milne, M.; Herrmann, M.; Wimart-Rousseau, C.; et al. A Modeling Framework of Atmospheric CO₂ in the Mediterranean Marseille Coastal City Area, France. *Atmosphere* 2024, 15, 1193. <https://doi.org/10.3390/atmos15101193>
- Oda, T., Bun, R., Kinakh, V., Topylko, P., Halushchak, M., Marland, G., Lauvaux, T., Jonas, M., Maksyutov, S., Nahorski, Z., Lesiv, M., Danylo, O., & Horabik-Pyzel, J. (2019) *Errors and uncertainties in a gridded carbon dioxide emissions inventory*, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 24(6), 1007-1050. <https://doi.org/10.1007/s11027-019-09877-2>
- Pal, S., Xueref-Remy, I., L. Ammoura, P. Chazette, F. Gibert, et al. (2012) *Spatio-temporal variability of the atmospheric boundary layer depth over the Paris agglomeration: An assessment of the impact of the urban heat island intensity*, *Atmosph. Env.*, Elsevier, 63, 261-275, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.09.046>

- Petit, J.E., Dupont, J.-C., Favez, O., Gros, V., Zhang, Y., Sciare, J., Simon, L., Truong, F., Bonnaire, N., Amodeo, T., Vautard, R. and Haeffelin, M. (2021) *Response of atmospheric composition to COVID-19 lockdown measures during spring in the Paris region (France)*, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 17167–17183, <https://doi.org/10.5194/acp-21-17167-2021>
- Seto, K. C., Dhakal, S., Bigio, A., Blanco, H., Delgado, G. C., Dewar, D., Huang, L., Inaba, A., Kansal, A., Lwasa, S., McMahon, J., Müller, D. B., Murakami, J., Nagendra, H., and Ramaswami, A. (2014) *Human settlements, infrastructure and spatial planning*, chap. 12, in: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. IPCC Working Group III Contribution to AR5. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2014, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_chapter12.pdf
- Xueref-Remy, I., E. Dieudonné, C. Vuillemin, M. Lopez, C. Lac, M. Schmidt, M. Delmotte, F. Chevallier, F. Ravetta, P. Ciais, F.-M. Bréon, G. Broquet, O. Perrussel, M. Ramonet, T. G. Spain and C. Ampe (2018), *Diurnal, synoptic and seasonal variability of atmospheric CO₂ in the Paris megacity area*, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 3335-3362, <https://doi.org/10.5194/acp-18-3335-2018>
- Turnbull, J. C., Sweeney, C., Karion, A., Newberger, T., Lehman, S. J., Tans, P. P., Davis, K. J., Lauvaux, T., Miles, N. L., Richardson, S. J., Cambaliza, M. O., Shepson, P. B., Gurney, K., Patarasuk, R., and Razlivanov, I. (2015) *Toward quantification and source sector identification of fossil fuel CO₂ emissions from an urban area : Results from the INFLUX experiment*, *J. Geophys. Res. : Atmospheres*, 120, 2014JD022 555, <https://doi.org/10.1002/2014JD022555>
- Verhulst, K. R., Karion, A., Kim, J., Salameh, P. K., Keeling, R. F., Newman, S., Miller, J., Sloop, C., Pongetti, T., Rao, P., Wong, C., Hopkins, F. M., Yadav, V., Weiss, R. F., Duren, R. M., and Miller, C. E. (2017) *Carbon dioxide and methane measurements from the Los Angeles Megacity Carbon Project – Part 1: calibration, urban enhancements, and uncertainty estimates*, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 8313–8341, <https://doi.org/10.5194/acp-17-8313-2017>
- Xueref-Remy, I., Armengaud, A., Lelandais, L., Riandet, A., Manqari, Y. Lacey, M., Simioni, G., Marlois, O., Blanc, P.E. (2020) *Assessing the impact of the Spring 2020 COVID-19 lockdown on atmospheric CO₂ concentration in the Aix-Marseille area, France*, ICOS science conference, Virtual, September 15-17th, 2020, <https://www.icos-cp.eu/sc2020/abstracts#47> .
- Xueref-Remy, I., B. Nathan, M. Milne, L. Lelandais, A. Riandet, T. Lauvaux, H. Chen, S. Palstra, B. Scheeren, A. Armengaud, P.-E. Blanc, J. Turnbull, M.-L. Lambert, F. Hernandez, V. Masson, C. Yohia and A. Nicault (2021) *Towards improving current estimates of CO₂ emissions and sinks in the Aix-Marseille metropolis area, France, and developing virtuous CO₂ mitigation scenarios in link with local stakeholders and socio-economic actors*, EGU 2021, European Geosciences Union General Assembly, Apr 2021, Online, Austria. 2p, (10.5194/egusphere-egu21-12629) (<https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU21/EGU21-12629.html>)
- Xueref-Remy, I., Milne, M., Zoghbi, N., Lelandais, L., Riandet, A., Armengaud, A., Blanc, P.E., Gille, G., Brégonzio-Rozier, L., and Delmotte, M. (2023) *Atmospheric CO₂ variability in the Marseille-Provence area and north-west Mediterranean basin at different time scales*, *Atm. Env. X*, 1710028, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2023.100208>