

# Effet du confinement du printemps 2020 sur la composition atmosphérique

## Les outils de la recherche et l'expertise de la communauté scientifique au service du suivi des effets de la gestion de crise

Auteurs : Y. Brunet (INRAE), F. Chevallier (LSCE), A. Colette (INERIS), C. Deniel (CNES), J-F. Doussin (CNRS), V. Dubreuil (Université Rennes 2), B. Hanoune (Université Lille), C. Lac (Meteo-France), B. Loubet (INRAE), D. Loustau (INRAE), G. Uzu (IRD), E. Villenave (CPU)

Paris le 22 Octobre 2020

### Table des matières

Effet du confinement du printemps 2020 sur la composition atmosphérique.....	1
Les outils de la recherche et l'expertise de la communauté scientifique au service du suivi des effets de la gestion de crise.....	1
Outils.....	2
Questions scientifiques.....	2
Mesures depuis le sol.....	3
Les données de l'IR ACTRIS (Aerosol, Clouds and Trace gases Research InfraStructure).....	6
Les données de l'IR ICOS.....	14
Télédétection satellitaire.....	17
Les données IASI (CNES-Eumetsat).....	18
Les données Sentinel 5P (ESA/EU Copernicus).....	21
Modélisation numérique .....	22
Conclusion .....	24
Contributeurs.....	25
Pour aller plus loin... Bibliographie.....	26

Le confinement de la population française, décrété le 17 mars 2020 en réponse à la pandémie de Covid-19, a eu un effet notable sur les interactions de l'homme avec son milieu. S'attendant notamment à une modification profonde des émissions anthropiques de polluants atmosphériques et gaz à effet de serre, la communauté française de recherche en physique et chimie de l'atmosphère a mobilisé son expertise et ses outils, dès le mois de mars, pour en documenter les effets.

Un panorama des initiatives est présenté ici. La majorité des travaux n'a pas encore été publiée dans la littérature scientifique, certaines données étant encore en cours de traitement. Ces premiers résultats sont donc cités à titre d'illustration de l'expertise ou des outils mis en œuvre et de la capacité de mobilisation de la communauté scientifique de recherche en sciences atmosphériques, en réponse à une problématique sociétale urgente.

## Outils

Pour étudier la qualité de l'air, à la fois dans une optique sanitaire et d'évaluation de son impact sur le changement climatique, la communauté scientifique en physico-chimie de l'atmosphère déploie une combinaison d'approches parmi lesquelles on compte, outre les expériences de laboratoire, les campagnes de terrains, l'observation de long terme, la télédétection satellitaire et la modélisation numérique ou/et d'assimilation des données de terrain. Ces trois dernières approches ont particulièrement été mises en œuvre pendant le confinement du printemps 2020, donnant accès à des informations d'une grande complémentarité en termes d'échelles spatiales et temporelles et ce, pour un vaste spectre d'espèces chimiques à l'état de trace dans l'atmosphère. Plusieurs de ces outils ont été mobilisés pour documenter la composition de l'atmosphère pendant le confinement et tenter de comprendre et quantifier dans quelles mesures les restrictions drastiques d'activités ont modifié les teneurs en polluants et gaz à effet de serre.

Les espèces ciblées concernent à la fois les gaz à effet serre (notamment CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>) et les polluants, réglementés (O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, benzène, HAP et éléments traces métalliques) ou non réglementés (particules ultrafines, carbone suie, autres composés organique volatils, etc.).

Principalement fédérés par les Infrastructures de recherche, **les outils d'observation de l'air ambiant** incluent des **stations de mesure in-situ**, des **moyens aéroportés** et de la **télédétection spatiale**. Pour comprendre les processus atmosphériques observés et en détailler les mécanismes, la communauté dispose aussi de **chambres de simulation atmosphérique** et de moyens expérimentaux analytiques multiples. À ces outils de recherche, s'ajoutent les mesures opérationnelles au sol des Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (**AASQA**). **Les modèles de simulation numériques** viennent en complément de ces observations. Il existe des approches de modélisation Chimie-Transport tridimensionnelles eulérienne ou lagrangienne (trajectoires), des modèles zéro dimension et des outils statistiques, y compris par apprentissage automatique. La modélisation peut avoir plusieurs visées : compréhension des processus, reconstruction de cartographies, prévision, modélisation, inversion de sources, évaluation des stratégies de gestion...

## Questions scientifiques

La communauté scientifique s'est mobilisée pour répondre aux questionnements de la société sur les contaminants de l'atmosphère (dont les virus), mais également pour répondre à des questions scientifiques se nourrissant du caractère exceptionnel de la situation de confinement.

Essentiellement, il s'agit d'améliorer la connaissance de la composition de l'atmosphère dans des conditions inhabituelles, en exploitant avec un regard nouveau les méthodes d'observations innovantes développées par les acteurs de la recherche. La forte perturbation du profil des émissions, caractérisée notamment par la diminution des trafics automobile et aérien, par la réduction d'un grand nombre de sources industrielles mais aussi par le maintien voire l'augmentation des émissions issues de sources domestiques, a permis d'envisager une étude plus sensible des effets et impacts de ces émissions. En ce qui concerne les modèles, elle constitue une période de choix pour évaluer leur capacité à reproduire l'écart entre les situations avant/pendant/après le confinement et ainsi valider leur potentiel prédictif et leur utilisation dans un contexte de gestion de crise, à condition d'avoir modifié certaines de leurs données d'entrée, comme les émissions.

La connaissance de la composition atmosphérique pendant cette période s'est révélée par ailleurs correspondre à plusieurs attentes sociétales émanant des autorités publiques, des évaluateurs de risques sanitaires et du grand public en général. On retrouve ici les questions (traitées dans une note précédente<sup>1</sup>) du rôle de la pollution atmosphérique comme co-facteur de risque de l'exposition au SARS-CoV-2, et des hypothèses sur le transport dans l'air ambiant du virus ou de sa transmission à l'homme par voie aérosol. Le confinement, mais aussi le déconfinement ont aussi fourni matière à réflexion sur la qualité de l'air dans le débat public, avec la mise en place de nouveaux modes de mobilités, face à la baisse de l'utilisation des transports en commun, etc.

## **Mesures depuis le sol**

### **Qualité de l'air en milieu urbain**

La qualité de l'air est suivie de manière opérationnelle par les AASQA. Cette mission réglementaire participe de manière très structurante au suivi de la composition atmosphérique. Elle est prioritairement orientée vers la surveillance de l'ensemble des polluants réglementés (dioxyde d'azote, dioxyde de soufre, ozone et PM<sub>10</sub>) et vise à une représentativité à l'échelle régionale voire à l'échelle d'une agglomération pour les régions peu denses. Ces mesures ont été exploitées par le réseau Atmo-France<sup>2</sup> pour comparer les niveaux de NOx dans les stations proches des axes routiers en mars 2019 et mars 2020. Cela a conduit à estimer que la mise en place du confinement avait entraîné une baisse des concentrations moyennes journalières en NOx en agglomération par exemple de 70% à Paris, 50% à Bordeaux, 70% à Toulouse, 67% à Fort-de-France, 69% à Dijon, 62% à Rennes et 69% à Marseille.

Par ailleurs, de nombreuses AASQA participent activement à différents projets de recherche en lien avec le milieu académique ainsi qu'à des programmes de surveillance de paramètres non réglementés de longue durée, tels que les dispositifs MERA (dans le cadre du programme EMEP<sup>3</sup>, réponse française à la convention sur la pollution transfrontière à longue distance) et CARA (pour une meilleure compréhension des sources de particules en zones urbaines)<sup>4</sup>, coordonnés par le Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA) et mis en œuvre en partenariat avec des laboratoires académiques.

Dans le cadre de l'amélioration des connaissances de l'impact sanitaire des particules, le dispositif national de surveillance de la qualité de l'air (incluant l'ensemble des AASQA et le LCSQA) travaille également depuis plusieurs années à la mise en œuvre d'observations de polluants dits

1 <https://www.allenvi.fr/allenvi/actualites/a-propos-du-lien-entre-la-pollution-atmospherique-et-la-propagation-du-sars-cov2>

2 <https://atmo-france.org/covid-19-focus-sur-lexposition-des-riverains-a-la-pollution-automobile-pres-des-grands-axes-avant-pendant-le-confinement/>

3 European Monitoring and Evaluation Programme. <https://www.lcsqa.org/fr/le-dispositif-mera>

4 <https://www.lcsqa.org/fr/le-dispositif-cara>

émergents, tels que les particules ultrafines et le carbone suie. Ces observations se sont avérées particulièrement utiles pour illustrer l'influence de la baisse du trafic automobile sur la qualité de l'air pendant la période de confinement. Airparif (AASQA pour l'Ile-de-France) a notamment pu mettre en évidence une réduction de l'ordre de 30% des concentrations de particules ultrafines à Paris par rapport aux semaines précédant le confinement.

En utilisant les mesures d'aethalomètre multi-longueurs (permettant de déterminer les concentrations de carbone suie mais aussi d'estimer la part des particules primaires carbonées provenant de la combustion d'hydrocarbures – notées  $PM_{ff}$  - majoritairement associée au trafic routier, d'un côté et celle provenant de la combustion de biomasse d'un autre côté -  $PM_{wb}$ ), Atmo Grand-Est a par exemple pu observer des niveaux de  $PM_{ff}$  moins importants que les années précédentes à la même époque sur la station de fond urbain de l'agglomération de Reims.

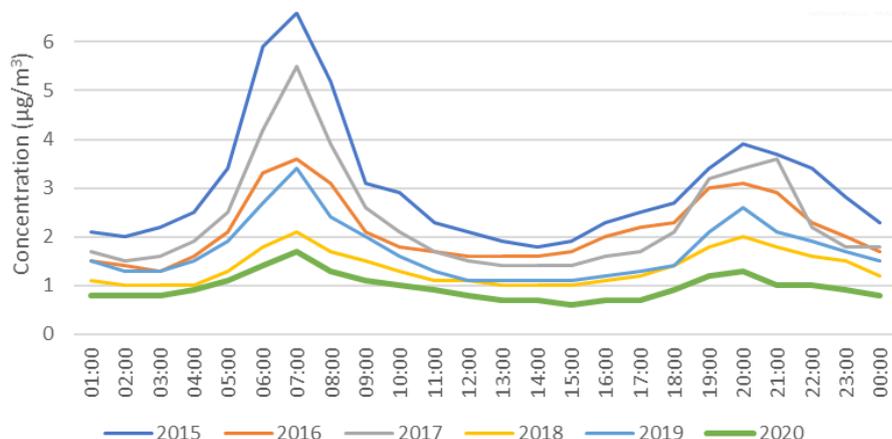


Figure 1 : Profils journaliers moyens de concentration en particules primaires carbonées associées à la combustion d'hydrocarbures ( $PM_{ff}$ ) au cours de la période comprise entre le 17 mars et le 10 mai pour les années 2015 à 2020, mesurés à la station urbaine de fond de Reims. Source : Atmo Grand-Est

En particulier, comme illustré par la Figure 1, on remarque que les pics associés temporellement aux trajets domicile/travail sont moins marqués et que les niveaux globaux sont plus faibles sur cette période de confinement en 2020, même lorsqu'on limite la comparaison aux années antérieures présentant les niveaux les plus faibles (2015 et 2018). En outre, la part de  $PM_{ff}$  au sein des  $PM_{10}$  sur la même période est sensiblement plus faible en 2020 (4%) que lors des années précédentes (7-11%). Ainsi, bien que l'impact du confinement soit nuancé sur les  $PM_{10}$  totales, la part des particules carbonées émises par le trafic routier montre une forte baisse pendant la période de confinement. Ces observations rejoignent notamment celles effectuées au SIRTA (voir ci-après).

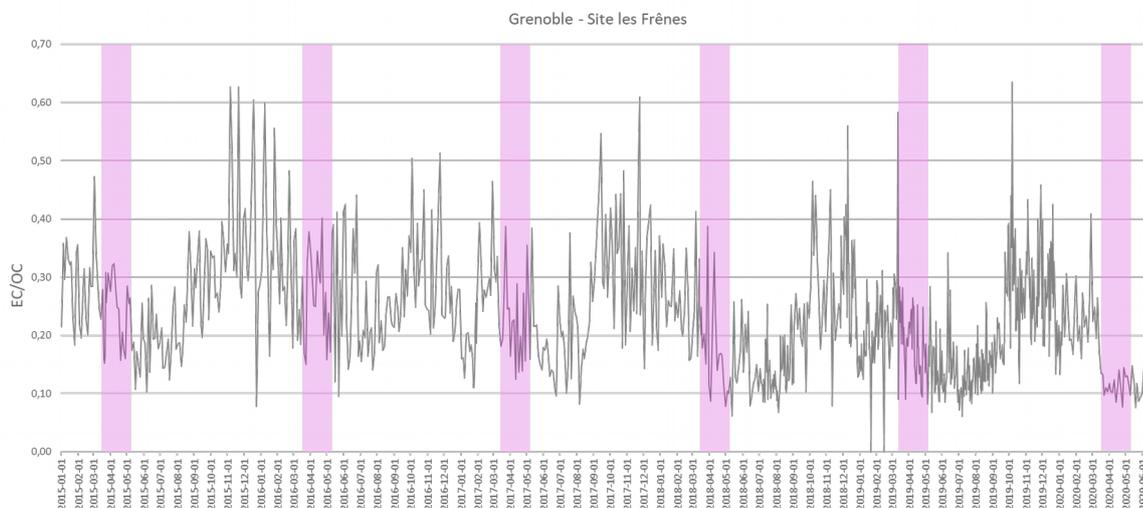


Figure 2 : Evolution du ratio EC/OC sur le site des Frênes à Grenoble mesuré de 2015 jusqu'au 30 août 2020 (prélèvements de 24h sur filtres analysés par méthode thermo-optique). Source : Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE) - Atmo Auvergne-Rhône-Alpes (AuRA)

Le suivi pluriannuel de la composition chimique des PM<sub>10</sub> à l'aide de mesures sur filtres à Grenoble (collaboration Atmo AuRA-IGE-LCSQA/INERIS) montre des tendances qui renforcent celles observées à Reims à travers l'étude des ratios (EC/OC) entre le carbone élémentaire et le carbone organique contenus dans les particules. Ces ratios varient selon les sources d'émissions. Ainsi, le ratio (EC/OC) est de l'ordre de  $0,05 \pm 0,02$  pour les émissions provenant de combustion du bois et de  $2,00 \pm 0,20$  pour les émissions issues du trafic routier. La Figure 2 montre que le ratio (EC/OC) de la station des Frênes-Grenoble chute brutalement pendant la période du confinement, pour atteindre seulement 0,11 soit la moitié du rapport moyen des cinq dernières années (pour les mêmes périodes), indiquant la faible importance de la source trafic pendant le confinement.

L'ensemble de ces mesures, ainsi que d'autres jeux de données récoltés par les AASQA dans le cadre du programme CARA, telles que des mesures automatiques par ACSM (*Aerosol Chemical Speciation Monitor*), sont en cours de traitement et permettront de documenter diverses questions de recherche sur l'évolution de la qualité de l'air sur cette période unique vis-à-vis de la diminution des sources d'émissions anthropiques (profils de sources spécifiques, impact sanitaire...). Elles viendront compléter ultérieurement les résultats présentés dans le cadre du présent rapport.

## **Les données de l'IR ACTRIS (Aerosol, Clouds and Trace gases Research InfraStructure)**

Les stations de mesures de la composition atmosphérique « de fond » mises en place par les opérateurs de la recherche scientifique viennent en amont du service fourni par les AASQA, en offrant une représentativité à des échelles plus larges, en intégrant des observations de dynamique atmosphérique permettant de comprendre les processus mis en œuvre, ou encore en offrant un spectre de mesures bien plus étendu que les stations opérationnelles. Les stations de mesure « de recherche » sont généralement fédérées au sein d'Infrastructures de recherche (IR) nationales, elles-mêmes fédérées à l'échelle européenne. Par la nature même du réacteur chimique atmosphérique, c'est en effet à cette échelle que s'expriment les phénomènes atmosphériques de grandes ampleurs.

ACTRIS est une IR inscrite sur la feuille de route nationale des Infrastructures de Recherche, déployée à l'échelle européenne au sein de l'IR ACTRIS-ERIC en construction. ACTRIS est construite en support aux recherches sur le climat et la composition atmosphérique, fournissant des informations à l'ensemble de la communauté scientifique pour la compréhension des évolutions passée, présente et future de la composition atmosphérique et des processus associés. ACTRIS est articulée autour de plateformes de recherche pour l'observation de l'air ambiant et l'expérimentation en atmosphères contrôlées (en laboratoire) permettant de :

- mieux contraindre les forçages climatiques des espèces atmosphériques à temps de vie courts, surveiller leur évolution et mieux comprendre leur variabilité,
- étudier les processus atmosphériques, rétroactions, couplages et surveiller leurs évolutions afin de mieux comprendre les réponses du système climatique,
- contribuer à une meilleure compréhension des facteurs influençant la qualité de l'air à l'échelle régionale (sources, transport) et évaluer l'efficacité des scénarios de réduction des émissions.

Les plateformes d'observation ACTRIS ont pour caractéristique essentielle d'être représentatives d'environnements permettant de documenter l'évolution de l'atmosphère à l'échelle régionale, c'est-à-dire éloignées des sources d'émissions directes.

Dans le contexte du confinement du printemps 2020, le dispositif ACTRIS, comprenant une vingtaine de stations multi-instrumentées en Europe, a documenté l'évolution des espèces à temps de vie court, de leurs concentrations et de leurs propriétés physiques, optiques et chimiques. Des travaux sont en cours pour analyser ces impacts à l'échelle européenne. Certaines études, comme l'impact de la forte baisse du trafic aérien sur la formation des nuages (cirrus) et la quantification de l'impact radiatif, ou l'effet de la réduction des émissions de certains gaz réactifs sur la formation de polluants secondaires, nécessiteront du temps, mais nous pouvons déjà tirer quelques enseignements de l'analyse des six premiers mois de l'année 2020, avant et pendant le confinement.

Compte tenu de la forte variabilité interannuelle des concentrations des espèces à temps de vie courts et de l'influence des conditions météorologiques, la quantification de l'impact de la baisse des émissions anthropiques lors du confinement n'est pas directe. L'impact doit être établi au regard des informations climatologiques des 5 à 10 dernières années et en tenant compte de la spécificité des masses d'air lors du confinement.

Seules quelques plateformes d'observation situées en zones urbaines ou péri-urbaines (voir ci-après les résultats du SIRTA) ont détecté une baisse des concentrations directement attribuable à la baisse des émissions, qu'il s'agisse d'observations effectuées sur la colonne atmosphérique (épaisseur optique de l'aérosol, colonne intégrée du dioxyde d'azote  $\text{NO}_2$ ), de profils d'extinction par mesures Lidar, ou de mesures in-situ de gaz réactifs ou d'aérosols. Pour les autres stations caractéristiques du niveau de fond régional, des environnements d'altitude, forestiers ou côtiers, la variabilité doit être analysée sur la base de comparaison avec les climatologies ou avec des situations météorologiques similaires, pour pouvoir mettre en évidence une éventuelle baisse des concentrations.

Une analyse approfondie des co-variations de certains gaz et d'espèces particulières dans les zones urbaines et péri-urbaines d'agglomérations européennes (Paris, Athènes, Milan) permet de détecter des changements liés à la modification des sources d'émission. L'impact est plus marqué sur les espèces gazeuses à courtes durées de vie (comme les  $\text{NO}_x$ ) que sur les aérosols ou les gaz à durées de vie intermédiaires.

En fonction de leur origine, on distingue les **polluants primaires** des **polluants secondaires**.

Les polluants primaires sont directement émis par les sources dans l'atmosphère : trafic, chauffage, agriculture, industrie...

Les polluants secondaires sont formés in situ dans l'air et résultent donc de réactions chimiques entre les différents constituants de l'atmosphère.

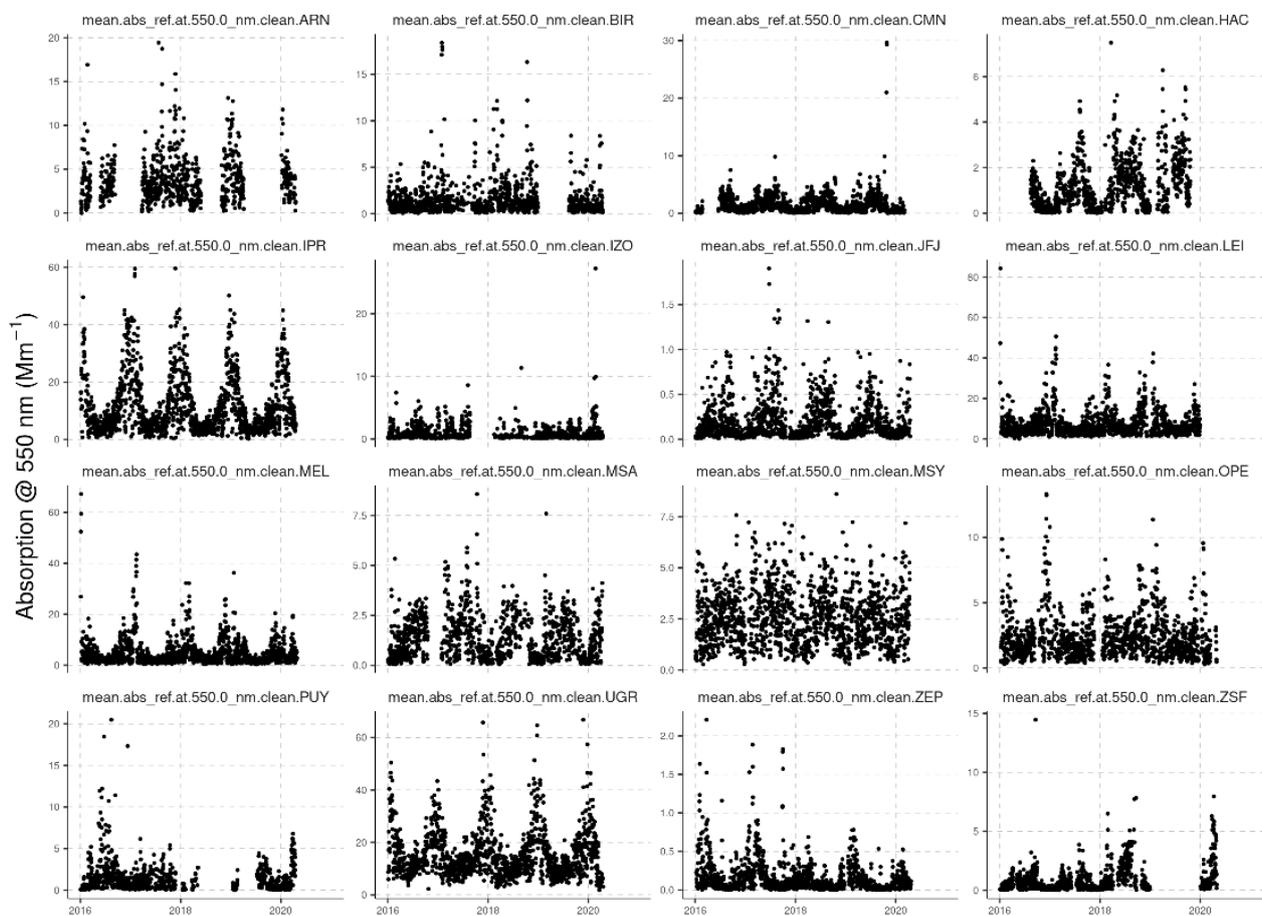


Figure 3 : Coefficients d'absorption de l'aérosol à 550 nm (équivalent carbone-suie) journalier moyen pour 16 stations européennes depuis 2018. Aucune diminution n'est directement détectable en 2020 par rapport aux années précédentes (Alessandro Bigi, U. Modena, communication personnelle)

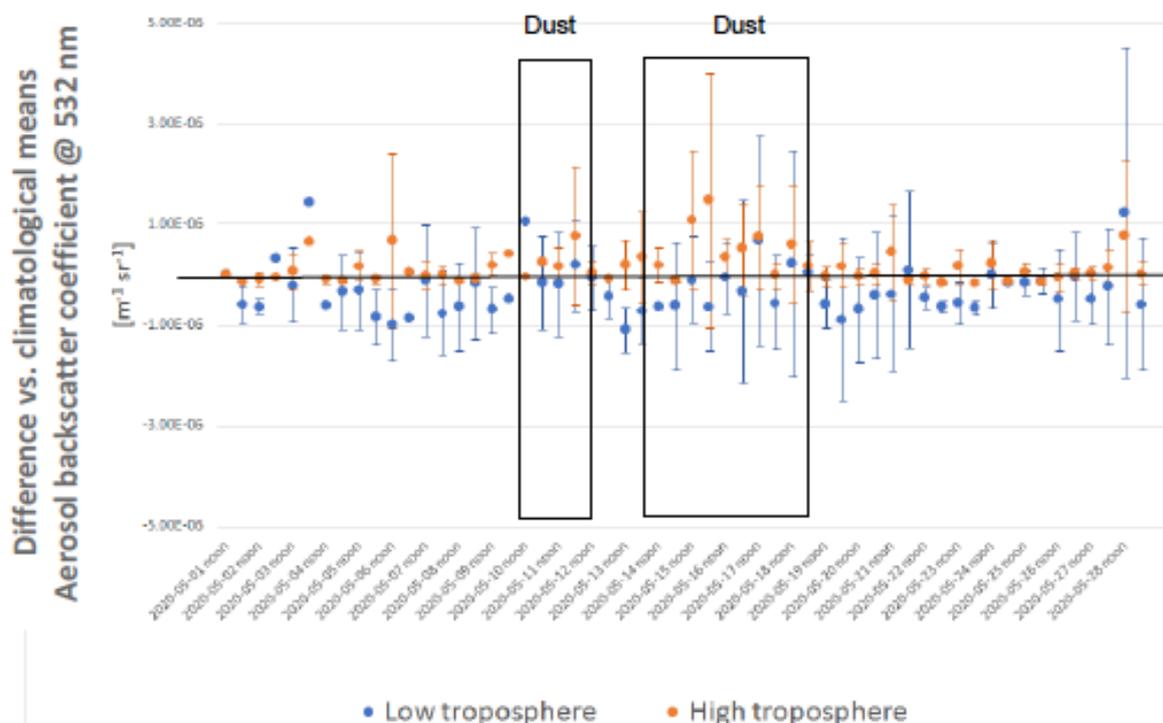


Figure 4 : Coefficients de rétrodiffusion des aérosols à 532 nm mesurés par 21 stations lidar dans la basse (bleu) et haute (rouge) troposphère. La ligne noire présente les climatologies du réseau EARLINET/ACTRIS. Les mesures en bleu se situent en-dessous de la ligne noire, suggérant une légère baisse en mai 2020 on note par ailleurs des événements de transport de poussières désertiques (notés DUST). (Document préparé par Doina Nicolae – INOE)

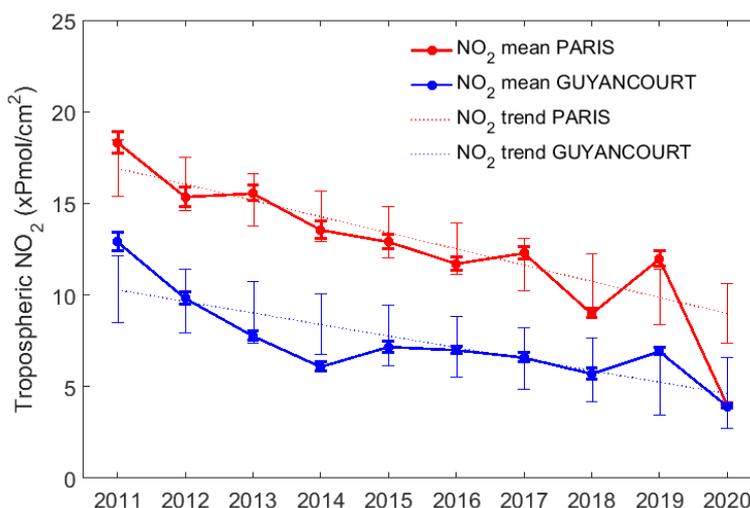
La comparaison avec les climatologies pour les particules d'aérosol montre que la baisse n'est détectable que sur les premières couches atmosphériques (basse troposphère, en dessous de 5 km d'altitude). Aucune modification n'est détectée au-dessus de 5 km, que ce soit à partir de profils Lidar ou par des mesures in-situ en haute altitude (Fig. 3 et 4). Les observations effectuées de mi-mars à fin avril 2020 montrent en général des concentrations de particules basses par rapport aux climatologies, sans que leurs valeurs ne soient cependant significativement hors de leur variabilité interannuelle

**Les émissions d'oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>)** définis comme la somme du monoxyde d'azote (NO) et du dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>), apparaissent dans toutes les combustions, à haute température, de combustibles fossiles (charbon, fuel, pétrole...) et de biomasse (bois..).

**Le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>)** est un gaz très irritant pour les bronches et fait l'objet d'une réglementation européenne et de recommandations strictes par l'OMS. Le trafic routier est responsable de plus de la moitié des émissions de NO<sub>x</sub> et le chauffage résidentiel de près de 20%.

A proximité des sources, l'effet (local) de la baisse des émissions liée au confinement est bien visible pour certains composés tels que le dioxyde d'azote. Les mesures de télédétection depuis le sol du réseau NDACC (intégré à ACTRIS-France) montrent en effet que les concentrations de NO<sub>2</sub> se sont rapprochées des valeurs de fond régionales, même au cœur de Paris (Figure 5).

Figure 5 : Evolution des colonnes de NO<sub>2</sub> au-dessus de Paris et Guyancourt pour le mois de mars, de 2011 à 2020. La différence significative entre les 2 sites, bien visible chaque année depuis 2011, disparaît en 2020 suite à la baisse des émissions dans Paris (Données ACTRIS-FR/NDACC - Andrea Pazmino - LATMOS).



### Résultats de la station SIRTA (ACTRIS)

Parmi les sites de l'IR ACTRIS-France, il est un site puissamment instrumenté situé en zone péri-urbaine qui a permis l'enregistrement de signaux de haute qualité : le « Site instrumental de recherche par télédétection atmosphérique (SIRTA) ».

Les espèces chimiques majeures associées aux particules fines – e.g. la matière organique (OM), les ions nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), sulfate (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), chlorure (Cl<sup>-</sup>) et le carbone suie (noté BC n) - sont mesurées à l'aide d'un spectromètre de masse ACSM et d'un aethalomètre. La mesure à 7 longueurs d'onde par l'aethalomètre permet d'estimer le BC issu de la combustion d'hydrocarbures (BCff,) et de la combustion de biomasse (BCwb). En ce qui concerne les gaz réactifs, en plus de l'ozone et des NO<sub>x</sub> mesurés en continu depuis 2013, une mesure des composés

organiques volatils (COV) en continu a été mise en place en janvier 2020 (par spectrométrie de masse PTR-MS).

## Description des conditions de circulation atmosphérique

La compréhension pertinente des mesures de composition atmosphérique nécessite une documentation précise des conditions de dynamique atmosphérique qui gouvernent l'advection, la dispersion et l'accumulation des polluants. Outre son arsenal analytique chimique, les moyens physiques présents au SIRTA permettent cette caractérisation. Ainsi, la Figure 6 montre une série temporelle des profils verticaux de vitesse et de direction du vent obtenue entre le 29 janvier et le 30 mars 2020 via le lidar Doppler WLS70 du laboratoire CERE. On distingue clairement sur la période deux grandes phases caractérisées par des directions de vent contrastées : (1) 30/01/2020-16/03/2020 avec un flux dominant d'Ouest (direction 250°-300°) puis (2) 17/03/2020-30/03/2020 avec un flux dominant de Nord/Nord-Est. Le flux d'Ouest est caractéristique du passage de perturbations marquées par des pluies importantes (effet de lessivage) et des vitesses de vent fortes (effet de ventilation), induisant une faible accumulation des polluants atmosphériques. A l'opposé, le flux de Nord/Nord-Est traduit l'installation d'un anticyclone associé à un temps sec et stable favorable à l'accumulation de ces polluants et couplé à une advection modérée de masses d'air continentales chargées en polluants.

Fondé il y a 20 ans, le **SIRTA** constitue l'un des quelques sites de l'Infrastructure de recherche ACTRIS en Europe offrant l'instrumentation, les installations et les capacités d'accueil nécessaires pour étudier les processus physico-chimiques atmosphériques, de la surface au sommet de la troposphère. Ces observations permettent notamment de mieux comprendre les rétroactions climatiques aux échelles régionales et décennales, d'évaluer les performances des modèles atmosphériques (climat, météo, chimie-transport) et de valider les observations spatiales.

Le SIRTA est distribué sur plusieurs zones géographiques sur le campus de l'Ecole Polytechnique, à Palaiseau, une plateforme radiométrique située sur le toit du bâtiment du LMD (Ecole polytechnique), une station de mesures in-situ de gaz réactifs et propriétés physico-chimiques des aérosols, située au LSCE (Site CEA, Orme-des-merisiers).

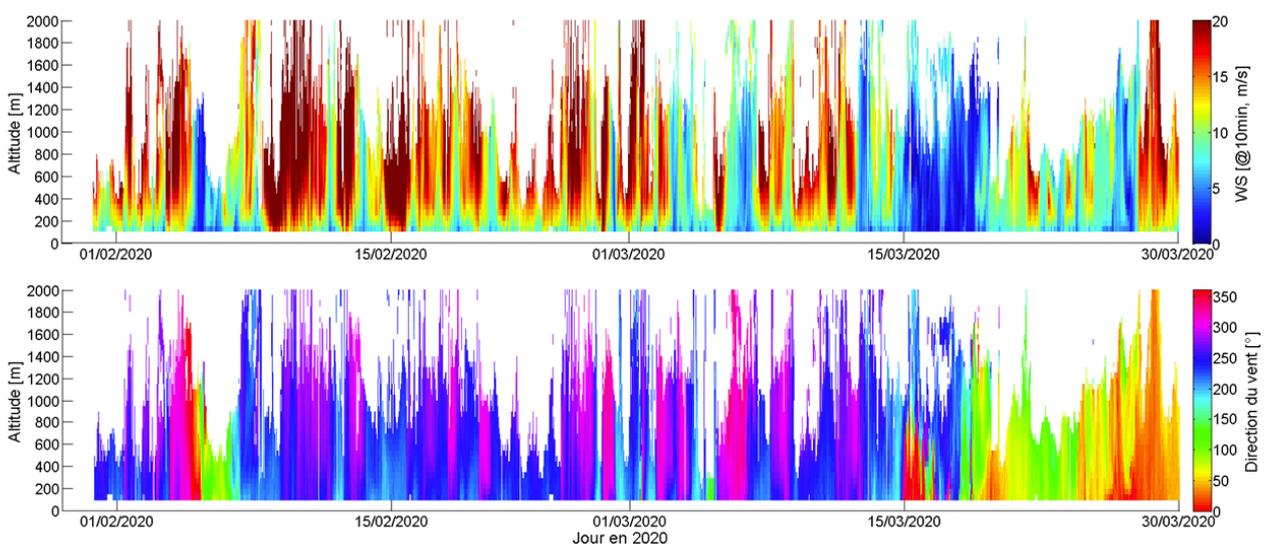


Figure 6 : Profils verticaux de vitesse et direction du vent obtenus via le lidar Doppler WLS70 du Laboratoire CERE, installé sur la plateforme SIRTA pour la période février-mars 2020 (Données ACTRIS-Fr – Martial Haeffelin – IPSL/CNRS)

## Observations de la composition atmosphérique (variabilité et sources)

La Figure 7 présente les variabilités temporelles des concentrations de contaminants atmosphériques gazeux (COV et NOx) et particulaires (carbone suie et mesures ACSM) mesurées au SIRTA tout au long du premier trimestre 2020.

L'analyse des séries de données montre que les aérosols étaient majoritairement composés de matière organique et de nitrate d'ammonium, polluant secondaire formé dans l'atmosphère à partir des oxydes d'azote (issus principalement du trafic routier) et de l'ammoniac (émis principalement par l'agriculture), cette distribution étant souvent observée à cette époque de l'année.

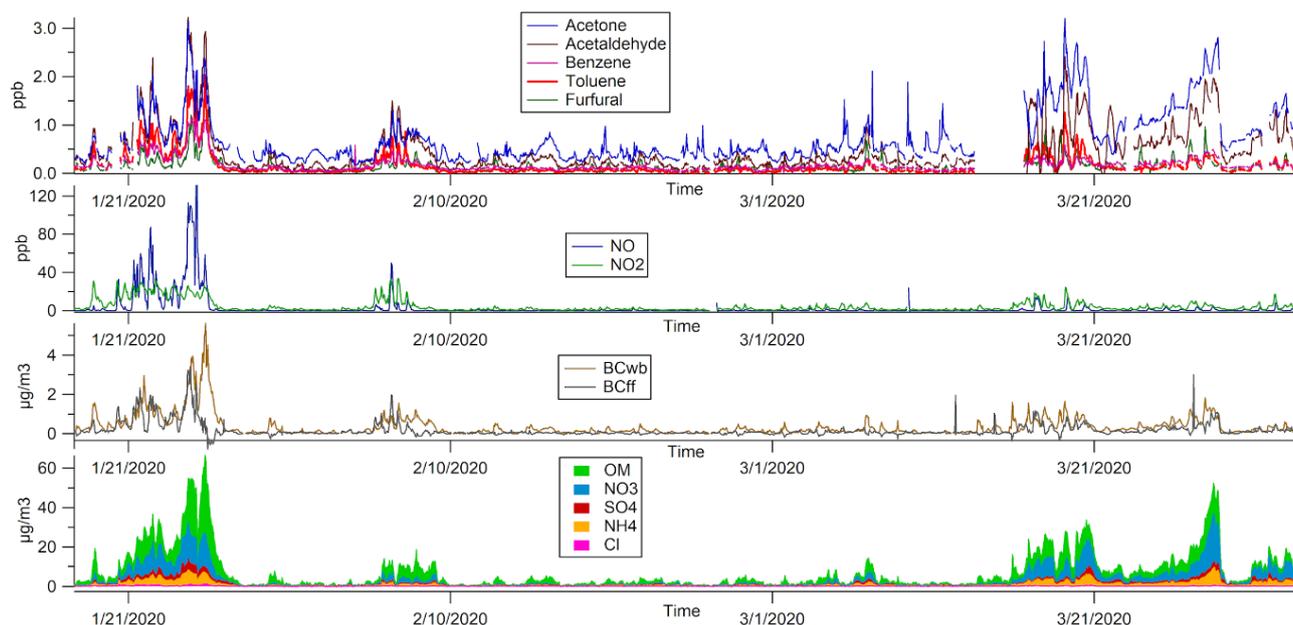


Figure 7 : Evolution temporelle des concentrations en polluants gazeux et particulaires au SIRTA durant le premier trimestre 2020. Données ACTRIS-Fr – Jean-Eudes Petit – CNRS/CEA/INERIS

Les variabilités observées ici sont fortement liées aux conditions météorologiques. En effet, alors que février et début mars ont été pluvieux et venteux, les conditions météorologiques ont brusquement changé autour de mi-mars, avec l'installation d'un système de haute pression, sec et stable, favorisant l'accumulation de la pollution. Cette transition correspond également à l'arrivée de masses d'air depuis le secteur Nord/Nord-Est avec des vitesses de vent faibles (0-4 m/s), alors que la période précédente correspondait à des vents de Sud-Ouest d'environ 4-10 m/s. La mise en place des mesures de confinement (à partir du 17/03) est concomitante avec le développement de ces conditions anticycloniques sur la moitié nord de la France. On note alors une augmentation des concentrations de certains composés gazeux (tels que certains COV) et particulaires, malgré la forte réduction de l'activité économique de la région. En point d'orgue, les maxima de concentrations observés le 28/03 coïncident avec un blocage en secteur Nord. Enfin, la brusque chute de la concentration massique de particules qui a suivi (- 60 µg/m<sup>3</sup> en 2 h) s'explique en premier lieu par une augmentation soudaine de la vitesse du vent (environ 8 m/s).

La forte baisse du trafic routier est par contre visible sur les niveaux de NOx et de BCff qui, à situation météorologique similaire à celle observée fin janvier, présentent des niveaux beaucoup plus faibles mi-mars. Dans une moindre mesure, on constate également que les COV (comme le toluène par exemple) dont le trafic constitue une source importante, présentent également des niveaux plus faibles en mars comparés à fin janvier.

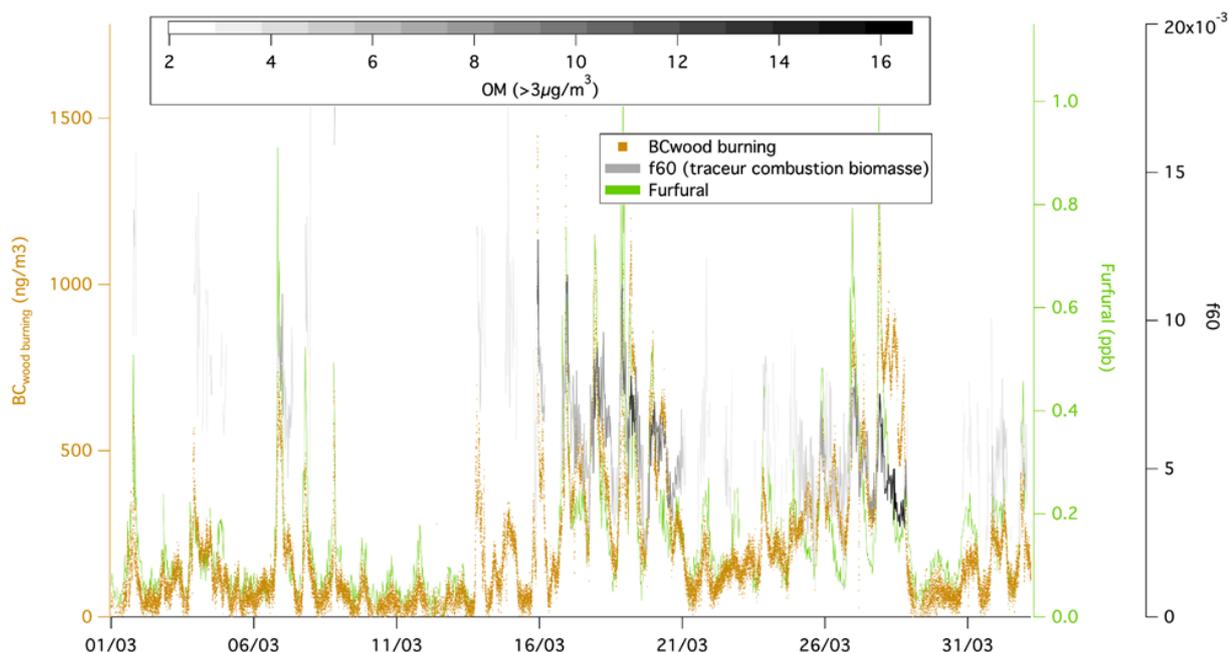


Figure 8 : Évolution des concentrations de traceurs de la combustion de biomasse, enregistrées au SIRTA durant le mois de mars 2020. L'augmentation dès l'établissement du confinement (16 mars) est notable. Données ACTRIS-Fr – Jean-Eudes Petit – CNRS/CEA/INERIS

Cette forte baisse du trafic routier contraste avec la persistance d'autres sources, en particulier les activités agricoles et le chauffage résidentiel. Sans pouvoir quantifier précisément à ce stade la contribution de cette dernière source, les différents traceurs gazeux (furfural) et particulaires (BCwb et f60 - fragment du lévoglucosan, traceur de la combustion de biomasse) soulignent bien une temporalité significative de cette source pendant le confinement (Figure 8). Cela peut être expliqué par des températures encore faibles en soirée/nuit, mais aussi par une présence accrue des populations à leur domicile du fait même du confinement.

En plus de l'influence de ces autres sources primaires, on notera également que les conditions météorologiques (fort ensoleillement) étaient favorables à la formation de composés secondaires, organiques et inorganiques.

### Étude de l'impact du confinement sur la pollution basée sur les situations analogues en terme de circulation atmosphérique

Dans une étude préliminaire, les concentrations de plusieurs espèces particulaires sur la période du 17 mars / 26 avril 2020 ont été comparées aux données mesurées sur la période 2011-2019 en mars-avril (données climatologiques apparaissant en rouge sur la Figure 9). Cette comparaison a nécessité un travail très important pour préparer cette base de données homogène et cohérente de près de 10 ans.

Ensuite, dans un deuxième temps, pour chaque jour de la période s'étendant du 17 mars au 26 avril 2020, le changement de concentration par rapport aux 5-20 jours de la période 2011-2019 qui ont des circulations atmosphériques analogues (en utilisant les distributions spatiales de l'altitude du géopotential à 500hPa) a été calculé. Les changements de concentrations basés sur les analogues de circulation atmosphérique sont représentés en bleu sur la Figure 10, qui montre donc la distribution des changements de concentration quotidiens pour cinq composants différents mesurés par ACSM, pour la masse totale en PM1 et pour le BCwb et BCff.

La Figure 9-bas montre l'impact du confinement en valeur relative et la Figure 9-haut en valeur absolue. La comparaison des valeurs de 2020 à la climatologie 2011-2019 inclut plusieurs effets : celui lié aux modifications des émissions pendant la période de confinement et celui lié aux modifications des conditions météorologiques. La comparaison s'appuyant sur les analogues de circulation atmosphérique permet de réduire significativement l'effet de ces dernières.

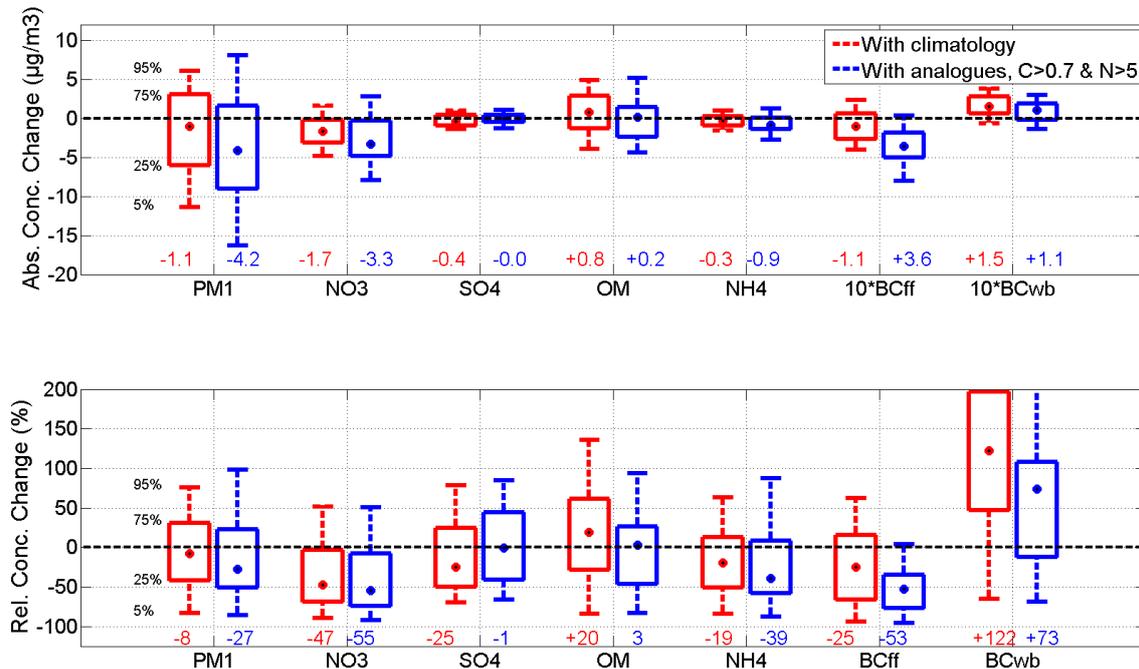


Figure 9 : Anomalie de concentration massique (distribution des valeurs journalières: médiane et percentiles 5, 25, 75 et 95) de polluants particuliers pendant la période de confinement comparées aux périodes de référence mars-avril 2011-2019 (rouge: toute la climatologie; bleu: jours étant analogues en terme de circulation atmosphérique) – source : ACTRIS FR.

La période de confinement se traduit donc par une baisse de PM<sub>1</sub> de l'ordre de 1,1 µg/m<sup>3</sup> par rapport à la climatologie et de 4,2 µg/m<sup>3</sup> par rapport aux analogues de circulation atmosphérique, soit une baisse quatre fois plus importante. Ceci s'explique par le fait que pendant la période du 17 mars au 26 avril 2020, la région parisienne est affectée quasiment exclusivement par des masses d'air continentales (plus polluées), alors que la climatologie mars-avril 2011-2019 comporte également des masses d'air océaniques (moins polluées). En comparant à des jours de conditions météorologiques similaires, on observe une baisse de près de 30% des PM<sub>1</sub> en 2020.

La forte baisse du trafic routier est visible sur les concentrations massiques de BCff qui sont en baisse de 0,36 µg/m<sup>3</sup> soit 53 % pendant la période comparée aux conditions de circulation atmosphérique analogues de 2011-2019. Pendant la période de confinement, les concentrations de BCwb associées à la combustion de biomasse sont par contre en augmentation de 0,11 µg/m<sup>3</sup> soit +73 %, une augmentation qui pourrait être attribuée à des activités domestiques plus soutenues.

Les concentrations massiques de nitrate particulaire pendant la période du 17 mars au 26 avril 2020 sont en moyenne 3,3 µg/m<sup>3</sup> plus basses que pour des conditions de circulation atmosphérique analogues de 2011-2019, soit une réduction de 55 %. Pour les sulfates, cette réduction est de 25%. On observe également une baisse de 39 % sur l'ammonium, confirmant que la réduction des sources issues du trafic a eu un impact très significatif sur la formation des

particules de nitrate d'ammonium. Lorsque les concentrations en nitrate d'ammonium sont comparées à une simple climatologie, les changements sont environ trois fois plus faibles en valeur absolue.

Ainsi, les comparaisons par rapport aux analogues permettent de s'affranchir de l'impact de la variabilité des conditions météorologiques pour quantifier l'impact des changements de certaines sources dus au confinement sur la concentration des polluants.

## Les données de l'IR ICOS

L'IR ICOS est composée de réseaux de stations permanentes opérant dans trois domaines : une composante qui mesure la concentration en gaz à effet de serre dans l'atmosphère, une seconde qui mesure le contenu en carbone des océans et la troisième les écosystèmes terrestres. Les deux composantes océanique et terrestre s'attachent à mesurer les échanges avec l'atmosphère. L'impact du confinement sur la composition atmosphérique en  $\text{CO}_2$  est difficile à observer du fait de la faiblesse du signal correspondant aux émissions anthropiques, et du fait de cycles annuels de concentrations liés au fonctionnement de la biosphère qui ne sont pas reproductibles d'une année à l'autre du fait des conditions climatiques. Ainsi, malgré le fait que l'infrastructure ICOS soit capable de détecter une évolution de la concentration atmosphérique de  $\text{CO}_2$  du niveau attendu avec le confinement, il est donc difficile d'attribuer cette variation au confinement (l'hiver doux et la sécheresse de cette année ont eu un impact également fort sur le cycle annuel du  $\text{CO}_2$ ). C'est ce que l'on observe sur la Figure 10 qui ne montre aucun effet notable sur la concentration en  $\text{CO}_2$  en 2020 lors du confinement, par rapport aux années précédentes sur la tour du Trainou, près d'Orléans.

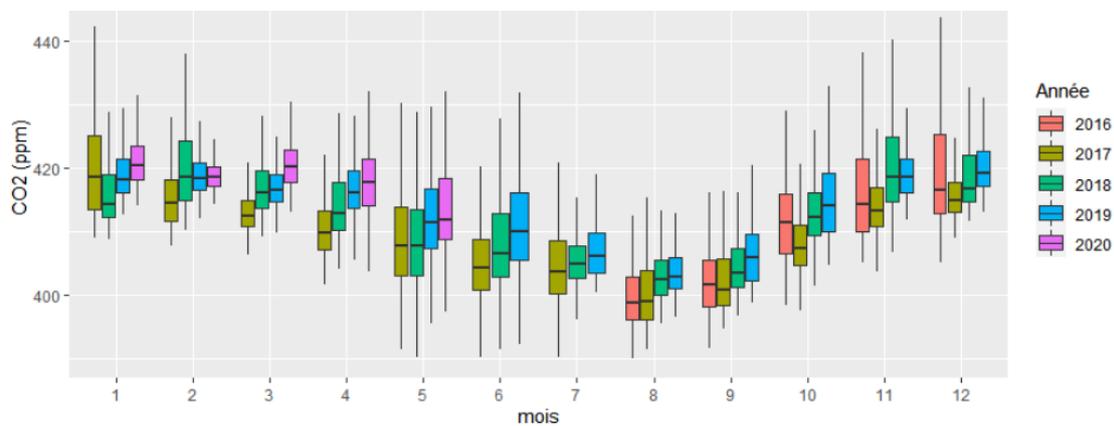


Figure 10 : Concentrations mensuelles en  $\text{CO}_2$  mesurées sur la tour du Trainou (près d'Orléans) à 180 m d'altitude pour quatre années consécutives. Le confinement démarre le 17 mars 2020.

Malgré tout, un signal est observé dans les fluctuations de concentrations, qui traduit une baisse des émissions comme le suggère la figure 11 qui représente les données en temps réel du site ICOS de Gartow en Allemagne et montre une fréquence de pics plus faible pendant le confinement qu'avant.

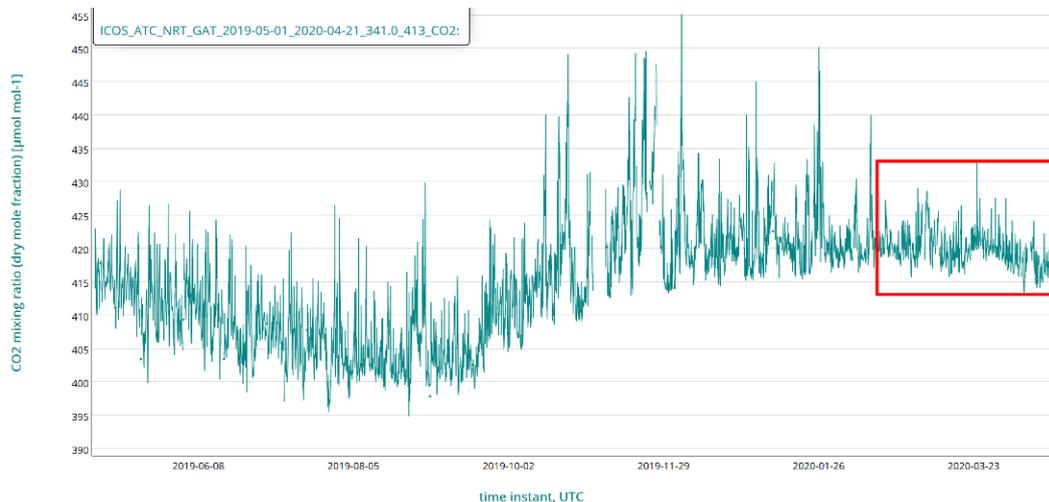


Figure 11 : Concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> à la tour ICOS à proximité de Gartow en Allemagne. On observe une diminution de la variabilité des concentrations au début du confinement, et notamment des pics les plus hauts. Source : [https://www.icos-cp.eu/swimmingpool\\_FR](https://www.icos-cp.eu/swimmingpool_FR).

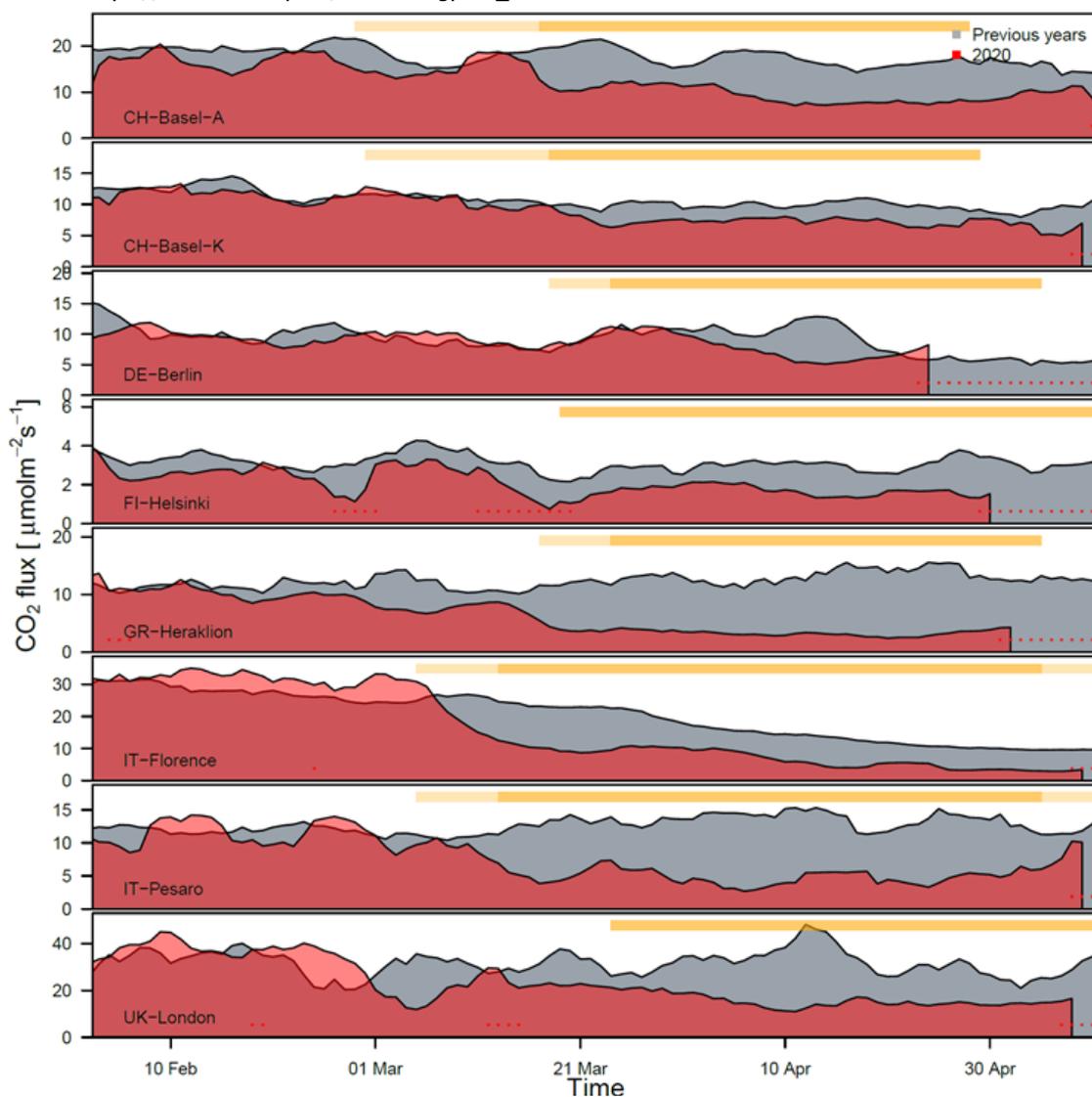


Figure 12: Flux de CO<sub>2</sub> au-dessus de grandes villes en Europe autour de la période de confinement (rouge) comparés aux mesures des années précédentes (grisé). Les lignes jaunes indiquent les périodes de confinement. D'après Papale et al. (2020 ; <https://www.icos-cp.eu/event/933>)

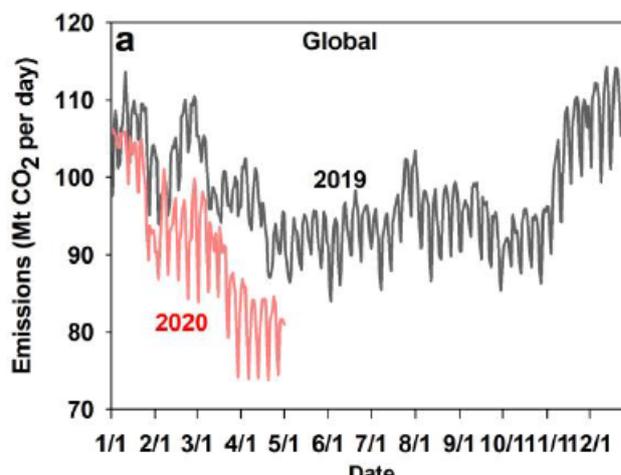
Si le signal atmosphérique est faible, la mesure directe des flux par covariances turbulentes sur des grandes villes européennes a montré une diminution forte des flux de surface lors du confinement. C'est ce que montre la mesure des flux du réseau ICOS en zones urbaines (Figure 12).

On y voit de façon très nette une diminution des émissions sur la plupart des villes considérées. Les variations observées sont dues à des causes différentes : Heraklion et Pesaro sont des zones de fort trafic et d'activité économique qui ont été stoppées net lors du confinement. Dans d'autres villes comme Florence, Bâle ou Helsinki, la baisse du trafic a été contrebalancée par l'augmentation du chauffage résidentiel, tandis qu'à Berlin la forte présence de végétation a pu tempérer les flux. Ces données montrent l'intérêt de mesures de flux directes par covariances turbulentes sur les zones urbaines fortement anthropisées pour détecter les évolutions de ces sources majeures de CO<sub>2</sub> vers l'atmosphère.

Au-delà des flux mesurés sur les zones urbaines, il est intéressant de savoir si l'assimilation des écosystèmes a été perturbée pendant cette période de confinement. En effet, on sait que l'ozone et les aérosols peuvent altérer le fonctionnement des écosystèmes (stress oxydatif, et modification de la qualité du rayonnement). Pour détecter un signal de type confinement sur les flux des écosystèmes, il sera nécessaire d'analyser les données de l'ensemble du réseau de stations avec des approches d'analyse de séries temporelles d'une part et la comparaison des séries de données entre les stations couvrant des zones urbaines et des zones rurales d'autre part. Les premiers résultats suggèrent une diminution des flux de dépôt d'ozone en zone péri-urbaine, accompagnée d'un accroissement significatif de la fixation de CO<sub>2</sub> par photosynthèse durant le confinement (S. Fares, zone péri-urbaine de Rome, non publié).

Enfin, les inventaires d'émissions de CO<sub>2</sub> peuvent être maintenant calculés en temps quasi-réel, où une évaluation<sup>5</sup> montre que le confinement a provoqué une diminution des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> de l'ordre de 8% entre janvier et avril 2020 comparé à 2019 (Figure 13).

Figure 13: Evolution des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> de janvier à avril 2020, évaluée à partir des inventaires. Tiré de Liu et al. 2020. <https://www.nature.com/articles/s41467-020-18922-7>



## Téledétection satellitaire

En matière de composition atmosphérique, la France s'est dotée depuis de nombreuses années aux côtés des autres pays d'un système d'observation satellitaire au sein duquel le CNES (Centre national d'études spatiales) joue un rôle essentiel. En effet, le CNES travaille à définir, concevoir et développer des outils spatiaux avec ses partenaires au bénéfice de la communauté de recherche

<sup>5</sup> Liu et al. 2020 <https://www.nature.com/articles/s41467-020-18922-7>

scientifique. Cela concerne les problématiques du climat (tendance à long terme) et l'étude des processus physico-chimiques en lien avec la modélisation.

**L'interféromètre atmosphérique de sondage dans l'infrarouge (IASI)** est un capteur interférométrique ultrasensible conçu par le CNES, en collaboration avec EUMETSAT, et placé sur les satellites européens MetOp, dont les modèles A, B et C ont été lancés en 2006, 2012 et 2018 respectivement.

IASI est un spectromètre opérant dans le domaine infra-rouge thermique avec une grande résolution géographique (un pixel de IASI couvre une zone de 12 km de diamètre). Depuis une orbite polaire à 800 km d'altitude, IASI observe – deux fois par jour - la totalité de l'atmosphère terrestre.

Avec le programme européen COPERNICUS pour la surveillance opérationnelle de l'environnement et l'amélioration des technologies spatiales, les données spatiales sont également analysées par d'autres utilisateurs (INERIS, ADEME, AASQA) ou des PME en coopération avec le CNES afin de proposer des démonstrations d'applications. Les résultats présentés ici sont issus des premières constatations par les partenaires des laboratoires de recherche du CNRS et des unités mixtes des universités. La mesure de la composition chimique depuis l'espace a effectivement permis d'observer des impacts du confinement sur les indicateurs de la qualité de l'air et des variations de gaz à effet de serre. À l'heure actuelle, les sondeurs spatiaux produisent surtout des colonnes

atmosphériques intégrées sur la verticale. Cette limitation peut sembler inhérente à leur principe alors même que les développements algorithmiques en cours et l'utilisation combinée de sondeurs multiples permettent déjà d'isoler les données dans les basses couches et même - à terme - de produire des profils de concentrations. Cette limitation actuelle n'empêche cependant pas de tirer des enseignements des mesures depuis l'espace pour les espèces peu présentes en altitude voire – quand leur signature spectroscopique est bien connue - pour des espèces comme l'ozone qui sont très présentes en altitude (stratosphère) mais dont on sait à présent observer les concentrations troposphériques par voie satellitale.

### **Les données IASI (CNES-Eumetsat)**

Sensible à plus de trente espèces atmosphériques, IASI a notamment permis, pendant la période de confinement, l'observation des variations de concentrations du monoxyde carbone (CO), de l'ammoniac (NH<sub>3</sub>) et du méthane (CH<sub>4</sub>). L'imposante base de données déjà acquise et les algorithmes de traitement développés ont permis la comparaison avec des périodes de référence sélectionnées du fait de leur similarité avec la période de confinement.

#### *Le monoxyde de carbone CO*

Le monoxyde de carbone est un polluant qui persiste plusieurs semaines dans l'atmosphère. Comme ses émissions en France sont loin d'être aussi fortes que celles de la Chine ou de l'Europe centrale, les mesures satellitaires n'y ont pas fait ressortir un signal fort pendant le confinement.

On a toutefois vu en Europe, une diminution de la concentration de CO dans la zone de Milan, dont l'orographie est habituellement connue pour concentrer les polluants. En effet, IASI a observé une baisse de l'ordre de 20 à 30 % de la pollution au monoxyde de carbone sur la première quinzaine de mars en 2020 par rapport à la moyenne des dix années précédentes (Figure 14).

Le **monoxyde de carbone (CO)** est un gaz peu réactif dans l'atmosphère émis par toutes les activités en lien avec les processus de combustion : le trafic routier, les industries et le chauffage. Ses émissions sont particulièrement accrues en hiver.

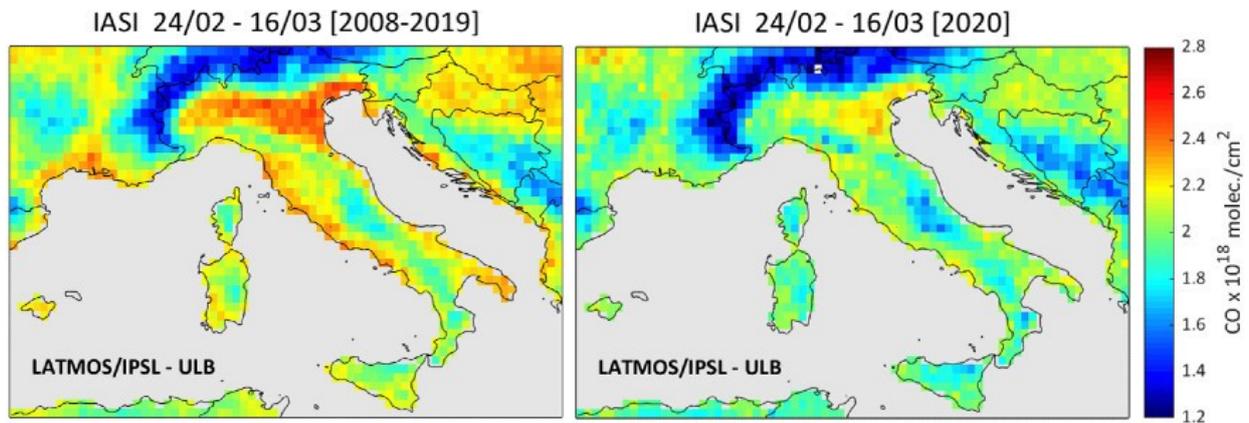


Figure 14: Colonne atmosphérique de monoxyde de carbone au-dessus de l'Italie du 24 février au 16 mars 2020, mesurée par IASI, comparée à la moyenne des années 2008 à 2019. Figure Maya George, LATMOS/Sorbonne Université.

Les équipes du LATMOS ont également exploité les données sur CO en calculant la différence relative entre la période de 2020 et la même période moyennée sur les deux années qui précèdent, en février (période pré-confinement) et de mi-mars à mi-avril (Figure 15). Si on constate un excès (en rouge) de CO avant le confinement par rapport aux deux années précédentes, on note un déficit (en bleu) durant le confinement qui pourrait être attribué au fort ralentissement de certaines activités anthropiques. Cela reste toutefois à analyser plus finement au regard de la comparaison des situations météorologiques.

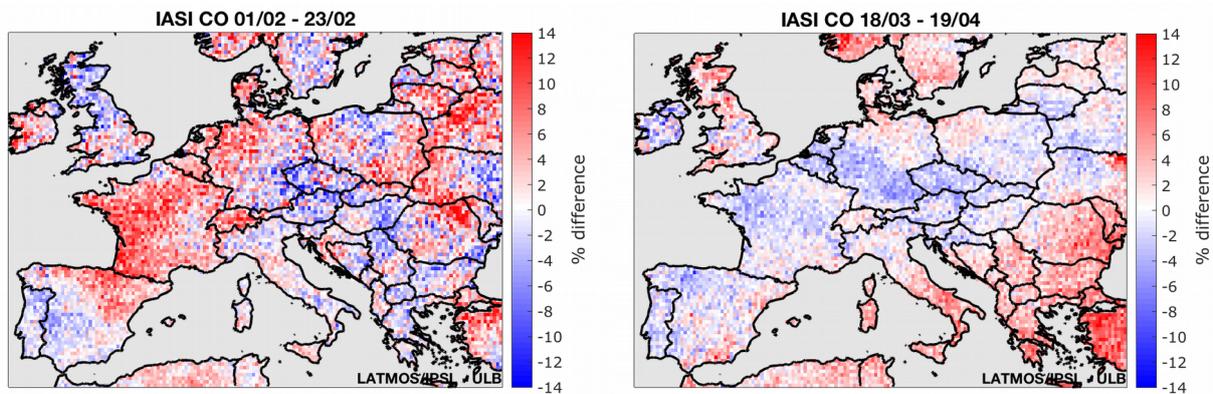


Figure 15: Différence relative entre la moyenne des colonnes de CO en 2018 et 2019 et celle en 2020 sur la période indiquée au-dessus de l'Europe - Figure Maya George, LATMOS

## L'ammoniac $\text{NH}_3$

Au printemps, lors de l'épandage d'engrais sur les cultures avoisinantes, la région parisienne connaît de nombreux épisodes de pollution aux particules. Etant donné le rôle important que joue  $\text{NH}_3$  dans les problèmes environnementaux et de santé publique, **ses émissions sont réglementées** en France.

Grâce à sa couverture globale, IASI fournit des cartographies uniques de l'ammoniac, un gaz difficile à mesurer dans l'air ambiant. De plus, les inventaires d'émissions ne sont pas encore très précis.

Les sources d'ammoniac n'ayant été que peu affectées par la situation de confinement et la réduction d'activité qui en a découlé, de notables pics de pollution ont été enregistrés fin mars 2020. La Figure 16 montre clairement, à l'aide de la mesure à Paris par un instrument au sol de l'ammoniac, des  $\text{PM}_{2.5}$  et des  $\text{NO}_x$ , deux épisodes de pollution ; elle montre aussi, pendant le second épisode, l'observation de  $\text{NH}_3$  effectuée par les trois instruments en orbite de IASI (27 et 28 mars 2020). Ainsi, les activités agricoles de printemps aux abords des villes comme Paris semblent avoir créé un pic de  $\text{NH}_3$ , précurseur d'aérosols secondaires <sup>6</sup>.

**L'ammoniac ( $\text{NH}_3$ )** est un polluant dont les émissions sont aujourd'hui au moins quatre fois plus élevées que lors de la période préindustrielle, ce qui crée une multitude de dommages environnementaux.

L'ammoniac est l'une des rares bases atmosphériques ce qui lui permet de se combiner avec les acides émis dans l'atmosphère ou produits par les transformations atmosphériques des polluants primaires. Les sels qui en résultent sont le plus souvent très peu volatils, ce qui conduit à la formation de particules fines dont l'impact sur la qualité de l'air et la visibilité est tout à fait considérable. En France,  $\text{NH}_3$  est majoritairement émis par l'agriculture à 98 %, dont 64 % provient de la déjection animale et 34% de l'épandage d'engrais azoté sur les cultures (CITEPA, 2018).

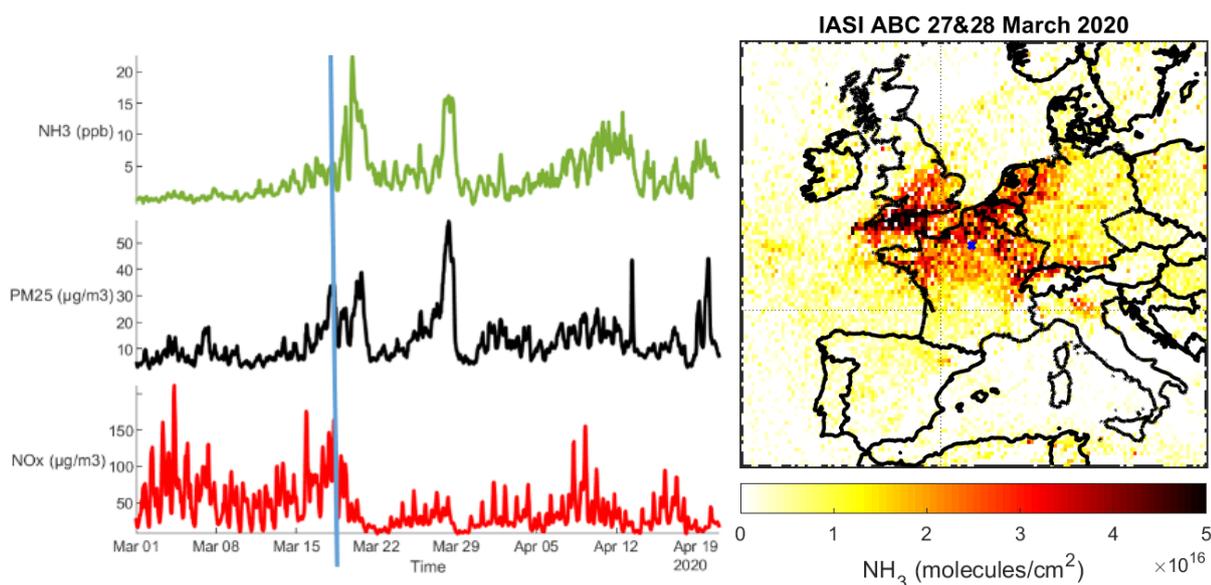


Figure 16: Mesure simultanée au sol à Paris de concentrations en ammoniac, en  $\text{PM}_{2.5}$  et en  $\text{NO}_x$  (détection de deux épisodes de pollution) – à gauche et mesure de la concentration en  $\text{NH}_3$  par les 3 instruments IASI en orbite lors du 2<sup>ème</sup> pic de pollution, les 27 et 28 mars 2020 – à droite - (travaux du LATMOS)

<sup>6</sup> Viatte, C., Petit J.-E., Yamanouchi S., Van Damme M., Doucerain C., Germain-Piaulenne E., Gros V., Favez O., Clarisse L., Coheur P.-F., Strong K., and Clerbaux C. : Ammonia and  $\text{PM}_{2.5}$  air pollution in Paris during the 2020 COVID lockdown, Env. Poll., ENVPOL-D-20-02087R1, submitted Oct 2020.

## Le méthane

Outre les polluants atmosphériques de courte et moyenne durées de vie, la télédétection spatiale permet aussi, au moyen du sondeur IASI, le suivi de gaz à effet de serre tels que le méthane, d'origines à la fois naturelle (41 %) et anthropique (agriculture, déchets, charbon, gaz).

Les résultats du LMD sur la tendance observée par IASI quant à la concentration de méthane dans l'atmosphère (Figure 17) montrent l'augmentation de fond sur plus de dix ans de ce puissant gaz à effet de serre, ainsi que le cycle saisonnier associé à ses émissions naturelles.

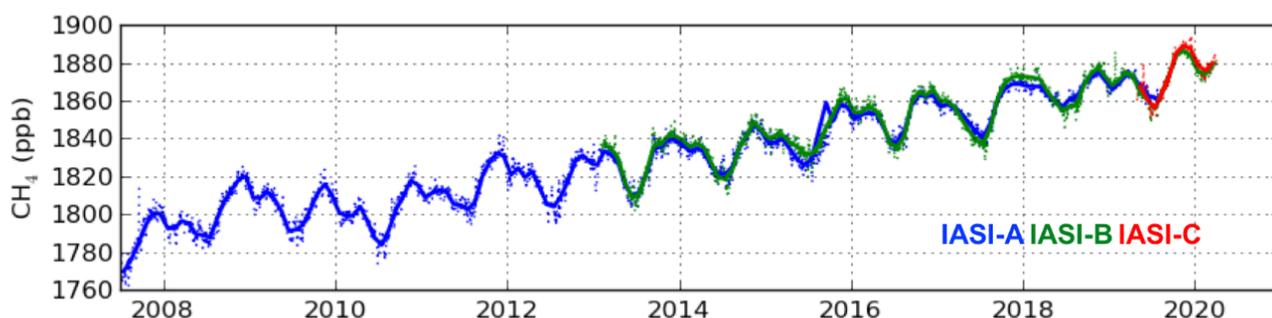


Figure 17: Rapports de mélange moyen de  $\text{CH}_4$  sur la colonne troposphérique globale mesurés par IASI depuis 2008 – Combinaison des mesures de  $\text{CH}_4$  par les trois instruments IASI/Metop (travaux Cyril Crevoisier - LMD/CNRS)

En ce qui concerne l'effet du confinement, IASI a effectivement détecté un signal faible sur le méthane. Les travaux du LMD/CNRS ci-dessous montrent en effet une diminution de l'anomalie de  $\text{CH}_4$  (excès ou déficit de  $\text{CH}_4$  mesuré par IASI par rapport au cycle saisonnier et tendance annuelle) pendant le confinement par rapport aux années précédentes, ce qui n'est pas le cas au début du confinement (Figure 18). Il faut toutefois souligner que la diminution, bien que remarquable, est très faible et pourrait être attribuée à d'autres phénomènes que la baisse des émissions.

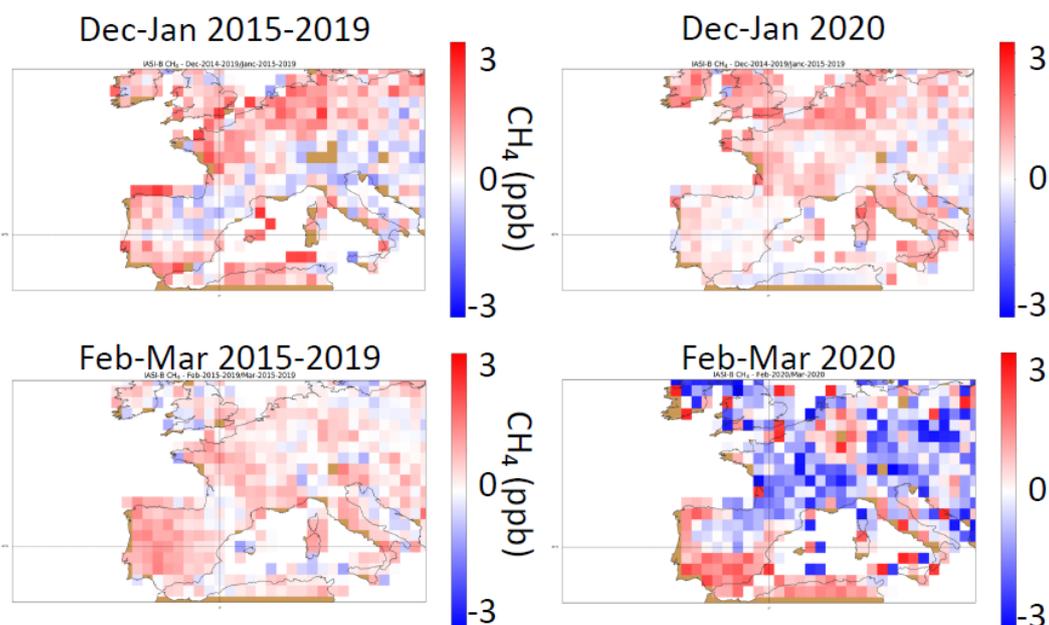


Figure 18: Anomalie (en ppb) de rapports de mélange de colonne atmosphérique de  $\text{CH}_4$  mesurés par les instruments IASI, après élimination de l'estimation de la tendance annuelle et du cycle saisonnier sur quatre périodes : moyennes déc-jan 2015–2019, déc-jan 2020, fév-mars 2015–2019 et fév-mars 2020 (travaux Cyril Crevoisier - LMD)..

## Les données Sentinel 5P (ESA/EU Copernicus)

### Les oxydes d'azote

Le satellite Sentinel 5P, qui embarque un spectromètre opérant dans les domaines UV-visible et proche IR, avec une résolution spatiale fine de l'ordre de  $3,5 \times 7 \text{ km}^2$ , a observé des diminutions importantes des concentrations de dioxyde d'azote (Figure 19). Cependant, il est nécessaire de soustraire l'effet de la variabilité météorologique pour donner des estimations plus quantitatives.

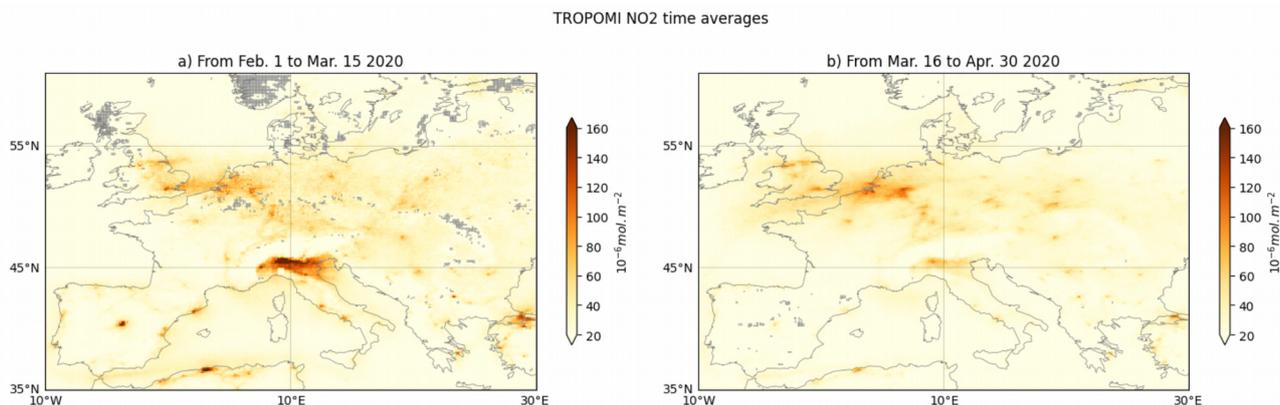


Figure 19 : Colonnes troposphériques de NO<sub>2</sub> mesurées par Sentinel 5P moyennées avant (gauche) et pendant (droite) le confinement- Travaux CAMS, Barré et al., 2020

## Modélisation numérique

Les modèles de chimie-transport ou de qualité de l'air sont des outils numériques permettant de représenter les mécanismes d'advection, diffusion et transformation que subissent les espèces traces atmosphériques sous l'effet des forçages que constituent les situations météorologiques ou les flux de polluants émis par les activités humaines ou les sources biotiques et naturelles. Ils sont utilisés pour faire des prévisions de la qualité de l'air à l'horizon de quelques jours, ou des projections de leur évolution dans l'hypothèse où des mesures de gestion venaient à être imposées pour améliorer la qualité de l'air. Ces deux applications ont été exploitées dans le cadre du confinement pour connaître la qualité de l'air en temps réel pendant la pandémie, mais aussi pour identifier la réduction induite par les mesures de restriction d'activité.

De tels modèles de qualité de l'air sont déployés quotidiennement par la plateforme nationale de prévision de la qualité de l'air Prev'Air<sup>7</sup> opérée par l'INERIS en collaboration avec Météo-France et le CNRS. Dans cette configuration, les modèles assimilent par ailleurs les observations réglementaires en temps réel, de telle sorte que les prévisions produites pendant le confinement pouvaient prendre en compte les effets de ce dernier, même en l'absence d'information disponible en temps réel sur les réductions d'activité. Dès lors, il a été possible très rapidement de comparer les prévisions brutes des modèles (basées sur des émissions ignorant les réductions induites par le confinement) et les cartes assimilées pour quantifier l'impact sur la pollution en NO<sub>2</sub> et aux particules fines (Figure 20). Un bilan publié après le confinement a aussi été publié et a conclu que les concentrations des principaux polluants atmosphériques avaient ainsi baissé dans les cent plus grandes villes françaises, dans des proportions moyennes de 49% pour le dioxyde d'azote NO<sub>2</sub>, 12% pour les PM<sub>2.5</sub> et 10% pour les PM<sub>10</sub><sup>8</sup>.

7 [www.prevoir.org](http://www.prevoir.org)

8 <https://www.ineris.fr/fr/ineris/actualites/impact-confinement-amelioration-qualite-air-bilan>

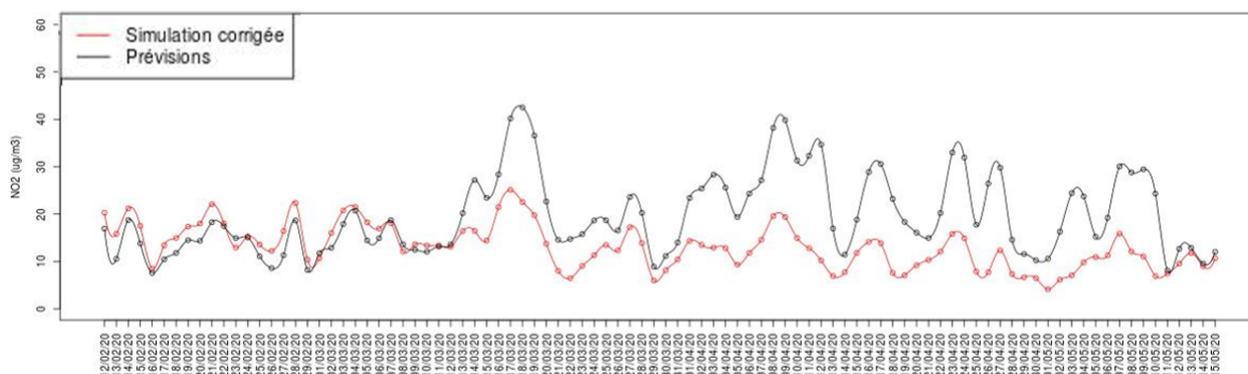


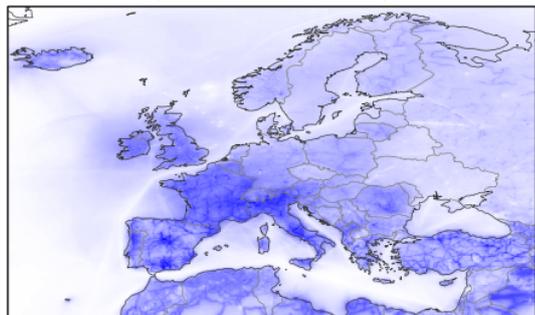
Figure 20: Evolution des concentrations journalières de NO<sub>2</sub> (µg/m<sup>3</sup>) en moyenne sur les cent plus grandes villes françaises du 12 février au 15 mai 2020. La courbe noire indique les concentrations prévues par le système Prev'Air, sans prendre en compte l'impact des mesures de confinement. La courbe rouge est une simulation corrigée avec les mesures constatées sur le terrain. (Source : INERIS)

Certains systèmes de prévision de la qualité de l'air ont été adaptés afin de fournir une évaluation de l'impact du confinement sur la qualité de l'air. En exploitant des statistiques en temps réel, il a été possible d'estimer en première approche les réductions d'émissions de polluants anthropiques pendant la période de confinement. Ce travail a fourni de premières évaluations pour le secteur de la mobilité ou de la consommation énergétique, mais il est encore nécessaire de les raffiner pour des secteurs plus complexes comme les émissions du secteur résidentiel. Ces informations ont néanmoins été exploitées dès le mois de mars 2020 pour produire quotidiennement des estimations de l'effet du confinement sur la qualité de l'air en France et en Europe avec le modèle de chimie-transport CHIMERE utilisé dans la plateforme Prev'air mais aussi au niveau européen pour les services Copernicus de surveillance de l'atmosphère (CAMS)<sup>9</sup>.

Un rejeu par modélisation de toute la période, avec et sans mesures de confinement a par ailleurs été conduit dans le cadre de Copernicus. Cet exercice a impliqué onze équipes européennes dont l'INERIS et Météo-France. Ces résultats seront publiés dans le rapport annuel de la qualité de l'air 2020 de l'Agence européenne de l'environnement. Les réductions de concentration modélisées sont proches des estimations issues des observations : de l'ordre de 50 à 70% pour le dioxyde d'azote et autour de 10 à 20% pour les PM<sub>10</sub> (Figure 21). Un travail analogue a été publié en collaboration entre le Laboratoire de Météorologie Dynamique et le CITEPA. A mesure que les statistiques d'activité économique apparaissent, il devient possible de raffiner les estimations des émissions pendant le confinement. Un nouveau rejeu de modélisation est ainsi en cours au niveau national.

9 <https://atmosphere.copernicus.eu/european-air-quality-information-support-covid-19-crisis>

NO<sub>2</sub> concentration mean difference, ENSEMBLE (relative diff. in %)  
Lockdown scenario minus Reference  
(2020-03-01 to 2020-04-30)



PM<sub>10</sub> concentration mean difference, ENSEMBLE (relative diff. in %)  
Lockdown scenario minus Reference  
(2020-03-01 to 2020-04-30)

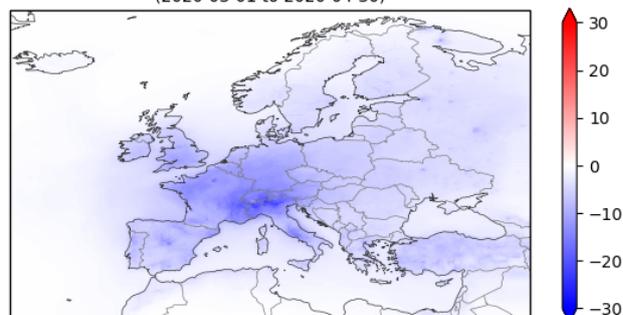


Figure 21 : Différence relative (%) des concentrations de surface de NO<sub>2</sub> (gauche) et PM<sub>10</sub> (droite) induite par les mesures d'activité pendant le confinement. Résultat de modélisation d'Ensemble Copernicus Atmosphere Monitoring Service, Source :INERIS<sup>10</sup>.

## Conclusion

Les concentrations de polluants gazeux et particulaires sont la résultante des émissions mais aussi de nombreux processus chimiques et physiques. La période de confinement a permis de bénéficier d'une expérience en grandeur nature caractérisée par la réduction très significative de certaines sources émettrices, principalement liées au trafic routier. En Île-de-France par exemple, les déplacements en voiture, habituellement de l'ordre de 15,5 millions par jour, ont été très limités dès le 17 mars. Pour autant, les français n'ont pas nécessairement respiré un air plus pur, car les particules fines (PM<sub>2,5</sub>) ont été encore très présentes dans l'atmosphère: deux pics de pollution aux particules ont ainsi été observés, pour les journées des 20-21 et 27-28 mars 2020. Ces particules sont émises directement par le trafic routier et le chauffage au bois, mais elles peuvent également être formées dans l'atmosphère à partir des oxydes d'azote et de l'ammoniac sous certaines conditions météorologiques.

La situation est donc complexe à analyser. Or, pour caractériser l'impact de ce changement majeur sur l'ensemble des composés atmosphériques, les travaux en cours montrent l'importance d'observer de manière conjointe les variables essentielles qui caractérisent les propriétés et processus physiques et chimiques de l'atmosphère. Ces travaux montrent également l'intérêt de disposer de séries de mesures dont la qualité est certifiée et qui s'étendent sur plusieurs années, voire plusieurs décennies. Les jeux de données exploités dans cette étude résultent du travail de plusieurs équipes de recherche pendant plus de dix ans.

En utilisant une méthode basée sur les situations analogues en terme de circulation atmosphérique appliquée au site SIRTACTRIS-Fr, un impact des mesures de confinement sur la pollution particulaire en région parisienne a été mis en évidence, alors qu'une simple comparaison avant/pendant le confinement ne permet pas de conclure quant à l'effet des mesures de restriction d'activité, du fait de l'importance de la variabilité météorologique.

Les gradients urbains/péri-urbains ont aussi évolué notablement (mesures NDACC/ACTRIS-Fr).

Les mesures de gaz à effet de serre sont plus difficiles à interpréter du fait de leur longue durée de vie mais les mesures de flux du réseau ICOS ont bien identifié une signature du confinement.

Ces mesures in-situ sont complétées par la télédétection satellitaire. Ainsi, Sentinel 5P a enregistré une baisse des concentrations de NO<sub>2</sub> et IASI permet d'étudier l'effet pour le CO ou le NH<sub>3</sub>.

<sup>10</sup> Barré, J., Petetin, H., Colette, A., Guevara, M., Peuch, V.-H., Rouil, L., Engelen, R., Inness, A., Flemming, J., Pérez García-Pando, C., Bowdalo, D., Meleux, F., Geels, C., Christensen, J. H., Gauss, M., Benedictow, A., Tsyro, S., Friese, E., Struzewska, J., Kaminski, J. W., Douros, J., Timmermans, R., Robertson, L., Adani, M., Jorba, O., Joly, M., and Kouznetsov, R.: Estimating lockdown induced European NO<sub>2</sub> changes, Atmos. Chem. Phys. Discuss., <https://doi.org/10.5194/acp-2020-995>, in review, 2020.

L'adaptation des modèles opérationnels et des modèles de recherche de chimie atmosphérique a permis de faire des simulations avec et sans réduction d'émissions liées au confinement, fournissant des estimations qu'il s'agit de confronter aux observations. Des rejeux de modélisation seront encore approfondis dans les mois à venir pour mieux comprendre ces effets, et fournir des informations aux communautés scientifiques travaillant par exemple sur l'effet de la pollution atmosphérique comme co-facteur de risque pour la Covid-19.

D'un point de vue plus organisationnel, on peut relever que la communauté de l'observation de l'atmosphère s'est massivement mobilisée dans un contexte difficile pour assurer la continuité des services d'observation. Outre l'attachement des personnels à leurs tâches de service, cette réactivité s'explique aussi par le fait que la communauté partage largement la conscience 1/ de la pertinence de ses travaux en regard des problématiques sociétales et 2/ de l'intérêt scientifique potentiel de toute discontinuité forte dans les forçages anthropiques.

Les résultats préliminaires présentés ici montrent aussi combien l'exploitation rigoureuse de ces événements de rupture nécessite

- 1/ des séries de données longues permettant de caractériser l'état de référence et permettant une sélection rigoureuse des situations comparables
- 2/ des combinaisons instrumentales (et donc des sites fortement instrumentées) afin d'analyser les données de manière pluridisciplinaire

La situation récente a également illustré combien nos infrastructures de recherche étaient les lieux naturels de la construction d'une vision intégrée de l'ensemble des résultats obtenus dans les différents sites ou avec les différents moyens. De ce fait, elles constituent les interfaces de choix avec les services de suivi opérationnels de l'environnement ou avec les décideurs publics.

La réactivité dont a fait preuve la communauté ne doit pas cacher que l'analyse scientifique en situation de crise nécessite des moyens – notamment humains – hors de proportions avec ceux actuellement alloués aux dispositifs de recherche atmosphérique. La complémentarité avec les réseaux opérationnels ne peut donc aujourd'hui s'exprimer que sur des temps longs qui, souvent, ne sont pas ceux de la demande sociétale d'urgence.

La réponse du monde de la recherche à la demande sociétale dans un contexte de crise brutale comme celle rencontrée au printemps dernier consiste finalement :

- à construire un corpus de connaissances nouvelles fondé sur ce que peut révéler un état perturbé,
- à donner du sens en pleine rigueur scientifique à des observations parfois (trop) rapidement médiatisées,
- à éclairer les choix des décideurs dans la construction de l'après-crise.

## Contributeurs

Le document présent a été synthétisé à partir de contributions (données et/ou éléments d'analyse) fournis par les contributeurs indiqués ci-dessous :

C. Clerbaux (LATMOS)	V. Gros (LSCE)	J-E. Petit (LSCE)
C. Crevoisier (LMD)	M. Haeffelin (IPSL)	S. Sauvage (IMT Lille/Douai)
J-C. Dupont (IPSL)	P. Laj (UGA)	L. Simon (LSCE)
O. Favez (INERIS),	F. Meleux (INERIS)	
G. Forêt (LISA)	A. Pazmino (LATMOS)	

## Glossaire

AASQA	Association agréée de surveillance de la qualité de l'air	IASI	Interféromètre atmosphérique de sondage dans l'infrarouge
ACSM	<i>Aerosol Chemical Speciation Monitor /</i> Spectromètre de masse pour aérosol dédié à la spéciation opérationnelle de la composition chimique de l'aérosol atmosphérique	ICOS	<i>Integrated Carbon Observation System</i>
ACTRIS	<i>Aerosol, Clouds and Trace gases Research InfraStructure</i>	INERIS	Institut national de l'environnement industriel et des risques
ADEME	Agence de la Transition Ecologique	INOE	<i>Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Optoelectronică</i>
BC	<i>Black Carbon /</i> carbone suie	INRAE	Institut national pour la recherche agronomique et l'environnement
BCff	<i>Black carbon fossil fuel /</i> fraction du carbone suie provenant des combustibles fossiles	IR	Infrastructure de recherche
BCwb	<i>Black carbon wood burning /</i> fraction du carbone suie provenant des feux de biomasse	KNMI	Institut royal météorologique des Pays-Bas
CEA	Commissariat à l'Energie Atomique	LATMOS	Laboratoire atmosphères, milieu, observations spatiales (CNRS/Sorbonne Université/Université Versailles Saint Quentin)
CEREA	Centre d'enseignement et de recherche en environnement atmosphérique	LCSQA	Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air
CITEPA	Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique	LISA	Laboratoire interuniversitaire des systèmes atmosphériques (CNRS/Université de Paris/Université Paris Est Créteil)
CNRS	Centre national de la recherche scientifique	LMD	Laboratoire de météorologie dynamique (CNRS/Sorbonne Université /ENS/ Polytechnique)
Copernicus	Programme européen de surveillance de la Terre »	LSCE	Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (CNRS/CEA/Université Versailles Saint Quentin)
COV	Composés organiques volatils	NDAAC	<i>Network for the Detection of Atmospheric Composition Change</i>
EARLINET	<i>European Aerosol Research Lidar Network</i>	OM	<i>Organic Matter</i>
EMEP	Programme concerté de surveillance et d'évaluation du transport à longue distance des polluants atmosphériques en Europe	PTRMS	Spectromètre de masse à ionisation par transfert de proton
ESA	<i>European Space Agency</i>	SIRTA	Site instrumental de recherche par télédétection atmosphérique
f60	Fragment de masse 60 en spectrométrie de masse pour aérosol. Considéré caractéristique du levoglucosan un traceur pour la combustion de biomasse		

## Pour aller plus loin... Bibliographie

En jaune: lien avec la situation française

Putaud, J.-P., Pozzoli, L., Pisoni, E., Martins Dos Santos, S., Lagler, F., Lanzani, G., Dal Santo, U., and Colette, A.: Impacts of the COVID-19 lockdown on air pollution at regional and urban background sites in northern Italy, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/acp-2020-755>, in review, 2020.

Barré, J., Petetin, H., Colette, A., Guevara, M., Peuch, V.-H., Rouil, L., Engelen, R., Inness, A., Flemming, J., Pérez García-Pando, C., Bowdalo, D., Meleux, F., Geels, C., Christensen, J. H., Gauss, M., Benedictow, A., Tsyro, S., Friese, E., Struzewska, J., Kaminski, J. W., Douros, J., Timmermans, R., Robertson, L., Adani, M., Jorba, O., Joly, M., and Kouznetsov, R.: Estimating lockdown induced European NO<sub>2</sub> changes, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/acp-2020-995>, in review, 2020.

Honglei Wang, Qing Miao, Lijuan Shen, Qian Yang, Yezheng Wu, Heng Wei, Yan Yin, Tianliang Zhao, Bin Zhu, Wen Lu, Characterization of the aerosol chemical composition during the COVID-19 lockdown period in Suzhou in the Yangtze River Delta, China (2021) *Journal of Environmental Sciences*, 102, 110-122. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.09.019>.

Min Jae Ju, Jaehyun Oh, Yoon-Hyeong Choi, Changes in air pollution levels after COVID-19 outbreak in Korea (2021) *Science of The Total Environment*, 750, 141521. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141521>.

Ropkins K., Tate J.E., Early observations on the impact of the COVID-19 lockdown on air quality trends across the UK (2021) *Science of The Total Environment*, 754, 142374. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142374>.

Stephen Miles Griffith, Wei-Syun Huang, Chia-Ching Lin, Ying-Chieh Chen, Kuo-En Chang, Tang-Huang Lin, Sheng-Hsiang Wang, Neng-Huei Lin, Long-range air pollution transport in East Asia during the first week of the COVID-19 lockdown in China (2020) *Science of The Total Environment*, 41, 140214. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140214>.

Shelby Zangari, Dustin T. Hill, Amanda T. Charette, Jaime E. Mirowsky, Air quality changes in New York City during the COVID-19 pandemic (2020) *Science of The Total Environment*, 742, 140496. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140496>.

Wyche K.P., Nichols M., Parfitt H., Beckett P., Gregg D.J., Smallbone K.L., Monks P.S. Changes in Ambient Air Quality and Atmospheric Composition and Reactivity in the South East of the UK as a Result of the COVID-19 Lockdown (2020), *Science of the Total Environment*, sous presse, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142526>

Abhijit Chatterjee, Sauryadeep Mukherjee, Monami Dutta, Abhinandan Ghosh, Sanjay K. Ghosh, Arindam Roy, High rise in carbonaceous aerosols under very low anthropogenic emissions over eastern Himalaya, India: Impact of lockdown for COVID-19 outbreak (2020) *Atmospheric Environment*, 117947. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117947>.

Chen F., Wang M., Pu Z. Effects of COVID-19 lockdown on global air quality and health (2020) *Science of The Total Environment*, 142533, in press, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142533>

Zhe Wang, Itsushi Uno, Keiya Yumimoto, Syuichi Itahashi, Xueshun Chen, Wenyi Yang, Zifa Wang, Impacts of COVID-19 lockdown, Spring Festival and meteorology on the NO<sub>2</sub> variations in early 2020 over China based on in-situ observations, satellite retrievals and model simulations (2020), *Atmospheric Environment*, 117972. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117972>.

Briz-Redón, Á., Belenguier-Sapiña, C., Serrano-Aroca, Á. Changes in air pollution during COVID-19 lockdown in Spain: A multi-city study (2021) *Journal of Environmental Sciences (China)*, 101, pp. 16-26. DOI: 10.1016/j.jes.2020.07.029

Hashim, B.M., Al-Naseri, S.K., Al-Maliki, A., Al-Ansari, N. Impact of COVID-19 lockdown on NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> concentrations and assessing air quality changes in Baghdad, Iraq (2021) *Science of the Total Environment*, 754, 141978, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141978

Shen, L., Zhao, T., Wang, H., Liu, J., Bai, Y., Kong, S., Zheng, H., Zhu, Y., Shu, Z. Importance of meteorology in air pollution events during the city lockdown for COVID-19 in Hubei Province, Central China (2021) *Science of the Total Environment*, 754, 142227, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142227

Ghahremanloo, M., Lops, Y., Choi, Y., Mousavinezhad, S. Impact of the COVID-19 outbreak on air pollution levels in East Asia (2021) *Science of the Total Environment*, 754, 142226, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142226

Zhang, Q., Pan, Y., He, Y., Walters, W.W., Ni, Q., Liu, X., Xu, G., Shao, J., Jiang, C. Substantial nitrogen oxides emission reduction from China due to COVID-19 and its impact on surface ozone and aerosol pollution (2021) *Science of the Total Environment*, 753, 142238, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142238

Yuan, Q., Qi, B., Hu, D., Wang, J., Zhang, J., Yang, H., Zhang, S., Liu, L., Xu, L., Li, W. Spatiotemporal variations and reduction of air pollutants during the COVID-19 pandemic in a megacity of Yangtze River Delta in China (2021) *Science of the Total Environment*, 751, 141820, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141820

Mor, S., Kumar, S., Singh, T., Dogra, S., Pandey, V., Ravindra, K. Impact of COVID-19 lockdown on air quality in Chandigarh, India: Understanding the emission sources during controlled anthropogenic activities (2021) *Chemosphere*, 263, 127978, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127978

Liu, Q., Harris, J.T., Chiu, L.S., Sun, D., Houser, P.R., Yu, M., Duffy, D.Q., Little, M.M., Yang, C. Spatiotemporal impacts of COVID-19 on air pollution in California, USA (2021) *Science of the Total Environment*, 750, 141592, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141592

Martorell-Marugán, J., Villatoro-García, J.A., García-Moreno, A., López-Domínguez, R., Requena, F., Merelo, J.J., Lacasaña, M., de Dios Luna, J., Díaz-Mochón, J.J., Lorente, J.A., Carmona-Sáez, P. DatAC: A visual analytics platform to explore climate and air quality indicators associated with the COVID-19 pandemic in Spain (2021) *Science of the Total Environment*, 750, 141424, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141424

Wu, Q., Tang, Y., Wang, L., Wang, S., Han, D., Ouyang, D., Jiang, Y., Xu, P., Xue, Z., Hu, J.

Impact of emission reductions and meteorology changes on atmospheric mercury concentrations during the COVID-19 lockdown (2021) *Science of the Total Environment*, 750, 142323, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142323

Srivastava, A. COVID-19 and air pollution and meteorology-an intricate relationship: A review (2021) *Chemosphere*, 263, 128297, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.128297

Mendez-Espinosa, J.F., Rojas, N.Y., Vargas, J., Pachón, J.E., Belalcazar, L.C., Ramírez, O. Air quality variations in Northern South America during the COVID-19 lockdown (2020) *Science of the Total Environment*, 749, 141621, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141621

Chen, Y., Zhang, S., Peng, C., Shi, G., Tian, M., Huang, R.-J., Guo, D., Wang, H., Yao, X., Yang, F. Impact of the COVID-19 pandemic and control measures on air quality and aerosol light absorption in Southwestern China (2020) *Science of the Total Environment*, 749, 141419, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141419

Sharifi, A., Khavarian-Garmsir, A.R. The COVID-19 pandemic: Impacts on cities and major lessons for urban planning, design, and management (2020) *Science of the Total Environment*, 749, 142391, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142391

Ordóñez, C., Garrido-Perez, J.M., García-Herrera, R. Early spring near-surface ozone in Europe during the COVID-19 shutdown: Meteorological effects outweigh emission changes (2020) *Science of the Total Environment*, 747, 141322, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141322

Gualtieri, G., Brilli, L., Carotenuto, F., Vagnoli, C., Zaldei, A., Gioli, B. Quantifying road traffic impact on air quality in urban areas: A Covid19-induced lockdown analysis in Italy (2020) *Environmental Pollution*, 267, 115682, DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115682

Patel, H., Talbot, N., Salmond, J., Dirks, K., Xie, S., Davy, P. Implications for air quality management of changes in air quality during lockdown in Auckland (New Zealand) in response to the 2020 SARS-CoV-2 epidemic (2020) *Science of the Total Environment*, 746, 141129, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141129

Stratoulas, D., Nuthammachot, N. Air quality development during the COVID-19 pandemic over a medium-sized urban area in Thailand (2020) *Science of the Total Environment*, 746, 141320, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141320

Dhaka, S.K., Chetna, Kumar, V., Panwar, V., Dimri, A.P., Singh, N., Patra, P.K., Matsumi, Y., Takigawa, M., Nakayama, T., Yamaji, K., Kajino, M., Misra, P., Hayashida, S. PM<sub>2.5</sub> diminution and haze events over Delhi during the COVID-19 lockdown period: an interplay between the baseline pollution and meteorology (2020) *Scientific Reports*, 10 (1), art. 13442, DOI: 10.1038/s41598-020-70179-8

Pacheco, H., Díaz-López, S., Jarre, E., Pacheco, H., Méndez, W., Zamora-Ledezma, E. NO<sub>2</sub> levels after the COVID-19 lockdown in Ecuador: A trade-off between environment and human health (2020) *Urban Climate*, 34, 100674, DOI: 10.1016/j.uclim.2020.100674

Lovarelli, D., Conti, C., Finzi, A., Bacenetti, J., Guarino, M. Describing the trend of ammonia, particulate matter and nitrogen oxides: The role of livestock activities in northern Italy during Covid-19 quarantine (2020) *Environmental Research*, 191, 110048, DOI: 10.1016/j.envres.2020.110048

Beig, G., Bano, S., Sahu, S.K., Anand, V., Korhale, N., Rathod, A., Yadav, R., Mangaraj, P., Murthy, B.S., Singh, S., Latha, R., Shinde, R. COVID-19 and environmental -weather markers: Unfolding baseline levels and veracity of linkages in tropical India (2020) *Environmental Research*, 191, 110121, DOI: 10.1016/j.envres.2020.110121

Chen, L.-W.A., Chien, L.-C., Li, Y., Lin, G. Nonuniform impacts of COVID-19 lockdown on air quality over the United States (2020) *Science of the Total Environment*, 745, 141105, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141105

Kumar, S. Effect of meteorological parameters on spread of COVID-19 in India and air quality during lockdown (2020) *Science of the Total Environment*, 745, 141021, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141021

Liu, Y., Ni, S., Jiang, T., Xing, S., Zhang, Y., Bao, X., Feng, Z., Fan, X., Zhang, L., Feng, H. Influence of Chinese New Year overlapping COVID-19 lockdown on HONO sources in Shijiazhuang (2020) *Science of the Total Environment*, 745, 141025, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141025

Ranjan, A.K., Patra, A.K., Gorai, A.K. Effect of lockdown due to SARS COVID-19 on aerosol optical depth (AOD) over urban and mining regions in India (2020) *Science of the Total Environment*, 745, 141024, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141024

Huang, G., Sun, K. Non-negligible impacts of clean air regulations on the reduction of tropospheric NO<sub>2</sub> over East China during the COVID-19 pandemic observed by OMI and TROPOMI (2020) *Science of the Total Environment*, 745, 141023, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141023

Al Huraimel, K., Alhosani, M., Kunhabdulla, S., Stietiya, M.H. SARS-CoV-2 in the environment: Modes of transmission, early detection and potential role of pollutions (2020) *Science of the Total Environment*, 744, 140946, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140946

Pei, Z., Han, G., Ma, X., Su, H., Gong, W. Response of major air pollutants to COVID-19 lockdowns in China (2020) *Science of the Total Environment*, 743, 140879, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140879

Lian, X., Huang, J., Huang, R., Liu, C., Wang, L., Zhang, T. Impact of city lockdown on the air quality of COVID-19-hit of Wuhan city (2020) *Science of the Total Environment*, 742, 140556, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140556

Hudda, N., Simon, M.C., Patton, A.P., Durant, J.L. Reductions in traffic-related black carbon and ultrafine particle number concentrations in an urban neighborhood during the COVID-19 pandemic (2020) *Science of the Total Environment*, 742, 140931, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140931

Menut, L., Bessagnet, B., Siour, G., Mailler, S., Pennel, R., Cholakian, A. Impact of lockdown measures to combat Covid-19 on air quality over western Europe (2020) *Science of the Total Environment*, 741, 140426, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140426

Baldasano, J.M. COVID-19 lockdown effects on air quality by NO<sub>2</sub> in the cities of Barcelona and Madrid (Spain) (2020) *Science of the Total Environment*, 741, art. 140353, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140353

Singh, V., Singh, S., Biswal, A., Kesarkar, A.P., Mor, S., Ravindra, K. Diurnal and temporal changes in air pollution during COVID-19 strict lockdown over different regions of India (2020) *Environmental Pollution*, 266, 115368, DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115368

Kumar, P., Hama, S., Omidvarborna, H., Sharma, A., Sahani, J., Abhijith, K.V., Debele, S.E., Zavala-Reyes, J.C., Barwise, Y., Tiwari, A. Temporary reduction in fine particulate matter due to 'anthropogenic emissions switch-off' during COVID-19 lockdown in Indian cities (2020) *Sustainable Cities and Society*, 62, 102382, DOI: 10.1016/j.scs.2020.102382

Aman, M.A., Salman, M.S., Yunus, A.P. COVID-19 and its impact on environment: Improved pollution levels during the lockdown period – A case from Ahmedabad, India (2020) *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20, 100382, DOI: 10.1016/j.rsase.2020.100382

Rodríguez-Urrego, D., Rodríguez-Urrego, L. Air quality during the COVID-19: PM<sub>2.5</sub> analysis in the 50 most polluted capital cities in the world (2020) *Environmental Pollution*, 266, 115042, DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115042

- Sarfraz, M., Shehzad, K., Shah, S.G.M. The impact of COVID-19 as a necessary evil on air pollution in India during the lockdown (2020) *Environmental Pollution*, 266, 115080, DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115080
- Cameletti, M. The Effect of Corona Virus Lockdown on Air Pollution: Evidence from the City of Brescia in Lombardia Region (Italy) (2020) *Atmospheric Environment*, 239, 117794, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2020.117794
- Zheng, H., Kong, S., Chen, N., Yan, Y., Liu, D., Zhu, B., Xu, K., Cao, W., Ding, Q., Lan, B., Zhang, Z., Zheng, M., Fan, Z., Cheng, Y., Zheng, S., Yao, L., Bai, Y., Zhao, T., Qi, S. Significant changes in the chemical compositions and sources of PM<sub>2.5</sub> in Wuhan since the city lockdown as COVID-19 (2020) *Science of the Total Environment*, 739, 140000, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140000
- Bedi, J.S., Dhaka, P., Vijay, D., Aulakh, R.S., Gill, J.P.S. Assessment of air quality changes in the four metropolitan cities of India during COVID-19 pandemic lockdown (2020) *Aerosol and Air Quality Research*, 20 (10), pp. 2062-2070. DOI: 10.4209/aaqr.2020.05.0209
- Selvam, S., Muthukumar, P., Venkatramanan, S., Roy, P.D., Manikanda Bharath, K., Jesuraja, K. SARS-CoV-2 pandemic lockdown: Effects on air quality in the industrialized Gujarat state of India (2020) *Science of the Total Environment*, 737, 140391, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140391
- Sharma, M., Jain, S., Lamba, B.Y. Epigrammatic study on the effect of lockdown amid Covid-19 pandemic on air quality of most polluted cities of Rajasthan (India) (2020) *Air Quality, Atmosphere and Health*, 13 (10), pp. 1157-1165. DOI: 10.1007/s11869-020-00879-7
- Agarwal, A., Kaushik, A., Kumar, S., Mishra, R.K. Comparative study on air quality status in Indian and Chinese cities before and during the COVID-19 lockdown period (2020) *Air Quality, Atmosphere and Health*, 13 (10), pp. 1167-1178. DOI: 10.1007/s11869-020-00881-z
- Siciliano, B., Dantas, G., da Silva, C.M., Arbilla, G. Increased ozone levels during the COVID-19 lockdown: Analysis for the city of Rio de Janeiro, Brazil (2020) *Science of the Total Environment*, 737, 139765, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139765
- Ash'aari, Z.H., Aris, A.Z., Ezani, E., Kamal, N.I.A., Jaafar, N., Jahaya, J.N., Manan, S.A., Saifuddin, M.F.U. Spatiotemporal variations and contributing factors of air pollutant concentrations in Malaysia during movement control order due to pandemic COVID-19 (2020) *Aerosol and Air Quality Research*, 20 (10), pp. 2047-2061. DOI: 10.4209/aaqr.2020.06.0334
- Naeger, A.R., Murphy, K. Impact of COVID-19 containment measures on air pollution in California (2020) *Aerosol and Air Quality Research*, 20 (10), pp. 2025-2034. DOI: 10.4209/aaqr.2020.05.0227
- Kanniah, K.D., Kamarul Zaman, N.A.F., Kaskaoutis, D.G., Latif, M.T. COVID-19's impact on the atmospheric environment in the Southeast Asia region (2020) *Science of the Total Environment*, 736, 139658, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139658
- Otmani, A., Benchrif, A., Tahri, M., Bounakhla, M., Chakir, E.M., El Bouch, M., Krombi, M. Impact of Covid-19 lockdown on PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> concentrations in Salé City (Morocco) (2020) *Science of the Total Environment*, 735, 139541, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139541
- Sicard, P., De Marco, A., Agathokleous, E., Feng, Z., Xu, X., Paoletti, E., Rodriguez, J.J.D., Calatayud, V. Amplified ozone pollution in cities during the COVID-19 lockdown (2020) *Science of the Total Environment*, 735, 139542, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139542
- Mahato, S., Ghosh, K.G. Short-term exposure to ambient air quality of the most polluted Indian cities due to lockdown amid SARS-CoV-2 (2020) *Environmental Research*, 188, 109835, DOI: 10.1016/j.envres.2020.109835

Wang, L., Li, M., Yu, S., Chen, X., Li, Z., Zhang, Y., Jiang, L., Xia, Y., Li, J., Liu, W., Li, P., Lichtfouse, E., Rosenfeld, D., Seinfeld, J.H. Unexpected rise of ozone in urban and rural areas, and sulfur dioxide in rural areas during the coronavirus city lockdown in Hangzhou, China: implications for air quality (2020) *Environmental Chemistry Letters*, 18 (5), pp. 1713-1723. DOI: 10.1007/s10311-020-01028-3

Biswal, A., Singh, T., Singh, V., Ravindra, K., Mor, S. COVID-19 lockdown and its impact on tropospheric NO<sub>2</sub> concentrations over India using satellite-based data (2020) *Heliyon*, 6 (9), e04764, DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04764

Kotnala, G., Mandal, T.K., Sharma, S.K., Kotnala, R.K. Emergence of Blue Sky Over Delhi Due to Coronavirus Disease (COVID-19) Lockdown Implications (2020) *Aerosol Science and Engineering*, 4 (3), pp. 228-238. DOI: 10.1007/s41810-020-00062-6

Lokhandwala, S., Gautam, P. Indirect impact of COVID-19 on environment: A brief study in Indian context (2020) *Environmental Research*, 188, 109807, DOI: 10.1016/j.envres.2020.109807

Han, B.-S., Park, K., Kwak, K.-H., Park, S.-B., Jin, H.-G., Moon, S., Kim, J.-W., Baik, J.-J. Air quality change in Seoul, South Korea under covid-19 social distancing: Focusing on PM<sub>2.5</sub> (2020) *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17 (17), 6208, pp. 1-12. DOI: 10.3390/ijerph17176208

Somani, M., Srivastava, A.N., Gummadivalli, S.K., Sharma, A. Indirect implications of COVID-19 towards sustainable environment: An investigation in Indian context (2020) *Bioresource Technology Reports*, 11, 100491, DOI: 10.1016/j.biteb.2020.100491

Li, L., Li, Q., Huang, L., Wang, Q., Zhu, A., Xu, J., Liu, Z., Li, H., Shi, L., Li, R., Azari, M., Wang, Y., Zhang, X., Liu, Z., Zhu, Y., Zhang, K., Xue, S., Ooi, M.C.G., Zhang, D., Chan, A. Air quality changes during the COVID-19 lockdown over the Yangtze River Delta Region: An insight into the impact of human activity pattern changes on air pollution variation (2020) *Science of the Total Environment*, 732, 139282, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139282

Collivignarelli, M.C., Abbà, A., Bertanza, G., Pedrazzani, R., Ricciardi, P., Carnevale Miino, M. Lockdown for CoViD-2019 in Milan: What are the effects on air quality? (2020) *Science of the Total Environment*, 732, 139280, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139280

Bao, R., Zhang, A. Does lockdown reduce air pollution? Evidence from 44 cities in northern China (2020) *Science of the Total Environment*, 731, 139052, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139052

Mahato, S., Pal, S., Ghosh, K.G. Effect of lockdown amid COVID-19 pandemic on air quality of the megacity Delhi, India (2020) *Science of the Total Environment*, 730, 139086, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139086

Nakada, L.Y.K., Urban, R.C. COVID-19 pandemic: Impacts on the air quality during the partial lockdown in São Paulo state, Brazil (2020) *Science of the Total Environment*, 730, 139087, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139087

Kerimray, A., Baimatova, N., Ibragimova, O.P., Bukenov, B., Kenessov, B., Plotitsyn, P., Karaca, F. Assessing air quality changes in large cities during COVID-19 lockdowns: The impacts of traffic-free urban conditions in Almaty, Kazakhstan (2020) *Science of the Total Environment*, 730, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139179

Venter, Z.S., Aunan, K., Chowdhury, S., Lelieveld, J. COVID-19 lockdowns cause global air pollution declines (2020) *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117 (32), pp. 18984-18990. DOI: 10.1073/pnas.2006853117

Dantas, G., Siciliano, B., França, B.B., da Silva, C.M., Arbilla, G. The impact of COVID-19 partial lockdown on the air quality of the city of Rio de Janeiro, Brazil (2020) *Science of the Total Environment*, 729, 139085, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139085

Kant, Y., Mitra, D., Chauhan, P. Space-based observations on the impact of COVID-19-induced lockdown on aerosols over India (2020) *Current Science*, 119 (3), pp. 539-544. DOI: 10.18520/cs/v119/i3/539-544

Singh, R.P., Chauhan, A. Impact of lockdown on air quality in India during COVID-19 pandemic (2020) *Air Quality, Atmosphere and Health*, 13 (8), pp. 921-928. DOI: 10.1007/s11869-020-00863-1

Navinya, C., Patidar, G., Phuleria, H.C. Examining effects of the COVID-19 national lockdown on ambient air quality across urban India (2020) *Aerosol and Air Quality Research*, 20 (8), pp. 1759-1771. DOI: 10.4209/aaqr.2020.05.0256

Li, J., Tartarini, F. Changes in air quality during the COVID-19 lockdown in Singapore and associations with human mobility trends (2020) *Aerosol and Air Quality Research*, 20 (8), pp. 1748-1758. DOI: 10.4209/aaqr.2020.06.0303

Broomandi, P., Karaca, F., Nikfal, A., Jahanbakhshi, A., Tamjidi, M., Kim, J.R. Impact of covid-19 event on the air quality in Iran (2020) *Aerosol and Air Quality Research*, 20 (8), pp. 1793-1804. DOI: 10.4209/aaqr.2020.05.0205

Silver, B., He, X., Arnold, S.R., Spracklen, D.V. The impact of COVID-19 control measures on air quality in China (2020) *Environmental Research Letters*, 15 (8), 084021, DOI: 10.1088/1748-9326/aba3a2

Zhang, Z., Arshad, A., Zhang, C., Hussain, S., Li, W. Unprecedented temporary reduction in global air pollution associated with COVID-19 forced confinement: A continental and city scale analysis (2020) *Remote Sensing*, 12 (15), 2420, DOI: 10.3390/RS12152420

Sharma, S., Zhang, M., Anshika, Gao, J., Zhang, H., Kota, S.H. Effect of restricted emissions during COVID-19 on air quality in India (2020) *Science of the Total Environment*, 728, 138878 DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138878

Metya, A., Dagupta, P., Halder, S., Chakraborty, S., Tiwari, Y.K. COVID-19 lockdowns improve air quality in the South-East Asian regions, as seen by the remote sensing satellites (2020) *Aerosol and Air Quality Research*, 20 (8), pp. 1772-1782. DOI: 10.4209/aaqr.2020.05.0240

Zambrano-Monserrate, M.A., Ruano, M.A. Has air quality improved in Ecuador during the COVID-19 pandemic? A parametric analysis (2020) *Air Quality, Atmosphere and Health*, 13 (8), pp. 929-938. DOI: 10.1007/s11869-020-00866-y

Chauhan, A., Singh, R.P. Decline in PM<sub>2.5</sub> concentrations over major cities around the world associated with COVID-19 (2020) *Environmental Research*, 187, 109634, DOI: 10.1016/j.envres.2020.109634

Muhammad, S., Long, X., Salman, M. COVID-19 pandemic and environmental pollution: A blessing in disguise? (2020) *Science of the Total Environment*, 728, 138820, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138820

Tobías, A., Carnerero, C., Reche, C., Massagué, J., Via, M., Minguillón, M.C., Alastuey, A., Querol, X. Changes in air quality during the lockdown in Barcelona (Spain) one month into the SARS-CoV-2 epidemic (2020) *Science of the Total Environment*, 726, 138540, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138540

- Ljubenkov, I., Haddout, S., Priya, K.L., Hoguane, A.M. SARS-CoV-2 epidemic: changes in air quality during the lockdown in Zagreb (Republic of Croatia) (2020) *Toxicological and Environmental Chemistry*, 102 (5-6), pp. 302-303. DOI: 10.1080/02772248.2020.1778703
- Srivastava, S., Kumar, A., Baudh, K., Gautam, A.S., Kumar, S. 21-Day Lockdown in India Dramatically Reduced Air Pollution Indices in Lucknow and New Delhi, India (2020) *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 105 (1), pp. 9-17. DOI: 10.1007/s00128-020-02895-w
- Toscano, D., Murena, F. The effect on air quality of lockdown directives to prevent the spread of SARS-CoV-2 pandemic in Campania Region-Italy: Indications for a sustainable development (2020) *Sustainability*, 12 (14), 5558, DOI: 10.3390/su12145558
- Goswami, M., Puneeth, S., Bhatt, R.C., Nautiyal, S. Breathing fresh: Insights to positive externalities of COVID-19 lockdown in Indian megacities (2020) *Journal of Human Ecology*, 71 (1-3), pp. 81-89. DOI: 10.31901/24566608.2020/71.1-3.3247
- Mesas-Carrascosa, F.-J., Porras, F.P., Triviño-Tarradas, P., García-Ferrer, A., Meroño-Larriva, J.E. Effect of lockdown measures on atmospheric nitrogen dioxide during SARS-CoV-2 in Spain (2020) *Remote Sensing*, 12 (14), 2210, DOI: 10.3390/rs12142210
- Siddiqui, A., Halder, S., Chauhan, P., Kumar, P. COVID-19 Pandemic and City-Level Nitrogen Dioxide (NO<sub>2</sub>) Reduction for Urban Centres of India (2020) *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 48 (7), pp. 999-1006. DOI: 10.1007/s12524-020-01130-7
- Wang, P., Chen, K., Zhu, S., Wang, P., Zhang, H. Severe air pollution events not avoided by reduced anthropogenic activities during COVID-19 outbreak (2020) *Resources, Conservation and Recycling*, 158, 104814, DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104814
- Filonchik, M., Hurynovich, V., Yan, H., Gusev, A., Shpilevskaya, N. Impact assessment of covid-19 on variations of SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO and AOD over east China (2020) *Aerosol and Air Quality Research*, 20 (7), pp. 1530-1540. DOI: 10.4209/aaqr.2020.05.0226
- Nichol, J.E., Bilal, M., Ali, A.M., Qiu, Z. Air pollution scenario over China during COVID-19 (2020) *Remote Sensing*, 12 (13), 2100, DOI: 10.3390/rs12132100
- Cersosimo, A., Serio, C., Masiello, G. TROPOMI NO<sub>2</sub> tropospheric column data: Regridding to 1 km grid-resolution and assessment of their consistency with in situ surface observations (2020) *Remote Sensing*, 12 (14), 2212, DOI: 10.3390/rs12142212
- Shi, X., Brasseur, G.P. The Response in Air Quality to the Reduction of Chinese Economic Activities During the COVID-19 Outbreak (2020) *Geophysical Research Letters*, 47 (11), e2020GL088070, DOI: 10.1029/2020GL088070
- Bauwens, M., Compernelle, S., Stavrou, T., Müller, J.-F., van Gent, J., Eskes, H., Levelt, P.F., van der A, R., Veefkind, J.P., Vlietinck, J., Yu, H., Zehner, C. Impact of Coronavirus Outbreak on NO<sub>2</sub> Pollution Assessed Using TROPOMI and OMI Observations (2020) *Geophysical Research Letters*, 47 (11), 2020GL087978, DOI: 10.1029/2020GL087978
- Jia, C., Fu, X., Bartelli, D., Smith, L. Insignificant impact of the "stay-at-home" order on ambient air quality in the Memphis Metropolitan Area, U.S.A. (2020) *Atmosphere*, 11 (6), 630, DOI: 10.3390/atmos11060630
- Ma, C.-J., Kang, G.-U. Air quality variation in Wuhan, Daegu, and Tokyo during the explosive outbreak of covid-19 and its health effects (2020) *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17 (11), 4119, pp. 1-14. DOI: 10.3390/ijerph17114119

Kumari, P., Toshniwal, D. Impact of lockdown measures during COVID-19 on air quality– A case study of India (2020) *International Journal of Environmental Health Research*, DOI: 10.1080/09603123.2020.1778646

Resmi, C.T., Nishanth, T., Satheesh Kumar, M.K., Manoj, M.G., Balachandramohan, M., Valsaraj, K.T. Air quality improvement during triple-lockdown in the coastal city of Kannur, Kerala to combat Covid-19 transmission (2020) *PeerJ*, 8, 9642, DOI: 10.7717/peerj.9642

Anil, I., Alagha, O. The impact of COVID-19 lockdown on the air quality of Eastern Province, Saudi Arabia (2020) *Air Quality, Atmosphere and Health*, DOI: 10.1007/s11869-020-00918-3

Islam, M.S., Tusher, T.R., Roy, S., Rahman, M. Impacts of nationwide lockdown due to COVID-19 outbreak on air quality in Bangladesh: a spatiotemporal analysis (2020) *Air Quality, Atmosphere and Health*, DOI: 10.1007/s11869-020-00940-5

Pasic, M., Bijelonja, I., Pasic, M. Air quality during SARS-CoV-2 (COVID-19) lockdown in Sarajevo (2020) *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 8 (2), pp. 884-892. DOI: 10.21533/pen.v8i2.1327.g572

Sarkar, M., Das, A., Mukhopadhyay, S. Assessing the immediate impact of COVID-19 lockdown on the air quality of Kolkata and Howrah, West Bengal, India (2020) *Environment, Development and Sustainability*, DOI: 10.1007/s10668-020-00985-7

Jain, S., Sharma, T. Social and travel lockdown impact considering coronavirus disease (Covid-19) on air quality in megacities of india: Present benefits, future challenges and way forward (2020) *Aerosol and Air Quality Research*, 20 (6), pp. 1222-1236. DOI: 10.4209/aaqr.2020.04.0171

Garg, A., Kumar, A., Gupta, N.C. Impact of Lockdown on Ambient Air Quality in COVID-19 Affected Hotspot Cities of India: Need to Readdress Air Pollution Mitigation Policies (2020) *Environmental Claims Journal*, DOI: 10.1080/10406026.2020.1822615

Shakoor, A., Chen, X., Farooq, T.H., Shahzad, U., Ashraf, F., Rehman, A., Sahar, N., Yan, W. Fluctuations in environmental pollutants and air quality during the lockdown in the USA and China: two sides of COVID-19 pandemic (2020) *Air Quality, Atmosphere and Health*, DOI: 10.1007/s11869-020-00888-6

Bera, B., Bhattacharjee, S., Shit, P.K., Sengupta, N., Saha, S. Significant impacts of COVID-19 lockdown on urban air pollution in Kolkata (India) and amelioration of environmental health (2020) *Environment, Development and Sustainability*, DOI: 10.1007/s10668-020-00898-5

Karuppasamy, M.B., Seshachalam, S., Natesan, U., Ayyamperumal, R., Karuppanan, S., Gopalakrishnan, G., Nazir, N. Air pollution improvement and mortality rate during COVID-19 pandemic in India: global intersectional study (2020) *Air Quality, Atmosphere and Health*, DOI: 10.1007/s11869-020-00892-w

Gautam, A.S., Dilwaliya, N.K., Srivastava, A., Kumar, S., Baudh, K., Siingh, D., Shah, M.A., Singh, K., Gautam, S. Temporary reduction in air pollution due to anthropogenic activity switch-off during COVID-19 lockdown in northern parts of India (2020) *Environment, Development and Sustainability*, DOI: 10.1007/s10668-020-00994-6

He, G., Pan, Y., Tanaka, T. The short-term impacts of COVID-19 lockdown on urban air pollution in China (2020) *Nature Sustainability*, DOI: 10.1038/s41893-020-0581-y

Higham, J.E., Ramírez, C.A., Green, M.A., Morse, A.P. UK COVID-19 lockdown: 100 days of air pollution reduction? (2020) *Air Quality, Atmosphere and Health*, DOI: 10.1007/s11869-020-00937-0

Panda, S., Mallik, C., Nath, J., Das, T., Ramasamy, B. A study on variation of atmospheric pollutants over Bhubaneswar during imposition of nationwide lockdown in India for the COVID-19 pandemic (2020) *Air Quality, Atmosphere and Health*, DOI: 10.1007/s11869-020-00916-5

Pervaiz, S., Javid, K., Khan, F.Z., Zahid, Y., Akram, M.A.N. Preliminary assessment of air during covid-19 lockdown: An unintended benefit to environment (2020) *Environment and Natural Resources Journal*, 18 (4), pp. 363-375. DOI: 10.32526/ennrj.18.4.2020.35

Nadzir, M.S.M., Ooi, M.C.G., Alhasa, K.M., Bakar, M.A.A., Mohtar, A.A.A., Nor, M.F.F.M., Latif, M.T., Hamid, H.H.A., Ali, S.H.M., Ariff, N.M., Anuar, J., Ahamad, F., Azhari, A., Hanif, N.M., Subhi, M.A., Othman, M., Nor, M.Z.M. The impact of movement control order (MCO) during pandemic COVID-19 on local air quality in an urban area of Klang valley, Malaysia (2020) *Aerosol and Air Quality Research*, 20 (6), pp. 1237-1248. DOI: 10.4209/aaqr.2020.04.0163

Fuwape, I.A., Okpalaonwuka, C.T., Ogunjo, S.T. Impact of COVID -19 pandemic lockdown on distribution of inorganic pollutants in selected cities of Nigeria (2020) *Air Quality, Atmosphere and Health*, DOI: 10.1007/s11869-020-00921-8

Cazorla, M., Herrera, E., Palomeque, E., Saud, N. What the COVID-19 lockdown revealed about photochemistry and ozone production in Quito, Ecuador (2020) *Atmospheric Pollution Research*. DOI: 10.1016/j.apr.2020.08.028