

# Mesure des polluants depuis l'espace

Par Carole DENIEL  
CNES  
et Camille VIATTE  
LATMOS/CNRS

Les techniques instrumentales dédiées à la mesure depuis l'espace des gaz atmosphériques n'ont cessé de se perfectionner et permettent aujourd'hui de sonder les plus basses couches de la troposphère et de contribuer au suivi de la qualité de l'air. Pour la détermination de la composition atmosphérique, les outils spatiaux se présentent essentiellement sous la forme de spectromètres à haute résolution spectrale dans le domaine allant de l'infrarouge thermique jusque dans l'ultraviolet. Combinés aux mesures obtenues depuis le sol et à des modèles atmosphériques, les observations spatiales sont désormais incontournables : elles sont utilisées dans la plupart des études scientifiques et dans de nombreuses applications atmosphériques pour améliorer nos connaissances des processus physico-chimiques de l'échelle globale à l'échelle locale. L'exemple de la cartographie mondiale des concentrations d'ammoniac obtenue pour la première fois depuis l'espace par l'instrument IASI montre la sous-estimation majeure des cadastres des émissions. Avec le programme européen Copernicus, nous pourrions compter sur de nouveaux services pour assurer la gestion des crises environnementales.

## Introduction

L'atmosphère terrestre est un système à la fois complexe, qui est défini, en particulier, par sa composition chimique qui n'a cessé d'évoluer depuis 4,6 milliards d'années, et fragile, car il résulte d'un équilibre altérable de ses sous-systèmes en interaction à différentes échelles de temps et d'espace. Depuis l'ère industrielle, et l'accroissement concomitant de la population mondiale, les émissions anthropiques de gaz traces se sont accrues et ont accentué les changements physico-chimiques de notre atmosphère de façon non naturelle.

Dans ce contexte, les observations de la composition atmosphérique sont actuellement indispensables, non seulement pour la quantification des concentrations des constituants, mais également par leur utilisation dans des modèles atmosphériques afin de comprendre les mécanismes impliqués dans ces phénomènes et prédire leurs évolutions spatio-temporelles. Pourtant, c'est seulement depuis les années 1990 que les programmes d'observation par satellite fournissent une vision globale des basses couches de l'atmosphère, en permettant de suivre l'évolution spatiale et temporelle des gaz et des particules qui sont impliqués dans le phénomène de pollution.

## L'apport de l'observation satellitaire pour l'étude de la pollution atmosphérique

Les mesures de la composition atmosphérique par satellite n'ont cessé de s'améliorer : d'abord globales et qualitatives, elles permettaient de cartographier le transport de quelques polluants sur de longues distances. Dès 1978, des instruments spatiaux, tels que les TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer), permettent de bien caractériser la formation du trou dans la couche d'ozone, ce qui a conforté la mise en place de protocoles internationaux d'interdiction des chlorofluorocarbones en cause. Avec l'amélioration des techniques de mesure et des algorithmes de restitution des concentrations, il est possible à l'heure actuelle de fournir des informations quantitatives sur les concentrations d'une multitude d'espèces à des échelles régionales, voire locales, et avec une résolution verticale de plus en plus fine (allant de la colonne totale au profil de concentrations).

La complémentarité des mesures multiplateformes, à bord de satellites ou *in situ* à partir du sol, permet une meilleure observation de la composition chimique de l'atmosphère. Les mesures *in situ* présentent l'avantage de fournir des données plus précises de la composition atmosphérique de manière très localisée, tandis que les mesures satellite apportent une meilleure couverture spatiale, fournissant

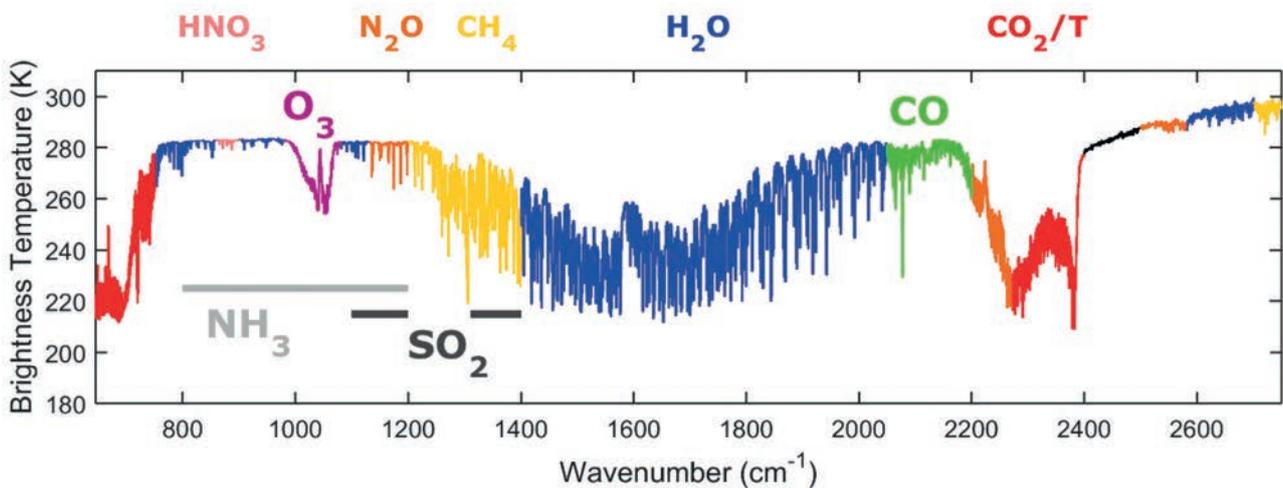


Figure 1 : Exemple de spectre IASI contenant les signatures de différents gaz impliqués dans les phénomènes de pollution atmosphérique.

des informations sur le transport des panaches de pollution. De plus, les observations satellitaires renseignent sur la composition atmosphérique dans des régions isolées et très peu couvertes par des réseaux de mesure au sol. Ces observations satellitaires sont donc importantes et servent notamment à contraindre les inventaires d'émissions, valider nos connaissances sur les processus physico-chimiques de l'atmosphère en les comparant aux simulations des modèles, et à améliorer la prévision et le suivi des pics de pollution par une assimilation dans les modèles dédiés.

Pour observer les constituants atmosphériques, les instruments spatiaux passifs mesurent les spectres atmosphériques résultant de l'interaction entre le rayonnement (solaire ou émis par la Terre ou l'atmosphère) et les molécules. L'exploitation de ces signaux contenant les signatures des différentes molécules permet de restituer les concentrations de gaz en colonne totale ou en profil. En effet, l'ensemble des raies d'absorption moléculaires qui constituent un spectre sont autant d'empreintes digitales caractéristiques de chaque molécule : la position indique l'identité de la molécule, et la longueur renseigne sur la concentration de ce gaz dans l'atmosphère. Pour cela, il est nécessaire de disposer des caractéristiques de l'instrument (détecteur, optique, etc.), de données spectroscopiques faites en laboratoires, de données auxiliaires issues de modèles et de modélisation du transfert radiatif de l'atmosphère.

### L'instrument TROPOMI

En octobre 2017, l'ESA (Agence spatiale européenne) a mis en orbite basse (824 km d'altitude) l'instrument TROPOMI (ou Sentinelle5 précurseur), qui dispose de bandes spectrales ultraviolettes et visibles (UV-Vis – 270-500 nm), proches infrarouges (675-775 nm) et infrarouges (2 305-2 385 nm). Cela permet d'acquérir un large éventail de polluants troposphériques, tels que le dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ), l'ozone ( $\text{O}_3$ ), le formaldéhyde (HCHO), le dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ), le méthane et le monoxyde de carbone, avec une précision et une résolution spatiale ( $3,5 \times 7 \text{ km}^2$ )

jamais égalées depuis l'espace (<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p>). Ce spectromètre imageur multi-spectral a été développé conjointement par l'ESA et le Bureau spatial néerlandais dans le cadre du programme opérationnel de surveillance de l'environnement européen Copernicus. Il devrait être suivi à partir de 2021 d'instruments similaires placés en orbite basse (Sentinelle5) ou en géostationnaire (Sentinelle4).

### Les instruments IASI

Sur l'autre partie du spectre, le domaine de l'infrarouge thermique (TIR), l'instrument IASI (interféromètre atmosphérique de sondage dans l'infrarouge) permet de compléter le paysage avec des mesures complémentaires de polluants (en gaz, échantillonnage temporel ou vertical, etc.) (voir : <https://iasi.cnes.fr/fr/iasi/en-resume/accueil>). Ce spectromètre infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), développé conjointement par le CNES (Centre national d'études spatiales) et EUMETSAT (European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites), est conçu pour délivrer des données météorologiques (profils de température et de pression) pour l'amélioration des prévisions du temps. Les grandes performances de cet instrument sur plus de huit mille canaux (voir la Figure 1 ci-dessus) lui ont très vite permis de s'imposer également dans le domaine de la recherche sur les processus de pollution dans la troposphère et la basse stratosphère, avec plus de vingt-cinq molécules détectées dans ses spectres.

Trois instruments IASI identiques ont été construits et lancés successivement : MetOp-A, le 19 octobre 2006 ; MetOp-B, le 17 septembre 2012 ; et MetOp-C, le 7 novembre 2018. Chaque instrument acquiert plus de 1,2 million de spectres, soit 15 GB de données par jour et par satellite. Toutes ces mesures sont analysées et distribuées en quasi-temps réel, ce qui permet d'accéder aux concentrations de gaz partout dans le monde dès le lendemain de la mesure.

IASI est la première mission spatiale qui constitue depuis plus de douze ans un système pérenne d'observation de la composition atmosphérique. Grâce au lancement prévu

de son successeur IASI-NG (IASI-Nouvelle génération) qui présente des caractéristiques instrumentales différentes (une résolution spectrale améliorée d'un facteur 2 et un meilleur rapport signal/bruit), la mission satellitaire IASI sera la première et la seule à fournir sur plus de quarante ans des données homogènes pour une série de gaz clés impliqués dans les phénomènes de pollution.

## Études de la pollution grâce aux mesures spatiales

Grâce à la complémentarité des observations faites dans l'infrarouge et dans l'ultra-violet, la communauté des utilisateurs dispose d'informations précieuses pour mener à bien ses recherches sur les processus de pollution, et ce de façon cohérente sur l'ensemble du globe.

Ainsi, les analyses comparatives des données d'O<sub>3</sub> (obtenues avec IASI dans le TIR) et de NO<sub>2</sub> (issues de spectromètres GOME 2 dans l'UV-Vis) ont permis de mieux comprendre la part des intrusions stratosphériques et des émissions anthropiques dans les épisodes de pollution dans plus de neuf villes de l'hémisphère Nord. Ces données ont également permis d'étudier l'impact de la mousson dans les villes d'Asie (Safieddine *et al.*, JGR 2013). Ces mesures satellitaires ont pu également détecter la réduction des émissions de polluants dans la région de Beijing lors des Jeux olympiques de 2008 par rapport à la même période estivale des trois années suivantes.

De plus, une étude récente (Cuesta *et al.*, 2018) a montré que les observations spatiales ont permis à elles seules de mettre en évidence la production photochimique d'ozone en Asie en dessous de 3 km d'altitude et l'impact du transport transfrontalier (voir la Figure 2 ci-après).

En 2018, les mesures de IASI ont permis une découverte assez inattendue en pointant un désaccord sur le nombre et l'intensité des sources ponctuelles d'émissions d'ammoniac répertoriées par les inventaires.

## Observations d'ammoniac et lien avec les pics de particules – Étude de cas en Île-de-France

L'ammoniac (NH<sub>3</sub>) est un polluant considéré comme étant la principale source d'azote réactif dans l'atmosphère, dont les émissions sont au moins quatre fois plus élevées que lors de la période préindustrielle (Fowler *et al.*, 2013), ce qui crée une multitude de dommages environnementaux (Röckstrom *et al.*, 2009). Il est également un précurseur de nitrate et de sulfate d'ammonium qui composent la partie volatile des particules en suspension, connues pour leurs effets nocifs sur la santé humaine (Pope III *et al.*, 2009) et le climat (Myhre *et al.*, 2013). Par rapport aux polluants primaires, comme le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) ou les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), la plupart des pays du monde n'ont mis en place aucune mesure de réduction des émissions de NH<sub>3</sub>, et ce malgré l'importance de ce gaz dans la formation des particules secondaires, la dégradation de la visibilité et/ou les phénomènes d'acidification et d'eutrophisation.

Nos connaissances concernant 1) les sources et la distribution spatio-temporelle de NH<sub>3</sub> à l'échelle régionale et 2) l'implication de ce gaz dans la formation de PM<sub>2,5</sub> sont ainsi très limitées, notamment parce qu'il y a très peu de mesures systématiques et les cadastres des émissions sont peu précis.

Les mesures de la concentration ambiante de NH<sub>3</sub> dans l'air sont éparpillées et difficiles à réaliser étant donné la nature collante, volatile et réactive de cette molécule, conduisant à des artefacts dans les mesures *in situ* (von Bobrutski *et al.*, 2010). Très récemment, les mesures satellitaires de IASI ont permis de cartographier pour la première fois la répartition des concentrations de NH<sub>3</sub> au kilomètre près (Van Damme, 2018). Plus de deux cents sources locales de NH<sub>3</sub> ont été identifiées à travers le monde et l'étude a montré que les émissions provenant de sources connues sont très largement sous-estimées par les inventaires des émissions.

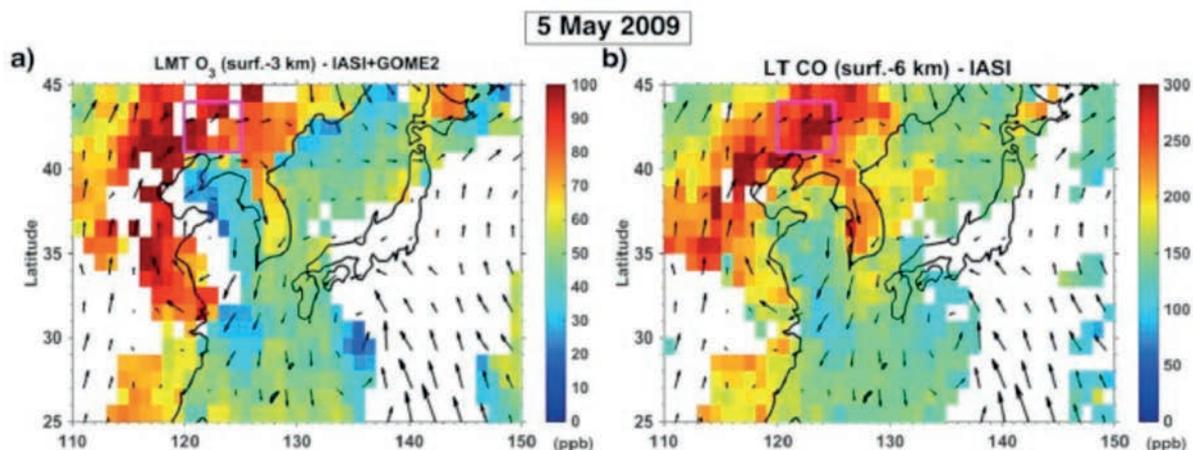


Figure 2 : Répartition en Asie a) de la colonne partielle (0-3 km) d'ozone et b) de la colonne partielle (0-6 km) de CO, avec superposition des vecteurs de vents moyens correspondants (Cuesta *et al.*, 2018).

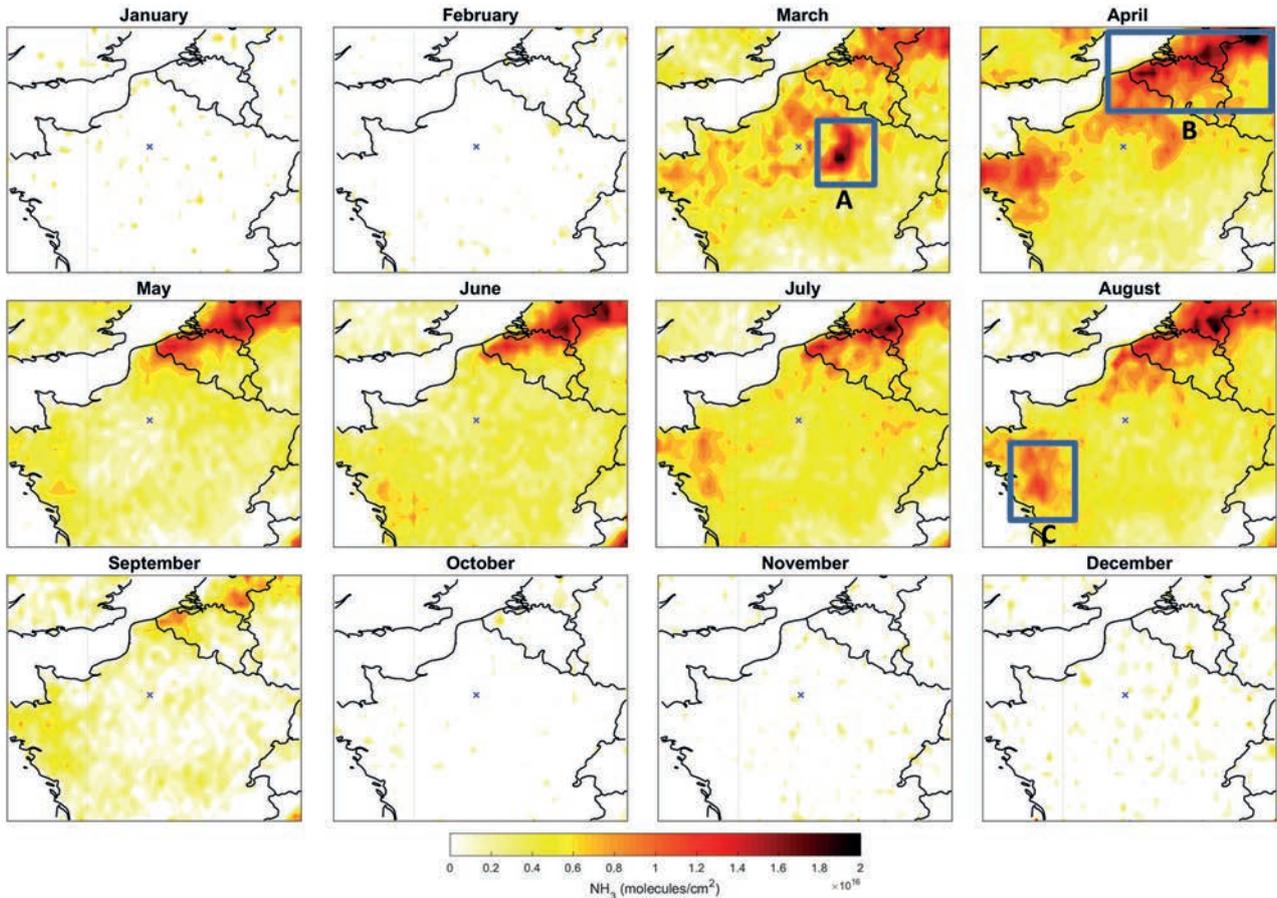


Figure 3 : Variabilité saisonnière de  $\text{NH}_3$  établie à partir de dix années de mesures IASI. La croix représente Paris (Viatte *et al.*, 2019).

En France, le  $\text{NH}_3$  est majoritairement émis par l'agriculture (98 %, dont 64 % provient de la déjection animale et 34 % de l'épandage d'engrais azoté sur les cultures (CITEPA, 2018)). Au printemps, lors de l'épandage d'engrais sur les cultures avoisinantes, Paris (qui est la ville la plus peuplée de l'Union européenne avec 10,5 millions d'habitants) connaît de nombreux épisodes de pollution aux particules causant près de 2 000 morts par an (Corso *et al.*, 2016). Étant donné le rôle important que joue le  $\text{NH}_3$  dans les problèmes environnementaux et de santé publique, ses émissions sont réglementées en France et doivent être réduites en 2030 de 13 % par rapport à 2005 (CEIP, 2016). Cependant, les émissions de  $\text{NH}_3$  vont croître dans le futur sous l'effet de l'augmentation de la demande alimentaire (Van Vuuren *et al.*, 2011) et le changement climatique (Sutton *et al.*, 2013).

Il n'existe à l'heure actuelle aucune mesure continue et à haute résolution du  $\text{NH}_3$ , même si des développements sur les réseaux de surveillance sont en cours. À Paris, les observations des émissions de  $\text{NH}_3$  à haute résolution temporelle n'existent que sur des campagnes de mesures ponctuelles. Grâce à sa couverture globale, IASI fournit des informations très pertinentes concernant les sources des émissions et le transport de panaches d'ammoniac dans l'atmosphère avec une résolution spatiale allant de 12 à 40 km (en fonction de la taille du pixel au sol) et une résolution temporelle limitée (deux mesures par jour, au

mieux). La Figure 3 ci-dessus montre la très grande variabilité saisonnière des trois principales sources de  $\text{NH}_3$  pouvant être transporté jusqu'à l'agglomération parisienne et affecter localement la qualité de l'air (Viatte *et al.*, 2019).

Pour compléter ces observations satellitaires, qui nous renseignent sur les conditions atmosphériques à l'échelle régionale, le LATMOS est en charge d'installer en 2019 un dispositif instrumental fiable (c'est-à-dire un mini-DOAS : mini Differential Optical Absorption Spectroscopy) au centre de Paris, devant permettre la détection en continu, précise et à haute résolution temporelle de l'ammoniac. L'instrument mini-DOAS basé sur la technique de spectroscopie d'absorption dans le domaine de l'ultraviolet fournit des données précises et stables en gardant un temps d'analyse très faible (<1 minute) (Volten *et al.*, 2012). Cette technique de mesure à trajet ouvert délivre les résultats les plus satisfaisants pour déterminer les concentrations de  $\text{NH}_3$  dans l'air ambiant (Dammers *et al.*, 2017). Ces mesures de surface par mini-DOAS seront couplées aux observations satellitaires IASI et aux données de la plateforme QUALAIR (hauteur de la couche limite par mesures LIDAR et paramètres météorologiques avec les mesures de la station météorologique, voir la Figure 4 de la page suivante) pour en déduire les sources d'émissions et comprendre leurs liens avec les épisodes de pollution particulière en Île-de-France. Les résultats attendus permettront de repousser les limites actuelles de détection

de cette molécule et, grâce au couplage avec les observations multimodales, d'améliorer nos connaissances sur l'évolution spatio-temporelle de l'ammoniac, ainsi que son rôle dans la formation de particules dangereuses pour la santé humaine.



D.R.

Figure 4 : Emplacement du mini-DOAS au sein de la plateforme QUALAIR.

## Conclusion

Avec l'avancée des technologies spatiales et du numérique, il est désormais possible de se doter de systèmes précis de surveillance globale de l'atmosphère pour ainsi mieux comprendre et prévoir les phénomènes de pollution. Avec l'arrivée des services Copernicus en Europe, l'utilisation des données spatiales en synergie avec des données sol et des modèles ne sera plus limitée à la recherche scientifique. En effet, elle va permettre des applications opérationnelles dédiées au suivi de la composition atmosphérique sur l'ensemble du globe. C'est l'objectif du service CAMS (Copernicus Atmospheric Monitoring Service) piloté par le Centre européen de prévision du temps (ECMWF) (voir : <https://atmosphere.copernicus.eu/>).

Pour cela, les données spatiales devront (si possible) répondre aux exigences opérationnelles requises par le système d'analyse et de prévision météorologiques (stabilité dans le temps, redondance, données disponibles en quasi-temps réel...). Les deux prochaines familles de sentinelles « atmosphère » de Copernicus répondront à ces exigences. Les Sentinelles 4 et 5 (héritage instrumental de TROPOMI) et la nouvelle génération des instruments IASI (IASI-NG), qui seront mis en orbite à partir de 2021 et 2022, installés sur les satellites d'Eutmesat placés en orbite géostationnaire (MTG) et basse (METOP), permettront de faire de nouvelles découvertes sur notre fragile atmosphère en poursuivant ainsi la synergie entre les mesures infrarouge et les mesures ultraviolet pour les vingt prochaines années.

## Références bibliographiques

CEIP – Centre on Emission Inventories and Projections (2016), "EMEP officially reported emission data", <http://www.ceip.at/>

[ms/ceip\\_home1/ceip\\_home/webdab\\_emepdatabase/reported\\_emissiondata](https://www.ceip.at/ceip_home1/ceip_home/webdab_emepdatabase/reported_emissiondata)

CITEPA – Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (2018), « Format SECTEN », <https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/polluants/aep-item/ammoniac>

CORSO M. *et al.* (2016), *Quelle est la part des pics de pollution dans les effets à court terme de la pollution de l'air sur la santé, dans les villes de France ?*, Saint-Maurice, Santé publique France, ISBN : 979-10-289-0259-9.

CUESTA J., KANAYA Y., TAKIGAWA M., DUFOR G., EREMENKO M., FORET G., MIYAZAKI K. & BEEKMANN M. (2018), "Transboundary ozone pollution across East Asia: daily evolution and photochemical production analysed by IASI+GOME2 multispectral satellite observations and models", *Atmos. Chem. Phys.* 18, pp. 9499-9525, <https://doi.org/10.5194/acp-18-9499-2018>

DAMMERS E. *et al.* (2017), "Measuring atmospheric ammonia with remote sensing campaign: Part 1 – Characterisation of vertical ammonia concentration profile in the centre of The Netherlands", 169, pp. 97-112, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.067>

FOWLER D. *et al.* (2013), "The global nitrogen cycle in the twenty-first century", *Philos. Trans. R. Soc. B.* 368(1621), pp.16-13, doi:10.1098/rstb.2013.0164

MYHRE G. *et al.* (2013), "Radiative forcing of the direct aerosol effect from AeroCom Phase II simulations", *Atmos. Chem. Phys.* 13, pp. 1853-1877, <https://doi.org/10.5194/acp-13-1853-2013>

PETETIN H. *et al.* (2016), "Assessing the ammonium nitrate formation regime in the Paris megacity and its representation in the CHIMERE model", *Atmos. Chem. Phys.* 16, pp. 10419-10440.

POPE III C. A. *et al.* (2009), "Fine-particulate air pollution and life expectancy in the United States", *N. Engl. J. Med.* 360(4), pp. 376-386, doi:10.1056/NEJMsa0805646

ROCKSTRÖM J. *et al.* (2009), "Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity", *Ecology and Society* 14(2): 32.

SAFIEDDINE S. *et al.* (2013), "Tropospheric ozone and nitrogen dioxide measurements in urban and rural regions as seen by IASI and GOME-2", *Journal Of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 118, pp. 1-12, doi:10.1002/jgrd.50669

SUTTON M. A. *et al.* (2013), "Our Nutrient World: The challenge to produce more food and energy with less pollution. Global Overview of Nutrient Management", Centre for Ecology & Hydrology on behalf of the Global Partnership on Nutrient Management and the International Nitrogen Initiative, 114 p.

VAN DAMME M. *et al.* (2018), "Industrial and agricultural ammonia point sources exposed", *Nature* 564 (7734): 99, doi:10.1038/s41586-018-0747-1

VAN VUUREN D. P. *et al.* (2011), "The Representative Concentration Pathways: An overview", *Clim. Change* 109 (1-2), pp. 5-31, <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>

VOLTEN H. *et al.* (2012), "Two instruments based on differential optical absorption spectroscopy (DOAS) to measure accurate ammonia concentrations in the atmosphere", *Atmos. Meas. Tech.* 5, pp. 413-427.

VON BOBRUTZKI K. *et al.* (2010), "Field inter-comparison of eleven atmospheric ammonia measurement techniques", *Atmos. Meas. Tech.* 3, pp. 91-112, 10.5194/amt-3-91-2010.

VIATTE C. *et al.* (2019), "Atmospheric ammonia variability and link with PM formation: a case study over the Paris area", *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/acp-2019-138>