



Proposition de sujet de thèse de doctorat 2025-2028

Financement acquis

Acronyme : « MACARON » (*M*arseille *A*ctions for *m*itigating *C*O₂ *e*missions : *A*tmospheric *R*eduction *i*nferred from *O*bservations to help reaching *N*eutrality)

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.

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

Type de bourse doctorale : PEPR RESILIENCE (ANR), acquise.

Directrice de thèse : Irène Xueref-Remy, Physicienne des Observatoires // Professeur des Universités

Démarrage : Novembre 2025 (possible un peu plus tard).

Mode de candidature : Envoyer CV et lettre de motivation à irene.xueref-remy@imbe.fr

Descriptif :

Contexte

Comme le montrent les longues séries de mesures atmosphériques du dioxyde de carbone (CO₂) démarrées en 1958 à Mauna Loa, Hawaii, la concentration du CO₂ augmente inexorablement dans l'atmosphère depuis plusieurs décennies. 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.**

Objectifs

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 doctoral 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.**

Cette thèse vise ainsi 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. Le/la doctorant(e) aura pour mission 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 travail sera développé à partir des données d'émissions et de concentrations passées et actuelles du CO₂ dans la région Sud-PACA. Le ou la doctorant(e) sera intégré à l'équipe pluridisciplinaire du projet PEPR RESILIENCE et sera amené à collaborer avec des urbanistes, sociologues et juristes de l'environnement, spécialistes des questions relatives au Plan Climat Régional, au Plan Local d'Urbanisme, ou encore aux questions d'inégalités sociales qui doivent être traitées avec attention pour réussir la mise en place d'une ville durable et assurant le bien-être de tous ses habitants.

Méthodologie

Ce type d'approche a été développé depuis 2009 sur Paris (projet ANR CO₂-MEGAPARIS piloté par la directrice de thèse : 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 par la directrice de thèse, 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 doctorant(e), dont la formation lui permettra de vite acquérir les outils et méthodes proposées.

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 ; le CO₂ ayant un temps de vie de l'ordre de 100-200 ans dans l'atmosphère, il est en effet nécessaire de disposer de sites « de suivi de la concentration de CO₂ de fond local et régional » comme Fontblanche et l'OHP qui ne sont pas exposés au panache atmosphérique issu des émissions de CO₂ de Marseille, afin de soustraire ces mesures de fond de celles du site urbain MRS pour en déduire le panache de CO₂ urbain uniquement (Figure 1). Chaque site est équipé de capteurs météorologiques précis pour caractériser l'origine des masses d'air.

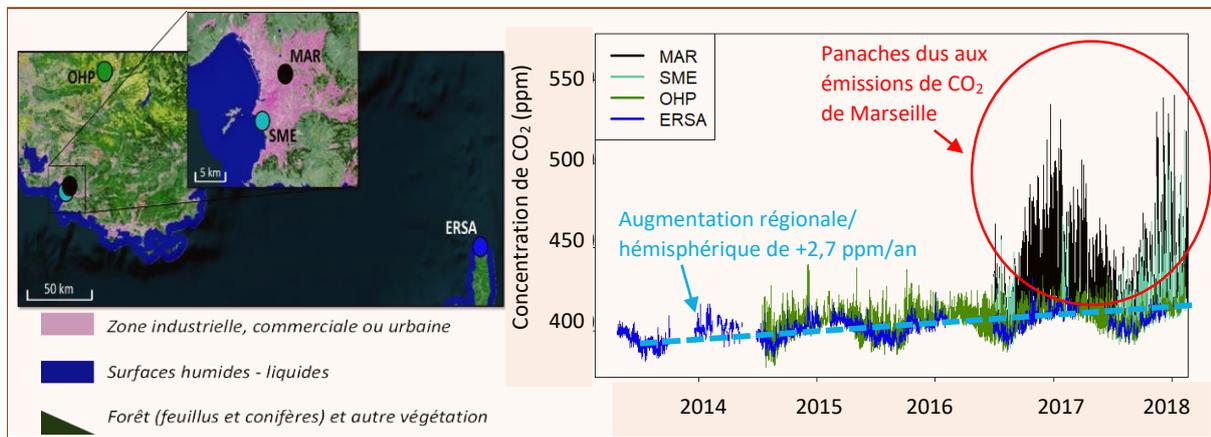


Figure 1. Concentration de CO₂ atmosphérique en ppm¹ mesurées sur les sites de Marseille Longchamp (MAR), de la Station Marine d'Endoume (SME), de l'OHP et du Cap Corse ERSA (source : Xueref-Remy et al, 2022).

Les jeux de données collectés localement ont permis jusqu'ici : 1/ de caractériser la **variabilité du CO₂ à l'OHP, montrant une augmentation régionale du CO₂ sur ce site de fond régional, similaire à celle de l'hémisphère Nord (~2,7 ppm¹/an**, cf Fig.1 : projet doctoral CO₂-SUD.AMm 2019-2022, Lelandais et al, 2022a) ; 2/ de **quantifier le panache de concentration de CO₂ dus aux émissions de Marseille** qui se rajoute à ce signal de fond et montre un maximum l'hiver notamment du fait des émissions de CO₂ provenant du chauffage urbain, plus fort à cette saison (cf Fig.1, projet OT-MED AMC 2016-2019, Xueref-Remy et al, 2022 ; Xueref-Remy et al, 2023) ; et 3/**de quantifier que les émissions de CO₂ fossiles à Marseille contribuent pour 50% à 90% aux pics de CO₂ observés pendant les pic de trafic routier en hiver**, par des analyses de radiocarbone dans le CO₂ (projet ANR COoL-AMmetropolis 2019-2024 ; Lelandais et al, 2022b ; Xueref-Remy et al, 2021), l'autre partie de ces pics (10 à 50%) étant issu de sources non fossiles (i.e. chauffage au bois, respirations humaine et végétale). **Ces données ont montré une sous-estimation des émissions de CO₂ provenant du chauffage au bois dans l'inventaire d'ATMOSUD.** Ces résultats illustrent le fort potentiel de nos méthodes atmosphériques pour améliorer la connaissance des émissions passées et actuelles de CO₂ à Marseille et pour **développer des indicateurs de suivi de l'efficacité des mesures de réduction d'émissions à venir.**

En sus de ces moyens d'observations, le projet s'appuiera sur l'inventaire d'émissions d'ATMOSUD, sur des indicateurs d'activités (ex. compteurs de trafic), et sur des outils de modélisation du transport atmosphérique pour analyser la représentativité spatiale des sites d'observation et identifier les zones géographiques et types d'émissions qui contribuent aux concentrations mesurées.

⇒ **Pour élaborer la méthode atmosphérique de vérification de l'inventaire et de suivi des émissions de CO₂ sur Marseille proposée dans ce projet doctoral, le/la doctorant(e) suivra la méthodologie suivante :**

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).

¹ Ppm = partie par million = 1 molécule pour 1 million de molécules d'air.

3/ Ce travail sera testé 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). On pourra également étudier le cas échéant les périodes où des mesures de réduction des émissions de CO₂ seraient prises durant ce projet sur Marseille, avec des campagnes additionnelles intensives d'isotopes du carbone.

4 / Des campagnes de terrain seront réalisées à Marseille pour estimer les secteurs d'émissions de CO₂ générant les panaches de CO₂ observés à l'échelle du quartier, en collaboration avec l'équipe pluri-disciplinaire du projet RESILIENCE qui vise à soutenir les décideurs politiques locaux dans la mise en place d'une ville durable et résiliente au changement climatique. Certaines questions comme la mise en place de la mobilité locale active et des inégalités sociales à l'échelle du quartier seront abordées de manière interdisciplinaire.

Cette méthode novatrice sera évaluée à l'aune de ses performances et de ses limitations, et pourra constituer à l'issu de ce projet un outil clé de soutien et d'accompagnement à la transition environnementale dans la ville méditerranéenne de Marseille.

Pour mener à bien ce projet, le doctorant utilisera le logiciel R et des modèles de transport/dispersion atmosphériques de type HYSPLIT (<https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>) et POLYPHEMUS (<http://cerea.enpc.fr/polyphemus/>). Il participera à la maintenance, au traitement et à l'analyse de mesures in-situ et télédéteectées, et à des campagnes de terrain. Enfin, le doctorant pourra évaluer l'apport des mesures spatiales émergentes de CO₂ sur Marseille, en collaboration avec le laboratoire JPL de la NASA à Los Angeles.

Profil recherché :

Le/la candidat(e) devra avoir suivi un Master 2 (ou un diplôme d'ingénieur équivalent) en Sciences atmosphériques ou environnementales notamment en Physique atmosphérique et si possible en télédétection, avec des compétences en informatique et un goût pour le traitement des données. Il/elle devra faire preuve d'appétence pour la transition environnementale notamment en milieu urbain, pour l'inter-disciplinarité, sur les questions d'inégalités sociales et pour les campagnes de terrain. Il/elle devra disposer d'un bon niveau d'anglais lui permettant de lire, d'écrire et de parler cette langue. Le/la candidat(e) sera intégré dans l'équipe PAHIS de l'IMBE et sera amené à collaborer de manière proche avec ATMOSUD et avec différents laboratoires.

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>