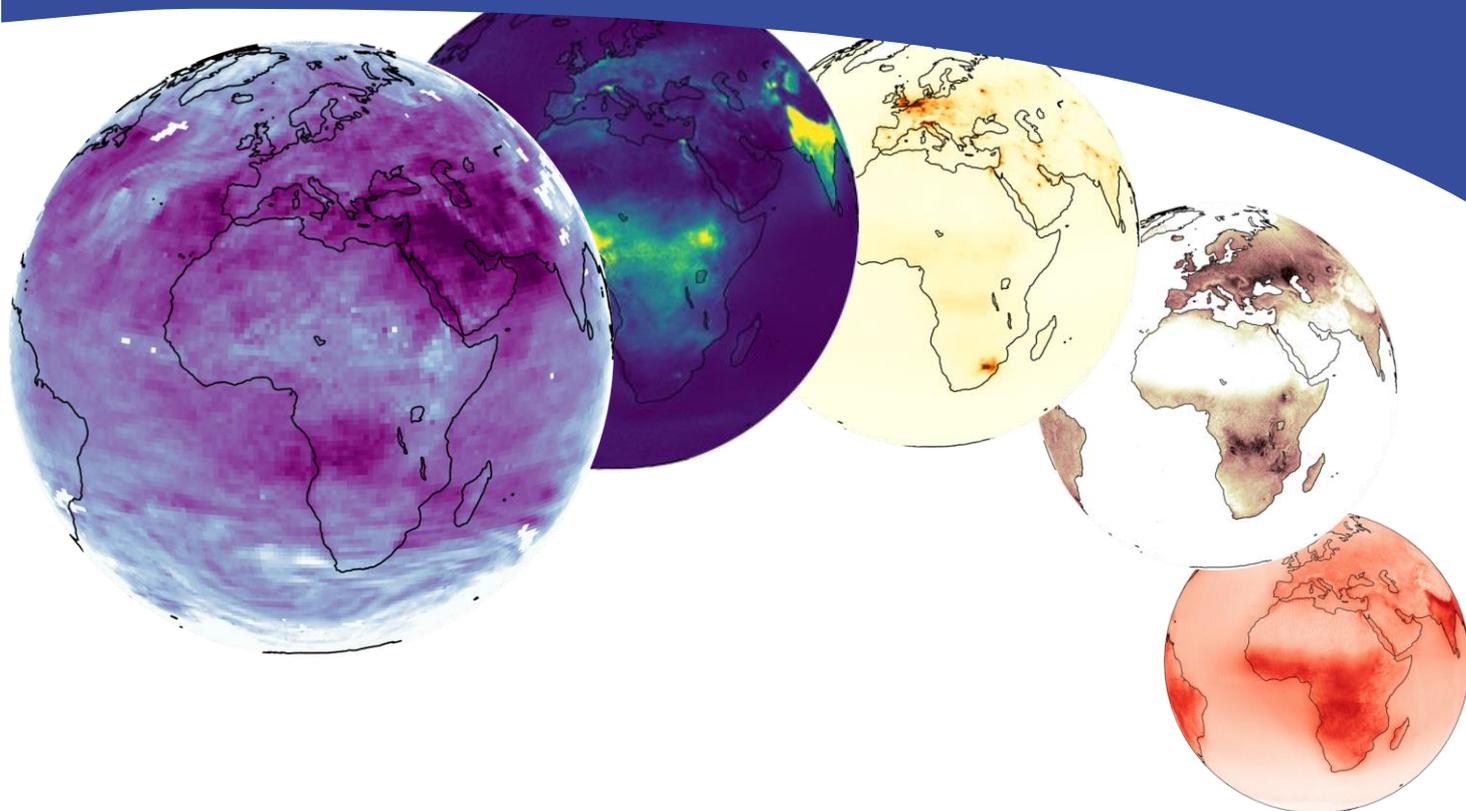


Téledétection satellite de la composition atmosphérique en région

2022



Diffusion : Mai 2023



Siège social :

3, allée des Sorbiers 69500 BRON

Tel. 09 72 26 48 90

contact@atmo-aura.fr



La Région
Auvergne-Rhône-Alpes

Conditions de diffusion

Dans le cadre de la réforme des régions introduite par la Nouvelle Organisation Territoriale de la République (loi NOTRe du 16 juillet 2015), les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air de l'Auvergne (ATMO Auvergne) et de Rhône-Alpes (Air Rhône-Alpes) ont fusionné le 1er juillet 2016 pour former Atmo Auvergne-Rhône-Alpes.

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes est une association de type « loi 1901 » agréée par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (décret 98-361 du 6 mai 1998) au même titre que l'ensemble des structures chargées de la surveillance de la qualité de l'air, formant le réseau national ATMO.

Ses missions s'exercent dans le cadre de la loi sur l'air du 30 décembre 1996. La structure agit dans l'esprit de la charte de l'environnement de 2004 adossée à la constitution de l'Etat français et de l'article L.220-1 du Code de l'environnement. Elle gère un observatoire environnemental relatif à l'air et à la pollution atmosphérique au sens de l'article L.220-2 du Code de l'Environnement.

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes communique publiquement sur les informations issues de ses différents travaux et garantit la transparence de l'information sur le résultat de ses travaux.

A ce titre, les rapports d'études sont librement disponibles sur le site www.atmo-auvergnerhonealpes.fr

Les données contenues dans ce document restent la propriété intellectuelle d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes.

Toute utilisation partielle ou totale de ce document (extrait de texte, graphiques, tableaux, ...) doit faire référence à l'observatoire dans les termes suivants : © Atmo Auvergne-Rhône-Alpes (2023) **Téledétection satellite de la composition atmosphérique en région.**

Les données ne sont pas rediffusées en cas de modification ultérieure.

Par ailleurs, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes n'est en aucune façon responsable des interprétations et travaux intellectuels, publications diverses résultant de ses travaux et pour lesquels aucun accord préalable n'aurait été donné.

En cas de remarques sur les informations ou leurs conditions d'utilisation, prenez contact avec Atmo Auvergne-Rhône-Alpes

- depuis le [formulaire de contact](#)
- par mail : contact@atmo-aura.fr
- par téléphone : 09 72 26 48 90

Remerciements

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes remercie pour leurs compléments d'informations et leur temps Valérie Thouret, Yasmine Bennouna et Hannah Clark sur l'analyse européenne CAMS de qualité de l'air, Camille Viatte, Cathy Clerbaux, Bruno Franco, Martin Van Damme et Lieven Clarisse sur l'utilisation des données IASI NH₃ et C₂H₄, Audrey Fortems-Cheiney, Antoine Berchet, Isabelle Pison, Marielle Saunois et Grégoire Broquet sur l'inversion des émissions de méthane à partir des données satellites TROPOMI et Colas Robert pour les incertitudes de l'inventaire NH₃ du CITEPA.

Les données L4 EPIC d'ozone troposphérique ont été obtenues par le NASA Langley Research Center Atmospheric Science Data Center (dernier accès le 20/12/2022).

IASI est une mission conjointe d'EUMETSAT et du Centre National d'Etudes Spatiales (CNES, France). Atmo AuRA remercie l'infrastructure de données AERIS de fournir l'accès aux données IASI utilisées dans cette étude, ainsi que l'Université Libre de Bruxelles et le LATMOS pour le développement des algorithmes.

Atmo AuRA remercie le réseau ICOS de la production et mise à disposition des observations de méthane atmosphérique.

Les données CAMS d'émission d'ammoniac et de méthane utilisées sont accessibles via : <https://ads.atmosphere.copernicus.eu> (dernier accès le 02/02/2023).

Les données CEDS d'émission d'ammoniac sont accessibles via : <https://doi.org/10.5194/gmd-11-369-2018-supplement> (dernier accès le 02/12/2022).

Les données Citepa d'émissions d'ammoniac utilisées sont accessibles via : https://www.citepa.org/wp-content/uploads/publications/secten/Citepa_Secten2022_donnees_par_substance_pa.zip (dernier accès le 16/01/2023).

Les données EDGAR 6.1 d'émissions d'ammoniac utilisées sont accessibles via : https://edgar.jrc.ec.europa.eu/dataset_ap61 (dernier accès le 11/10/2022).

Les données EMEP d'émissions d'ammoniac sont accessibles via : <https://www.ceip.at/the-emep-grid/gridded-emissions/nh3> (dernier accès le 04/11/2023).

Les données satellites de dioxyde d'azote TM4NO2A sont accessibles via : <https://www.temis.nl/airpollution/no2.php> (dernier accès le 24/01/2023).

Les données IASI NH₃ suréchantillonnées issues de Van Damme et al. (2018) sont accessibles via : <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.894736> (dernier accès le 18/01/2023).

Atmo AuRA remercie Lieven Clarisse et l'Université Libre de Bruxelles pour leur mise à disposition des données NH₃ IASI super-échantillonnées avec ajustement de l'orientation des vents, issues de l'étude Clarisse et al. (2019).

L'accès aux données IASI NH₃ L2 et L3 s'est fait via : <https://iasi.aeris-data.fr/> (dernier accès le 21/06/2022. Les données NH₃ L3 ne sont pas accessibles au moment de l'écriture de ce rapport.).

Les données IASI d'éthylène suréchantillonnées issues de Franco et al. (2022) sont accessibles via : <https://doi.org/10.5281/zenodo.7085725> (dernier accès le 10/01/2023).

Les données TROPOMI L2 CH₄ utilisées sont accessibles via : <https://scihub.copernicus.eu/> (dernier accès le 21/07/2022)/

Les données ICOS CH₄ - L2-2022.1 au Puy-de-Dôme utilisées sont accessibles via : <https://hdl.handle.net/11676/l8WoEXzmy-QMO9StPqES1JVu> (dernier accès le 22/08/2022).

Financement

Cette étude d'amélioration de connaissances a été rendue possible grâce à l'aide financière du conseil régional d'Auvergne-Rhône-Alpes.



Toutefois, elle n'aurait pas pu être exploitée sans les données générales de l'observatoire, financé par l'ensemble des membres d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes.



Résumé

La télédétection spatiale de la composition de l'atmosphère permet une description de la répartition spatiale et des variations temporelles du contenu atmosphérique en divers composés. Atmo Auvergne-Rhône-Alpes (Atmo AuRA) explore l'utilisation de ces données en complément de ses activités de mesure et de modélisation numérique des concentrations en région, intégrant notamment le travail d'inventaire d'émissions d'Atmo AuRA. Un premier rapport focalisé sur l'estimation satellite du dioxyde d'azote (NO_2) a déjà été publié en 2021. Le présent document synthétise, lui, les travaux effectués sur l'estimation de l'ammoniac atmosphérique (NH_3), un précurseur de particules fines inorganiques, et du méthane (CH_4), gaz à effet de serre et précurseur de l'ozone. Ces travaux se basent sur les estimations produites à partir d'observations des deux instruments IASI et TROPOMI. Cette étude explore aussi le potentiel d'autres composés d'intérêt estimés par la télédétection spatiale.

Les données IASI permettent de décrire à échelle kilométrique la répartition spatiale de l'ammoniac atmosphérique en région. Pour obtenir une telle résolution, il est nécessaire d'effectuer des moyennes temporelles sur plusieurs années. La description temporelle impose, elle, de considérer des surfaces plus larges. La comparaison des estimations satellites avec les modélisations d'Atmo questionne la répartition spatiale des émissions d'ammoniac inventoriées, en particulier sur le nord du Puy-de-Dôme. D'autre part, l'étude des variations temporelles à l'échelle mensuelle et interannuelle est possible à l'échelle régionale. La comparaison des variations observées par satellite avec les mesures in situ d'ammoniac effectuées par Atmo montre une corrélation significative ($R \approx 0.70$). De futures analyses permettront d'évaluer si les données IASI permettent de caractériser non seulement les variations temporelles régionales mais aussi locales d'ammoniac atmosphérique.

L'étude du méthane avec les données TROPOMI montre actuellement des limites pour le cas de la région Auvergne-Rhône-Alpes (AuRA). L'estimation est ainsi absente sur les reliefs soit sur environ la moitié de la région. De plus, les conditions pour une estimation TROPOMI valide restreignent aussi à généralement moins de 15 % le nombre de données utilisables. L'utilisation de données IASI CH_4 pourrait permettre une information aussi sur les reliefs et avec un plus long historique d'observations.

Une ouverture vers d'autres composés comme l'ozone troposphérique et les composés organiques volatils illustre que la télédétection spatiale de la composition de l'atmosphère est un sujet de recherche actif avec de possibles applications pour la qualité de l'air. L'assimilation de données au sein d'analyses et de réanalyses est discutée comme moyen d'intégrer intelligemment les estimations satellites à une modélisation de chimie-transport atmosphérique.

De futures missions satellites telles que Meteosat Troisième Génération et MetOp-SG devraient permettre d'améliorer significativement la description et la compréhension des composés atmosphériques présents en région AuRA, avec une information plus précise quantitativement, des résolutions spatiales et temporelles améliorées, et une lecture des variations temporelles sur un plus long terme.

Sommaire

1. Contexte et introduction	10
1.1. Contexte	10
1.2. Objectifs	10
2. L'ammoniac (NH₃)	10
2.1. Contexte	10
2.2. L'estimation satellite	12
2.3. La répartition spatiale du NH₃ en région	13
2.4. L'évolution temporelle	16
2.5. Conclusions et perspectives	18
3. Le méthane (CH₄)	19
3.1. Contexte	19
3.2. L'estimation satellite	19
3.3. Comparaison avec la modélisation d'Atmo	22
3.4. Conclusions et perspectives	24
4. Autres usages des données satellites	25
4.1. L'ozone troposphérique	25
4.2. Les composés organiques volatils	26
4.3. Les évolutions à long terme	32
4.4. L'assimilation de données	32
5. Conclusion et perspectives	34



Illustrations

Figure 1: Mesures de l'ammoniac atmosphérique à Lyon centre	11
Figure 2: Inventaires et objectifs des émissions d'ammoniac en France	11
Figure 3 : Répartition mondiale de l'ammoniac atmosphérique entre 2008 et 2016 estimée par satellite (échelle de couleur logarithmique).....	12
Figure 4 : Spectre normalisé de luminance atmosphérique enregistré par IASI et transmittance d'espèces chimiques simulée dans le domaine spectral de l'instrument	13
Figure 5 : Répartition spatiale de l'ammoniac en France métropolitaine entre 2008 et 2020 (inventaires d'émissions EMEP et CAMS	14
Figure 6 : Répartition spatiale moyenne de l'ammoniac en région Auvergne-Rhône-Alpes vue par IASI et par les inventaires d'émissions EMEP, CAMS et d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes.....	15
Figure 7 : Evolution de l'ammoniac atmosphérique en région Auvergne-Rhône-Alpes entre 2008 et 2021 et comparaison des estimations issues de MetOp-A/IASI et de MetOp-B/IASI (2013-2020).	16
Figure 8 : Estimations de l'ammoniac atmosphérique en région Auvergne-Rhône-Alpes issues des instruments IASI embarqués sur les satellites MetOp-A et MetOp-B, et comparaison avec les mesures de surface d'Atmo AuRA à Lyon centre.....	17
Figure 9 : Estimation satellite IASI d'ammoniac atmosphérique entre 2008 et 2020 en Auvergne-Rhône-Alpes. Données super-échantillonnées avec ajustement de l'orientation des vents.....	18
Figure 10 : Evolution temporelle du méthane atmosphérique reconstruite sur les 800 000 dernières années et mesurée en surface.	19
Figure 11 : Moyenne XCH ₄ TROPOMI entre 2018 et 2021	20
Figure 12 : Emissions de méthane en Auvergne Rhône-Alpes de 2018 à 2020 (données CAMS)	20
Figure 13 : Moyennes mensuelles des observations XCH ₄ de TROPOMI (2018-2021)	21
Figure 14 : Comparaison des simulations CHIMERE et des estimations satellites TROPOMI de XCH ₄ coïncidentes temporellement et spatialement en région AuRA (2020-2021).....	22
Figure 15 : Histogrammes des données CHIMERE et TROPOMI colocalisées entre 2020 et 2021 sur le domaine régional.	23
Figure 16 : Effectif des données TROPOMI CH ₄ disponibles de 2020 à 2021	23
Figure 17 : Ozone troposphérique estimé à partir des observations de l'imager DSCOVR/EPIC.....	25
Figure 18 : Ethylène atmosphérique (C ₂ H ₄) en France métropolitaine, estimé par l'instrument satellite IASI (2008-2020). Données super-échantillonnées avec ajustement de l'orientation des vents.....	26
Figure 19 : Comparaison de l'éthylène atmosphérique estimé par IASI et par le modèle CHIMERE ...	27
Figure 20 : Estimations satellites de NO ₂ troposphérique entre 1996 et 1999 et entre 2014 et 2017.	32
Figure 21 : Répartition mondiale de l'ammoniac atmosphérique entre 2008 et 2016 (échelle de couleurs linéaire).	35
Figure 22 : Corrélogrammes entre mesures d'ammoniac de surface et estimations satellites IASI d'ammoniac atmosphérique à Lyon centre pour les données MetOp-A/IASI et MetOp-B/IASI	35
Figure 23 : Estimations à Lyon centre de l'ammoniac atmosphérique à partir des données L2 suréchantillonnées des instruments IASI embarqués sur les satellites MetOp-A et MetOp-B, et mesures de surface colocalisées d'Atmo AuRA.	36
Figure 24 : Répartition de l'ammoniac atmosphérique estimé entre 2008 et 2020 en France métropolitaine par l'instrument satellite IASI (données suréchantillonnées).	36

Figure 25 : Cycle journalier du NH₃ atmosphérique estimé depuis le satellite Fengyun-4A.	37
Figure 26 : Carte mondiale de XCH₄ TROPOMI (novembre-décembre 2017)	38
Figure 27 : Superposition des cartes de CH₄ atmosphérique (TROPOMI, 2018-2021) et d'émissions de méthane CAMS (2018-2020)	38
Figure 28 : Répartition mondiale de l'éthylène atmosphérique (C₂H₄) entre 2008 et 2020, estimé par IASI. Données super-échantillonnées avec ajustement de l'orientation des vents.	39

Abréviations

AIRS	A tmospheric I nfra R ed S ounder (<i>sondeur infrarouge atmosphérique</i>)
AuRA	A uvergne- R hône- A lpes
CAMS	C opernicus A tmosphere M onitoring S ervice (<i>service Copernicus de suivi de l'atmosphère</i>)
CAMEO	C AMS Service E volution
CEDS	C ommunity E mission D ata S ystem (<i>système communautaire de données d'émission</i>)
Citepa	C entre i nterprofessionnel t echnique d' é tudes de la p ollution a tmosphérique
COV	C omposé O rganique V olatil
COVNM	C omposé O rganique V olatil N on M éthanique
CrIS	C ross-track I nfrared S ounder (<i>sondeur infrarouge transversal</i>)
EEA	E uropean E nvironment A gency (<i>agence environnementale européenne</i>)
EDGAR	E missions D atabase for G lobal A tmospheric R esearch (<i>base de données d'émissions pour la recherche mondiale sur l'atmosphère</i>)
EMEP	E uropean M onitoring and E valuation P rogramme (<i>programme européen de suivi et d'évaluation</i>)
GIEC	G roupe d'experts I ntergouvernemental sur l' E volution du C limat
GIIRS	G eostationary I nterferometric I nfra R ed S ounder (<i>sondeur infrarouge interférométrique géostationnaire</i>)
IASI	I nfrared A tmospheric S ounding I nterferometer (<i>interféromètre infrarouge de sondage atmosphérique</i>)
IASI-NG	IASI-Next G eneration
IRS	I nfra R ed S ounder (<i>sondeur infrarouge</i>)
ISSWG	IASI S ounding S cience W orking G roup (<i>groupe de travail scientifique de sondage IASI</i>)
MTECT	M inistère de la T ransition E cologique et de la C ohésion des T erritoires
MTG	M eteosat T hird G eneration (<i>Meteosat troisième génération</i>)
PAN	P eroxy A cétyl N itrate (<i>nitrate de peroxyacétyle</i>)
PREPA	P lan national de R éduction des E missions de P olluants A tmosphériques
RMSD	R oot- M ean- S quare of the D ifference (<i>différence quadratique moyenne</i>)
STDD	S Tandard D eviation of the D ifference (<i>écart-type de la différence</i>)
TROPOMI	T ROPOspheric M onitoring I nstrument (<i>instrument de suivi troposphérique</i>)
ULB	U niversité L ibre de B ruelles
WASS	W ind- A justed S uper S ampling (<i>super-échantillonnage avec ajustement des vents</i>)

1. Contexte et introduction

1.1. Contexte

L'observation spatiale de la Terre permet une description de l'environnement à une échelle globale ainsi que son évolution temporelle. Des années 1960 à aujourd'hui, la connaissance de la composition de l'atmosphère s'est vue renforcée par le développement de générations d'instruments satellites dédiés et de méthodes d'estimation. Aujourd'hui, des instruments comme TROPOMI et IASI décrivent sur tout le globe le contenu atmosphérique en aérosols, gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4) et gaz réactifs comme le dioxyde d'azote (NO_2), l'ozone (O_3), l'ammoniac (NH_3), ainsi que différents composés organiques volatils. Ces instruments sont essentiellement déployés en orbite polaire, fournissant ainsi une couverture spatiale mondiale mais avec un échantillonnage temporel généralement restreint à un ou deux passages par jour pour un lieu donné. Les satellites géostationnaires peuvent, eux, observer en continu une même région et décrire des variations journalières. S'ils considèrent actuellement peu la composition de l'air, de futures missions telles que MTG-S s'y consacreront. Atmo Auvergne-Rhône-Alpes (**Atmo AuRA**) s'intéresse à l'utilisation de ces données satellites comme source d'information indépendante de ses outils de modélisation de la composition atmosphérique régionale, de ses inventaires d'émissions et de son dispositif de mesures.

1.2. Objectifs

Après un premier rapport publié en 2021 sur l'utilisation des données de NO_2 (Atmo AuRA, 2021) issues de l'instrument satellite **TROPOMI** (Tropospheric Monitoring Instrument), Atmo AuRA focalise ce rapport sur l'étude du méthane et de l'ammoniac atmosphériques. L'étude prévoyait initialement une partie dédiée au protoxyde d'azote (N_2O), émis majoritairement par les activités agricoles, comme les deux autres gaz, pour former une continuité thématique. Cependant, du fait d'un temps de vie long dans l'atmosphère, les concentrations de N_2O sont très homogènes dans l'air. Ainsi, l'estimation satellite n'a pas été considérée plus en avant ne semblant pas permettre actuellement d'extraire une information sur la répartition des émissions à l'échelle régionale. En parallèle, une ouverture est présentée sur les autres usages possibles des données satellites pour la qualité de l'air.

La partie de cette étude dédiée au méthane et à l'ammoniac vient en complément du travail d'Atmo d'inventaires de leurs émissions régionales. Les données satellites permettent une description régionale de la répartition de ces composés impliqués respectivement dans l'effet de serre et dans la formation de particules fines inorganiques, que ne permettent pas les rares mesures atmosphériques effectuées en région.

2. L'ammoniac (NH_3)

2.1. Contexte

L'ammoniac (NH_3) est un précurseur gazeux des particules fines de nitrates et sulfates d'ammonium présentes dans l'air extérieur. Il est présent dans l'atmosphère à l'état de traces. La station de mesure d'Atmo AuRA dans le centre lyonnais relève ainsi des rapports de mélange allant de 1 à 45 ppb¹ (Figure 1).

La directive européenne 2016/2284/UE, mise en œuvre en France dans le cadre du Plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques (**PREPA**), fixe un objectif de réduction des émissions d'ammoniac

¹ 1 ppb = 1 molécule de l'espèce chimique pour 1 milliard de molécules d'air ambiant

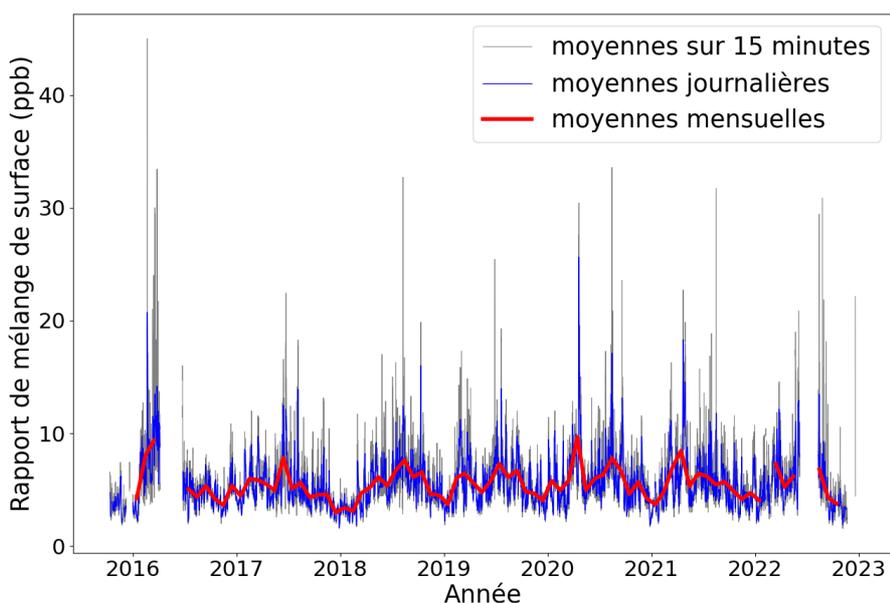


Figure 1: Mesures de l'ammoniac atmosphérique à Lyon centre

de 13 % en 2030 par rapport aux niveaux de 2005 (JOUE, 2016). Plusieurs études de modélisation montrent que des réductions significatives des émissions de NH_3 peuvent mener à une diminution de la pollution particulaire en Europe (e.g. Megaritis et al., 2013 ; Bessagnet et al., 2014 ; Bauer et al., 2016 ; Pozzer et al., 2017). D'après l'Agence européenne pour l'environnement (**EEA**), la France est le pays de l'Union Européenne émettant le plus d'ammoniac dans l'atmosphère (Eurostat, 2022). A l'échelle nationale comme en région Auvergne-Rhône-Alpes (**AuRA**), l'agriculture est la source principale d'émissions de NH_3 . En 2020, sur les 84.3 kt (kilotonnes, soit milliers de tonnes) émises en région AuRA, 37.5 kt provenaient de l'élevage et 43.6 kt des cultures, essentiellement du fait de l'épandage d'engrais azotés (Atmo AuRA, 2022).

L'estimation des émissions régionales d'ammoniac effectuée chaque année par Atmo repose exclusivement sur un travail d'inventaire. Les concentrations atmosphériques ne faisant pas l'objet d'un suivi réglementaire, la mesure continue de NH_3 en air ambiant n'existe que ponctuellement en région, à Lyon centre (Figure 1) et Bourg-en-Bresse. La connaissance du contenu atmosphérique en NH_3 est cependant précieuse pour interroger la validité des inventaires d'émission. Le Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (**Citepa**) estime une incertitude de 40 % sur son inventaire national d'émission de NH_3 de 2020 et estime à $-11\% \pm 13.3\%$ l'évolution temporelle entre 1980 et 2020 (Citepa, 2022). De telles incertitudes compliquent l'évaluation du respect des engagements nationaux de diminution des émissions d'ammoniac, en particulier pour les nouvelles trajectoires annuelles définies par le décret n° 2022-1654 du 26 décembre 2022 (MTECT, 2022). Ces incertitudes expliquent les importantes divergences qu'on peut constater en comparant les

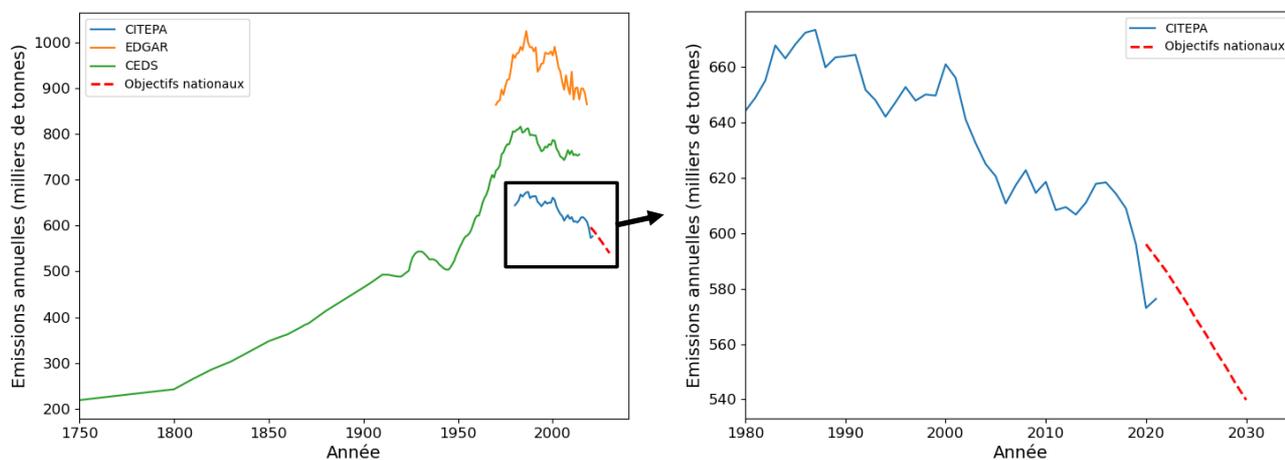


Figure 2: Inventaires et objectifs des émissions d'ammoniac en France

émissions de NH_3 en France issues de différents inventaires, tels que ceux du Citepa, de l'Emissions Database for Global Atmospheric Research (**EDGAR**) et du Community Emission Data System (**CEDS**, Hoesly et al., 2018) représentés sur la Figure 2.

2.2. L'estimation satellite

L'estimation satellite de l'ammoniac atmosphérique permet de décrire ses variations spatiales et temporelles sur plus d'une décennie à l'échelle de la région, mais aussi d'avoir un contexte d'échelle mondiale (Figure 3). Elle s'exprime généralement en colonnes totales, soit la quantité totale de molécules de l'espèce chimique entre la surface et le sommet de l'atmosphère par unité de surface, le plus souvent en molécules cm^{-2} . Plusieurs instruments satellites permettent l'estimation de l'ammoniac atmosphérique, parmi lesquels **AIRS** (Atmospheric Infrared Sounder, Warner et al. (2016)), **CrIS** (Cross-track Infrared Sounder, Shephard & Cady-Pereira (2015)) et **IASI** (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer, Clarisse et al. (2009)). Ces instruments sont tous placés en orbite héliosynchrone. Cela permet d'obtenir à partir de chacun une couverture mondiale de l'information, au détriment d'une information sur les variations intra-journalières du NH_3 .

IASI mesure des spectres de rayonnement infrarouge émis par la Terre (Clerbaux et al. 2009). L'analyse de ces spectres permet de quantifier l'abondance dans l'atmosphère de certains composés chimiques, actifs dans ce domaine de longueurs d'onde (Figure 4). IASI permet ainsi aujourd'hui de détecter trente-trois espèces chimiques, à différents niveaux de concentration (De Longueville et al., 2021). Certaines de ces espèces sont cartographiées de façon opérationnelle et les données ainsi produites sont mises à disposition du public. L'instrument IASI est embarqué sur trois satellites (MetOp-A (2006-2021), -B (2012-actif), -C (2018-actif)) chacun survolant la Terre à heure solaire constante, environ 9h30 du matin et du soir. L'utilisation des données CrIS a été considérée pour obtenir une information sur l'après-midi (passage vers 01h30 du matin et de l'après-midi) en complément des données IASI. La comparaison quantitative entre données CrIS et IASI est cependant difficile notamment du fait des différences entre les algorithmes d'estimation utilisés pour créer les deux jeux de données (Viatte et al., 2020).

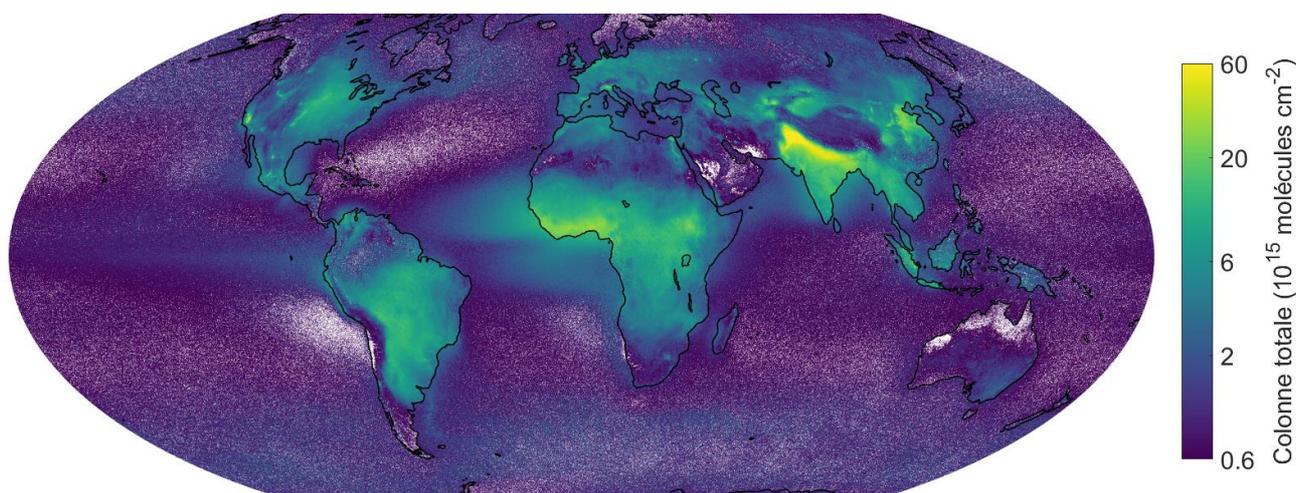


Figure 3 : Répartition mondiale de l'ammoniac atmosphérique entre 2008 et 2016 estimée par satellite (données IASI (Van Damme et al., 2018b)). Noter l'échelle de couleur logarithmique, utilisée pour visualiser les différents ordres de grandeurs (version avec échelle de couleur linéaire en annexe).

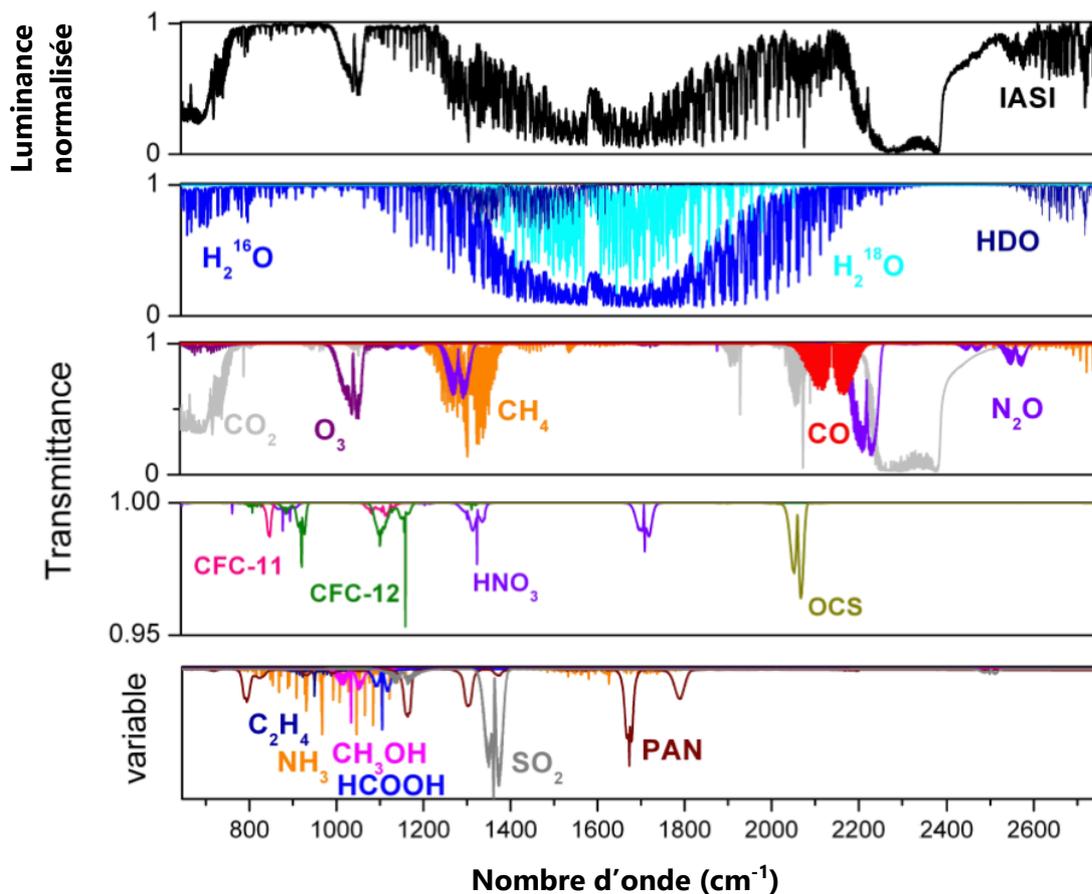


Figure 4 : En haut : spectre normalisé de luminance atmosphérique, enregistré par IASI le 20/12/2006 dans l'ouest de l'Australie. Autres figures : Transmittance d'espèces chimiques détectées par IASI, simulée dans le domaine spectral de l'instrument. Figure adaptée de Clerbaux et al. (2009).

2.3. La répartition spatiale du NH₃ en région

La Figure 5 illustre les désaccords entre cadastres d'émissions à l'échelle métropolitaine. Elle montre comparativement les émissions d'ammoniac issues des inventaires du Copernicus Atmospheric Monitoring Service (**CAMS**) et du European Monitoring and Evaluation Programme (**EMEP**) en France métropolitaine sur la période 2008-2020. On peut d'abord constater les différences significatives de répartition spatiale des émissions entre les inventaires EMEP et CAMS, par exemple en Seine-Maritime, Aude, Marne, sud des Landes, Meurthe-et-Moselle, ou encore Moselle (cercles rouges). A l'échelle de la région Auvergne-Rhône-Alpes, les émissions EMEP sont significativement plus faibles que CAMS (Figure 6 : Répartition spatiale moyenne de l'ammoniac en région Auvergne-Rhône-Alpes. (a) colonnes totales atmosphériques estimées par l'instrument satellite IASI (Van Damme et al., 2018) ; et par les inventaires d'émissions EMEP (b), CAMS (c) et d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes (d). Figure 6). Le cadastre d'Atmo AuRA est lui plus similaire à CAMS bien que montrant des différences notables.

Pour décrire la répartition spatiale moyenne de l'ammoniac atmosphérique en région, on applique aux données IASI-NH₃ journalières (L2) la méthode de suréchantillonnage utilisée dans l'étude Van Damme et al. (2018a). Les données IASI ont individuellement une empreinte spatiale circulaire de 12 km de diamètre au nadir. Cependant, en accumulant les données IASI entre 2008 et 2020 et en prenant en compte les variations de l'empreinte et de la couverture spatiale d'une orbite à l'autre du satellite MetOp-A, les données suréchantillonnées permettent de détecter des sources ponctuelles à échelle kilométrique.

La comparaison n'est cependant pas directe entre cadastres d'émissions et estimations satellites de contenu atmosphérique. Une interprétation plus étayée demanderait une connaissance plus précise du temps de vie de l'ammoniac atmosphérique. On regarde donc des simulations produites par Atmo AuRA à partir du modèle

de chimie-transport atmosphérique CHIMERE et utilisant le cadastre d'émission d'Atmo AuRA. Les simulations disponibles à échelle pluriannuelle à partir de 2015 renseignent cependant uniquement sur les niveaux de surface. En comparant simulations et observations en Figure 6 a) et b), les concentrations simulées dans le centre de l'Auvergne semblent trop fortes par rapport au reste de la région, probablement liées aux fortes émissions inventoriées par Atmo sur cette zone. Les données suréchantillonnées IASI indiquent plutôt des niveaux atmosphériques relativement élevés dans l'Allier, la Loire, la moitié est de l'Ain et le nord-ouest de l'Isère. Une comparaison plus robuste avec IASI devra intégrer des données CHIMERE entre 2008 et 2020 avec une information sur la verticale pour produire des colonnes atmosphériques, mais de telles simulations restent à produire.

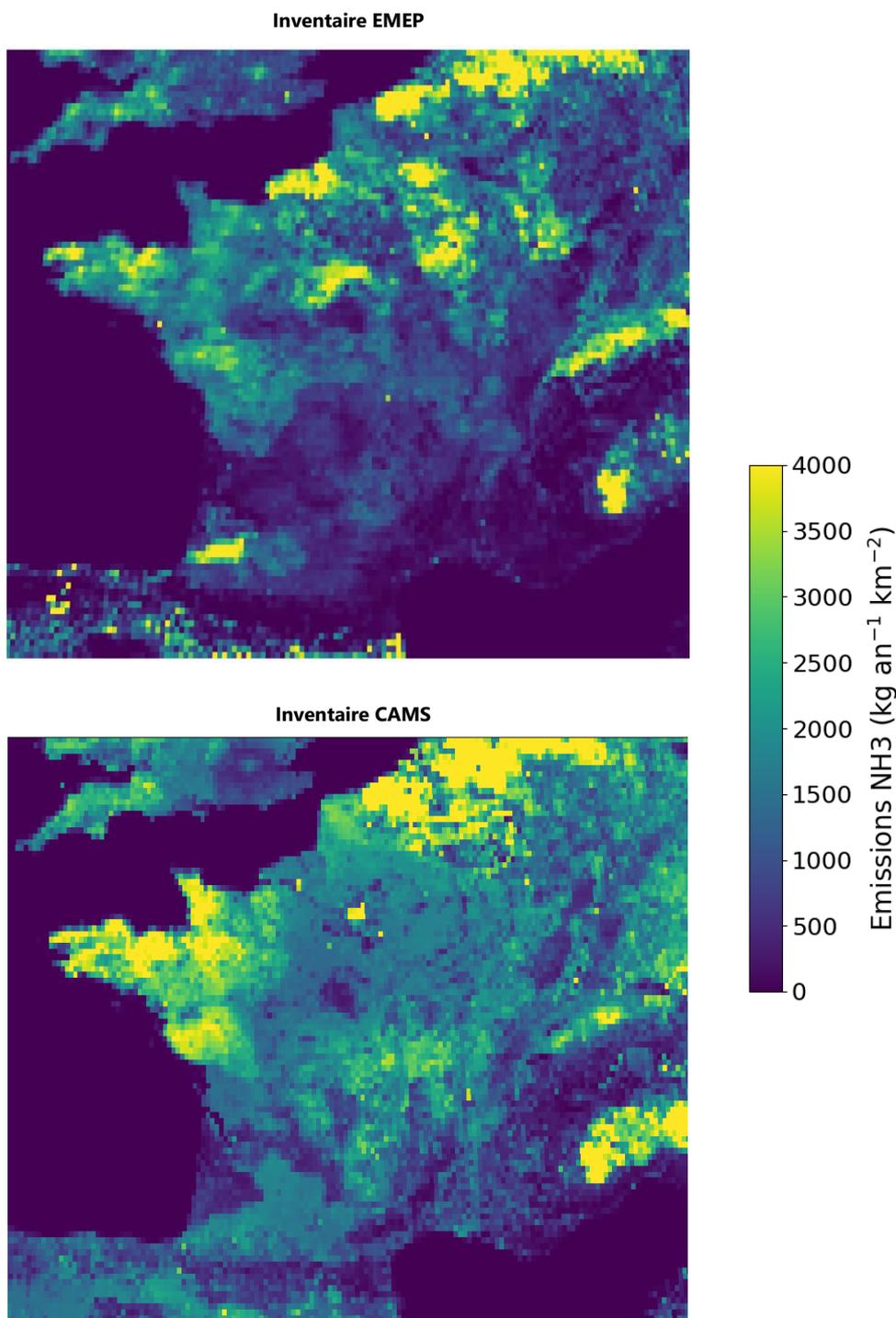


Figure 5 : Répartition spatiale de l'ammoniac en France métropolitaine entre 2008 et 2020 issue des inventaires d'émissions EMEP (a) et CAMS (b)

Observations satellites IASI (2008-2020)

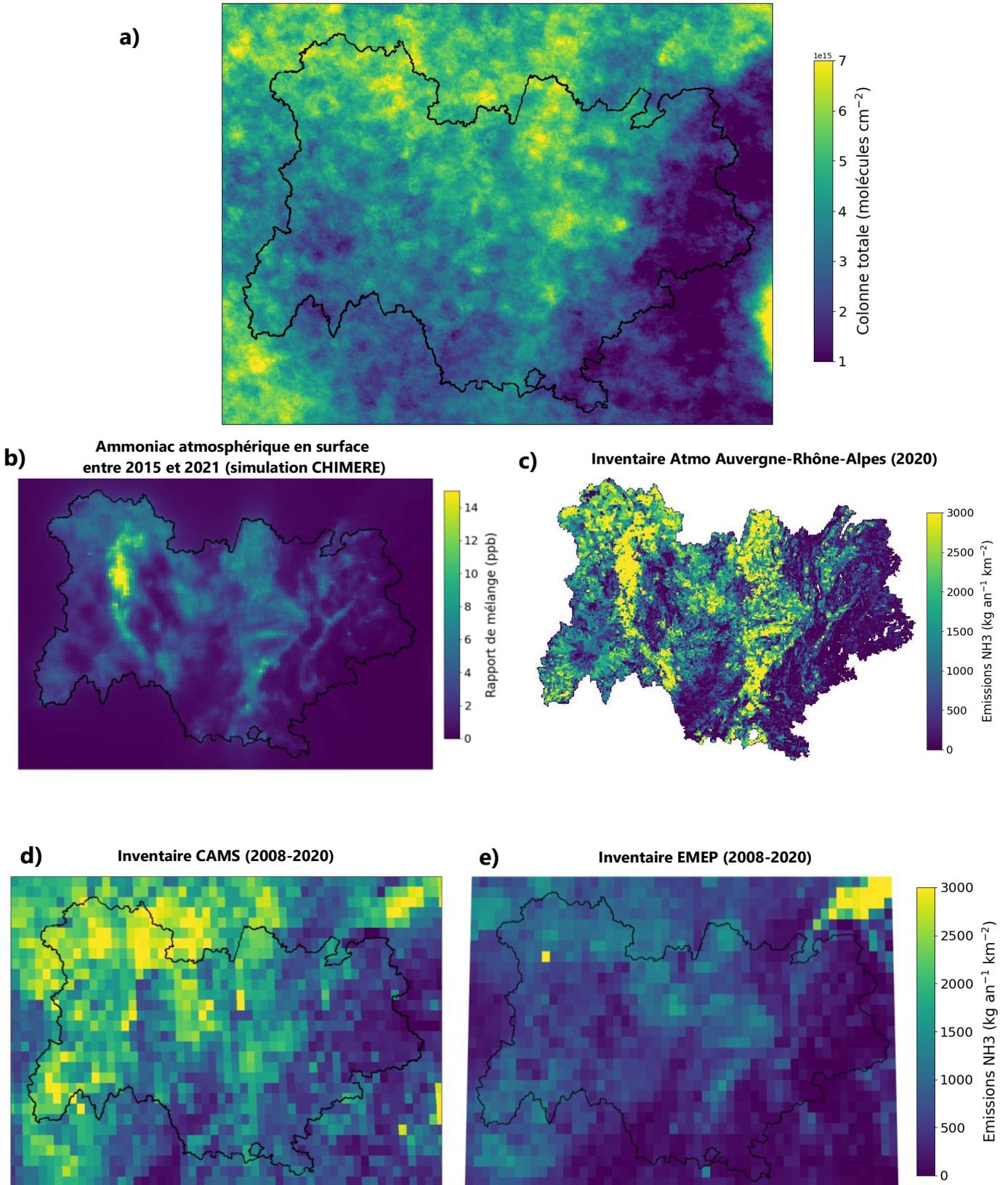


Figure 6 : Répartition spatiale moyenne de l'ammoniac en région Auvergne-Rhône-Alpes. (a) colonnes totales atmosphériques estimées par l'instrument satellite IASI (Van Damme et al., 2018) ; et par les inventaires d'émissions EMEP (b), CAMS (c) et d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes (d).

2.4. L'évolution temporelle

Pour obtenir une description temporelle du contenu atmosphérique en NH_3 , les données IASI NH_3 de niveau 2 sont suréchantillonnées, moyennées mensuellement et sur le domaine de la région Auvergne-Rhône-Alpes. Les données issues des instruments embarqués sur les deux satellites MetOp-A et MetOp-B sont considérées entre 2008 et 2021 et sont comparées. Comme illustré sur la Figure 7, les moyennes régionales mensuelles sont très corrélées entre les deux jeux de données IASI ($R=0.96$ sur la période 2013-2020), mais montrent des différences significatives, avec une différence quadratique moyenne de $0.8 \cdot 10^{15}$ molécules cm^{-2} (24 %).

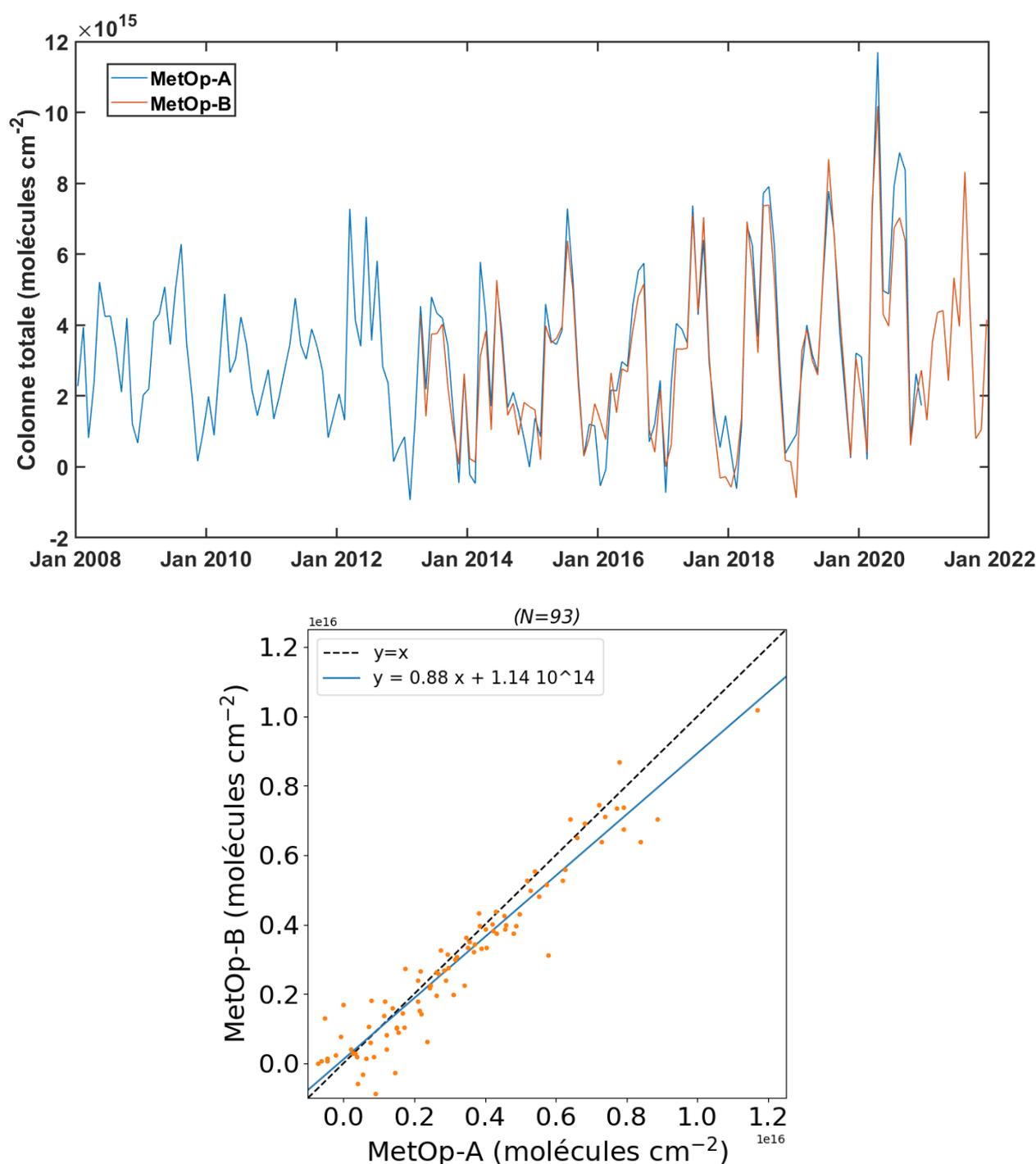


Figure 7 : En haut : évolution de l'ammoniac atmosphérique en région Auvergne-Rhône-Alpes entre 2008 et 2021 (moyennes mensuelles). En bas : comparaison des estimations issues de MetOp-A/IASI et de MetOp-B/IASI (2013-2020). Données NH_3 L2 suréchantillonnées.

Pour évaluer si les données IASI de colonnes totales sont pertinentes pour estimer des concentrations de surface, une comparaison est faite avec les mesures produites par Atmo AuRA avec l'analyseur PICARRO G2103 installé à Lyon centre. Les observations IASI étant obtenues vers 9h30 en heure locale, on ne considère que les observations *in situ* produites entre 9 h et 10 h (temps solaire moyen)². Celles-ci sont comparées aux estimations satellites moyennées sur le domaine régional.

La comparaison est présentée sur la Figure 8. Les mesures de surface montrent une corrélation significative avec les observations issues de MetOp-A et MetOp-B moyennées sur la région Auvergne-Rhône-Alpes (0.70 et 0.71, respectivement). La corrélation est bien plus faible en considérant les données IASI interpolées sur la position de la station de mesure de Lyon centre (0.59 et 0.39 respectivement pour MetOp-A et MetOp-B, voir aussi Figure 22 et Figure 23 en Annexe *Figures supplémentaires*). Une explication probable serait que l'échantillonnage temporel de IASI est trop faible pour reproduire les variations inter-mensuelles en un lieu précis. Il faut donc moyenner les estimations satellites sur une large surface.

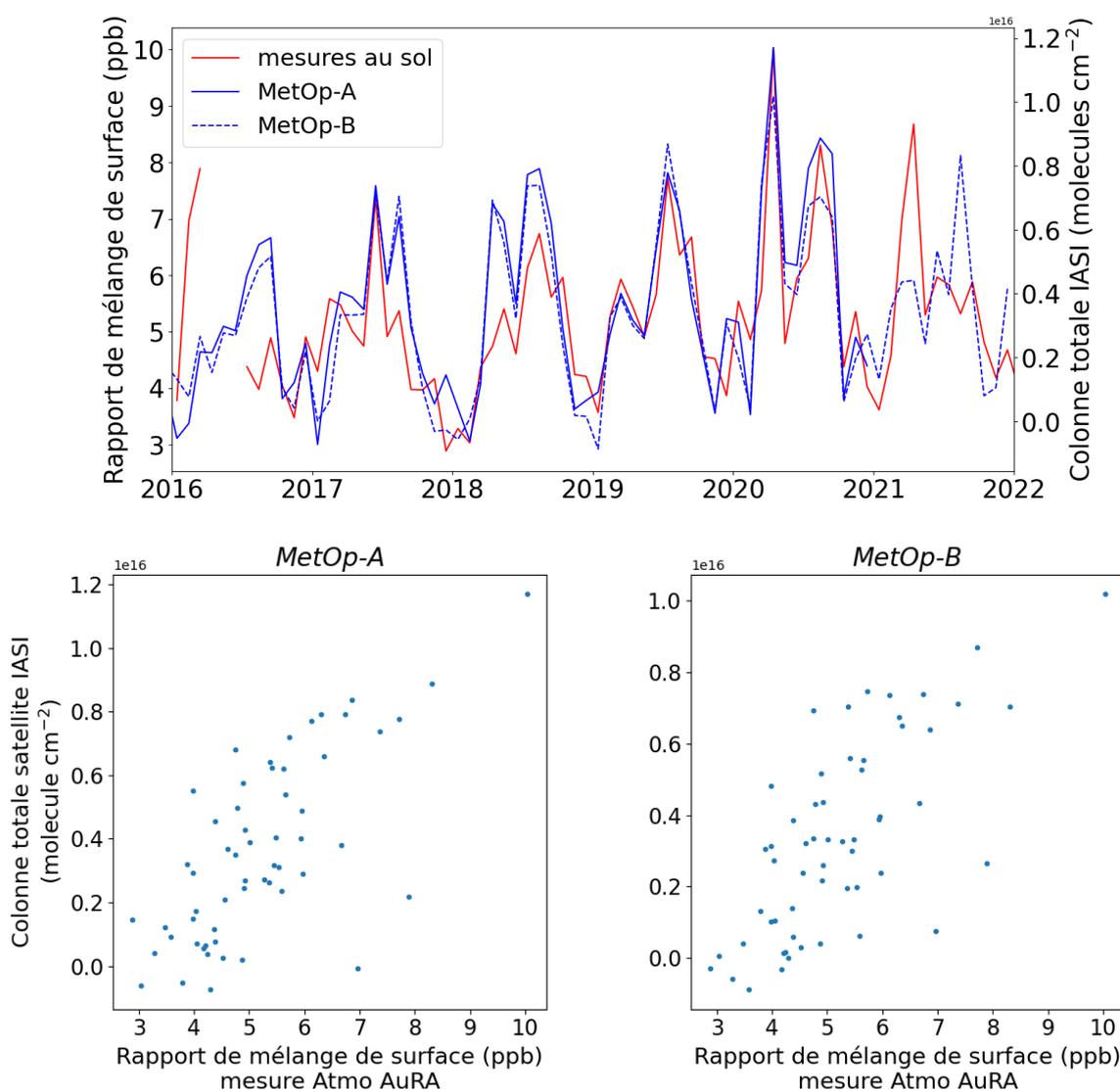


Figure 8 : En haut : estimations de l'ammoniac atmosphérique en région Auvergne-Rhône-Alpes issues des instruments IASI embarqués sur les satellites MetOp-A et MetOp-B, et mesures de surface d'Atmo AuRA à Lyon centre. En bas : corrélogrammes entre mesures au sol (Lyon centre) et estimations satellites IASI (région AuRA), pour les données MetOp-A/IASI (gauche) et MetOp-B/IASI (droite).

² L'orbite de MetOp-A dérivant significativement à partir de fin 2017, les observations IASI sont acquises de plus en plus tôt dans la matinée (8h30 fin 2020 contre 9h30 fin 2017). Une meilleure comparaison entre IASI et observations de surface devra à l'avenir prendre en compte l'heure réelle de mesure plutôt que l'heure nominale.

2.5. Conclusions et perspectives

Les données satellites montrent un vrai potentiel pour interroger voire corriger les inventaires d'émission d'ammoniac. Plusieurs travaux de recherche ont ainsi récemment produit des estimations des émissions de NH_3 à partir d'observations satellites. Ces études pointent une sous-estimation d'inventaires de référence d'émissions par rapport aux estimations satellites (Dammers et al., 2022, 2019 ; Sitwell et al., 2022 ; van der Graaf et al., 2022 ; Evangelidou et al., 2021 ; Marais et al., 2021 ; Fortems-Cheiney et al., 2020 ; Van Damme et al., 2018a). D'autres travaux ont exposé des estimations de concentrations de surface à partir de données satellites. Les données CrIS NH_3 comprennent notamment une estimation des profils verticaux d'ammoniac dont les concentrations de surface peuvent être extraites. Cao et al. (2022) utilisent ces données comme référence comparant des simulations numériques de NH_3 avec et sans assimilation de données. L'estimation de concentrations de surface a aussi été faite à partir des données IASI (Liu et al., 2019). L'approche pourrait être reproduite et les concentrations de surface obtenues alors comparées aux observations de surface disponibles en région, et plus largement en France. La détection plus précise de sources ponctuelles d'émissions continue de faire l'objet d'études, notamment en prenant en compte l'orientation des vents, que ce soit pour l'ammoniac (Figure 9 et Clarisse et al. (2019)), le méthane (Maasackers et al., 2022) ou d'autres composés (e.g. Franco et al. (2022)).

Le lancement prochain de missions satellites devrait permettre d'améliorer la connaissance sur l'ammoniac atmosphérique. La mission IASI-Next Generation (**IASI-NG**) devrait détecter la composition de l'air avec une meilleure sensibilité que IASI aux faibles abondances et à la distribution verticale, grâce à une résolution spectrale améliorée (ISSWG, 2018). Lancée dans quelques années, la mission satellite MTG-S et son instrument IRS permettront d'avoir une connaissance des variations journalières de l'ammoniac sur toute la région AuRA via des observations effectuées toutes les 30 minutes avec une résolution d'environ 7 km (EUMETSAT, 2021). L'instrument similaire **GIIRS** (Geostationary Interferometric Infrared Sounder) embarqué sur le satellite géostationnaire chinois Fengyun-4A a déjà montré le potentiel de ces données pour décrire les variations spatiales et temporelles de l'ammoniac atmosphérique (Clarisse et al., 2021)³.

Si les données IASI NH_3 ont ici été analysées sur des moyennes mensuelles, les analyses futures pourront porter sur les données journalières. Cela permettra d'évaluer le potentiel de IASI pour décrire des variations temporelles de NH_3 atmosphérique à échelle locale et non seulement régionale.

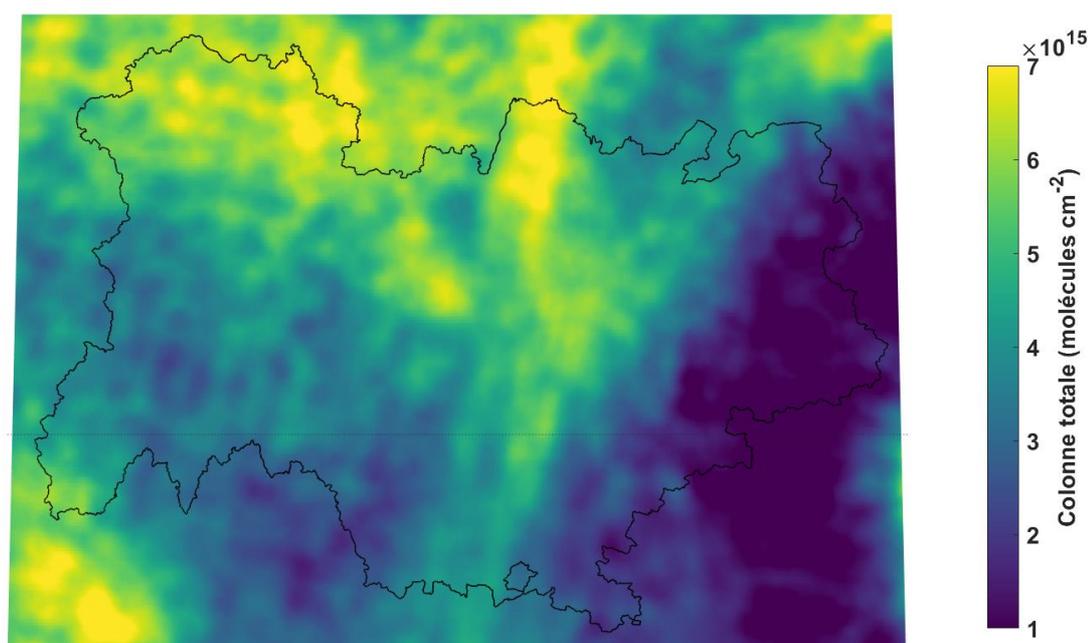


Figure 9 : Estimation satellite IASI d'ammoniac atmosphérique entre 2008 et 2020 en Auvergne-Rhône-Alpes. Données super-échantillonnées avec ajustement de l'orientation des vents (données L. Clarisse/ULB)

³ Voir aussi Figure 25 (Figures supplémentaires)

3. Le méthane (CH₄)

3.1. Contexte

Le méthane est un des principaux gaz à effet de serre émis par les activités humaines. Ses concentrations atmosphériques ont augmenté d'environ 160 % entre 1750 et 2022, au-delà du domaine de variations connu, sur les 800 000 dernières années (Figure 10). Bien qu'ayant un temps de vie relativement court dans l'atmosphère d'environ 12 ans (IPCC (2021), Chap. 7.6.1.1), le méthane contribuait en 2019 au réchauffement global à hauteur d'environ 0.3°C (IPCC (2021), Chap. 7, fig. 7.7). D'après l'EEA, la France est, depuis 2008, le pays de l'Union Européenne émettant le plus de méthane dans l'atmosphère (EEA, 2021).

Le méthane est aussi un précurseur de l'ozone troposphérique. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (**GIEC**, ou IPCC en anglais) pointe ainsi un rôle important d'une atténuation future des émissions anthropiques de méthane pour réduire la pollution à l'ozone (IPCC (2021), Chap. 6.7.1.2). Des études indiquent cependant que la réduction d'émissions de méthane affecte les concentrations d'ozone à large échelle du fait du temps de vie pluriannuel du méthane atmosphérique. La réduction locale d'émissions de méthane aurait ainsi peu d'impact direct sur la pollution à l'ozone au voisinage des sources mais plutôt sur ses concentrations de fond. Diminuer efficacement les niveaux d'ozone via des réductions d'émissions de méthane nécessiterait donc des actions d'échelle nationale à internationale plutôt qu'uniquement locale (West & Fiore, 2005, Fiore et al. 2002).

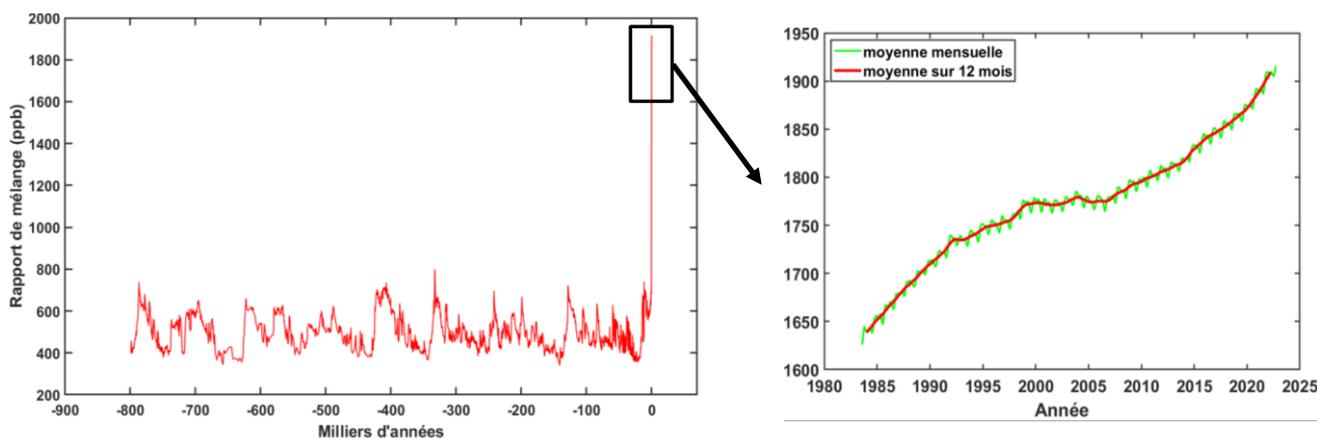


Figure 10 : Evolution temporelle du méthane atmosphérique. A gauche : reconstructions paléoclimatiques sur les 800 000 dernières années, prolongées par les observations atmosphériques de surface (données Louergue et al., 2008 ; Köhler et al., 2017 ; Lan et al., 2023, NOAA/GML) ; à droite : moyenne mondiale des observations de surface (données Lan et al. 2023, NOAA/GML).

3.2. L'estimation satellite

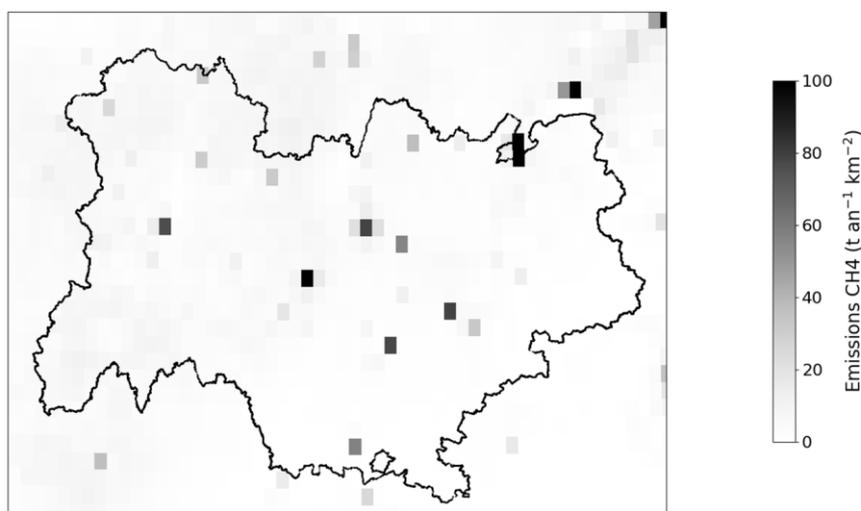
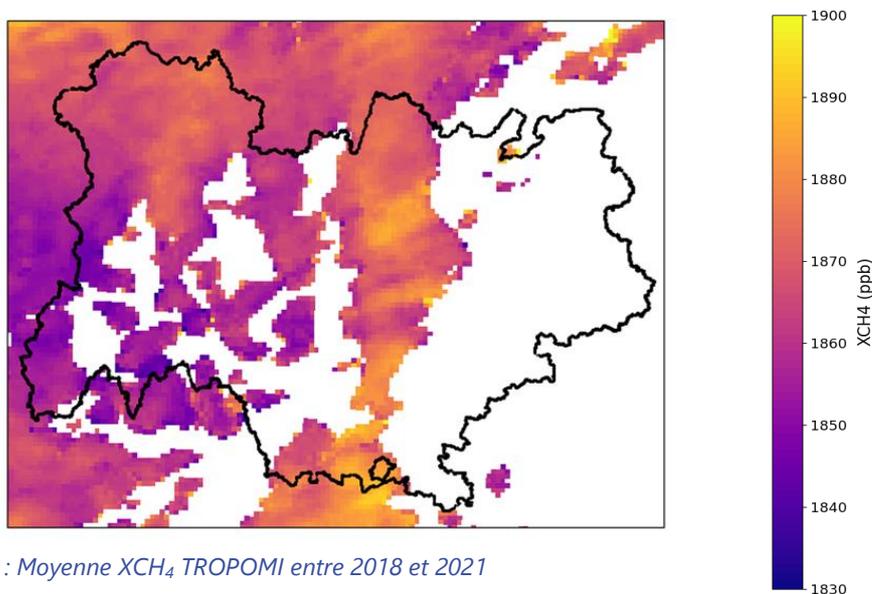
Plusieurs instruments satellites permettent aujourd'hui d'estimer le contenu atmosphérique en méthane. Les différentes méthodes de mesure existantes expliquent les différentes sensibilités, résolutions spatiales et temporelles des données satellites. Jacob et al. (2022) présentent une revue des missions passées, en cours et à venir pour quantifier les variations du méthane atmosphérique ainsi que ses sources, qu'elles soient régionales ou ponctuelles.

Ici, on utilise les données produites par l'instrument TROPOMI embarqué sur le satellite en orbite polaire Sentinel-5P. TROPOMI est un spectromètre sensible de l'ultraviolet au proche infrarouge, produisant des données avec une résolution spatiale d'environ 7 km*3.5 km au nadir, améliorée à partir d'août 2019 en 5.5 km * 3.5 km (Vigouroux et al., 2020 ; Veeffkind et al., 2012). On utilise les données TROPOMI L2 de fraction molaire de CH₄, moyenne sur la colonne atmosphérique (notées XCH₄) entre mai 2018 et janvier 2022, avec correction de biais. On estime le biais moyen des données entre -0.5 et +0.5 %, soit environ 90 ppb, à partir

des différences observées entre estimations satellites et mesures depuis le sol effectuées au voisinage de la région (Lambert et al., 2022). Un indicateur de qualité est associé à chaque donnée. Conformément aux recommandations des producteurs des données, on ne considère ici que les données d'indice de qualité (*qa_value*) supérieur à 0.5 (Apituley et al., 2021 ; Landgraf et al., 2021).

Les données TROPOMI ont été interpolées sur la grille spatiale régulière de CHIMERE pour faciliter les comparaisons avec les sorties de modèle. La carte moyenne de XCH₄ en région AuRA est présentée en Figure 11. Les zones en blanc correspondent à une absence de données, en particulier sur les reliefs. L'estimation du méthane à partir des observations TROPOMI n'est effectivement possible que dans certaines conditions. Celles-ci excluent en région l'essentiel des reliefs, la présence significative de nuages ou d'aérosols, ainsi que les données avec un angle zénithal solaire supérieur à 70 degrés (Lorente et al., 2021), invalidant l'essentiel des observations hivernales. Cela peut être constaté sur la Figure 13 avec très peu d'information pour les mois de janvier et décembre (voir aussi Figure 26, en annexe « Figures supplémentaires »).

On compare les niveaux atmosphériques de méthane mesurés entre 2018 et 2021 avec les émissions de méthane estimées par l'inventaire de CAMS en région sur la Figure 12 (voir aussi Figure 27). Des concentrations relativement plus élevées sont observables au niveau de l'agglomération lyonnaise, correspondant spatialement aux fortes émissions indiquées par les données CAMS. Mais il reste ici très difficile d'interpréter les cartes de méthane pour détecter des sources ponctuelles, car les gradients spatiaux sont atténués par l'orientation changeante des vents et les concentrations élevées de fond.



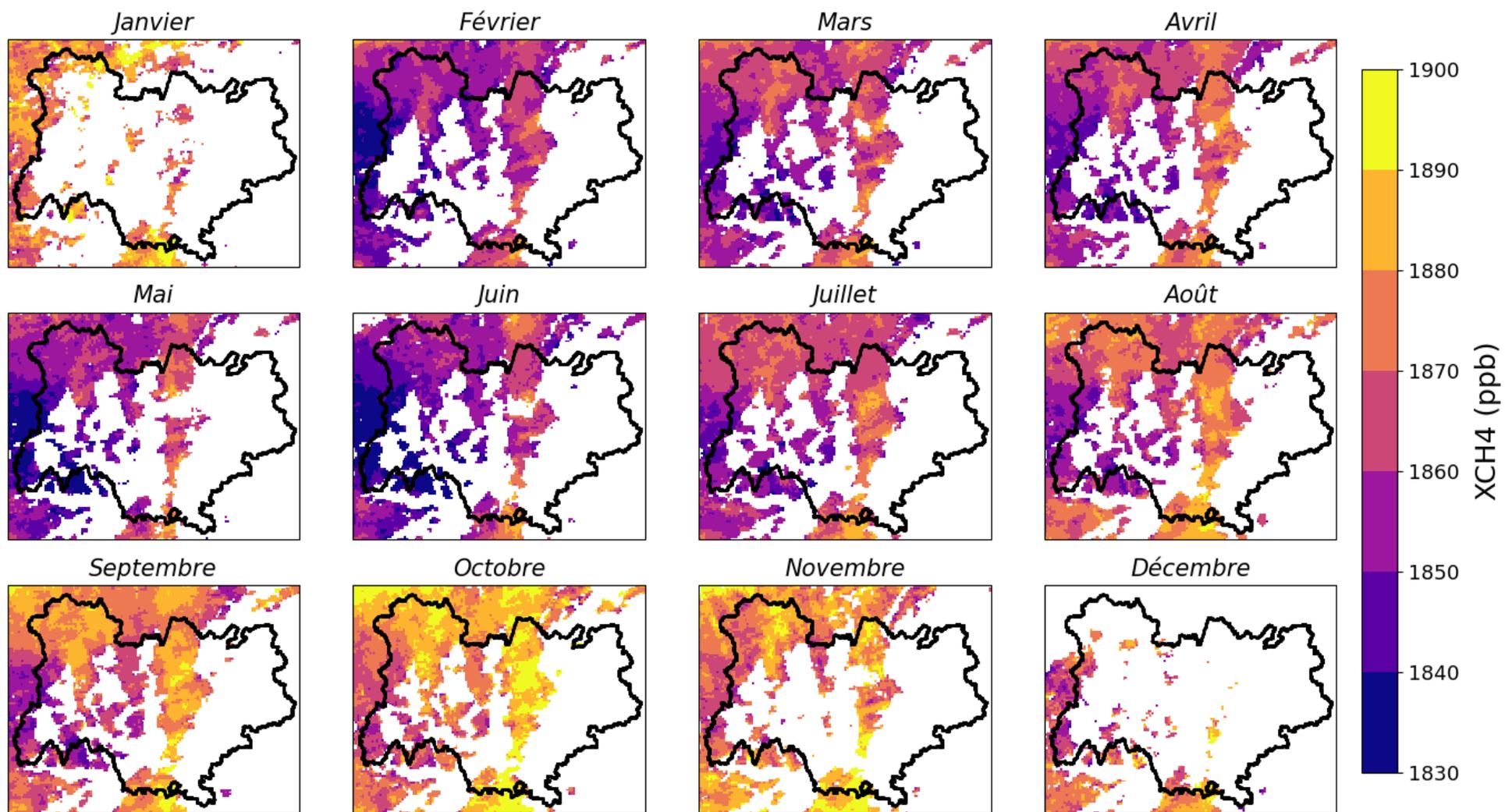


Figure 13 : Moyennes mensuelles des observations XCH₄ de TROPOMI (2018-2021)

3.3. Comparaison avec la modélisation d'Atmo

On s'intéresse à la cohérence entre les observations satellites et le cadastre régional d'émissions de méthane issu de l'inventaire d'Atmo AuRA. Pour cela, les données TROPOMI sont comparées aux simulations de CHIMERE coïncidentes en temps et en espace, sur les deux années complètes disponibles, 2020 et 2021. La comparaison montre une estimation de CHIMERE en moyenne plus forte d'une trentaine de ppb par rapport aux données satellites TROPOMI (Figure 14) ainsi qu'une variance spatiotemporelle des simulations plus importante que pour les observations (Figure 15). Sur l'ensemble du jeu de données de l'intercomparaison, on a ainsi des écarts-types $\sigma_{\text{CHIMERE}} = 44$ ppb et $\sigma_{\text{TROPOMI}} = 20$ ppb pour CHIMERE et TROPOMI, respectivement. On note aussi une corrélation spatiale faible d'environ 0.4 : le modèle arrive donc à reproduire environ 16 % de la variabilité spatiale de XCH_4 observée par TROPOMI sur la période 2020-2021.

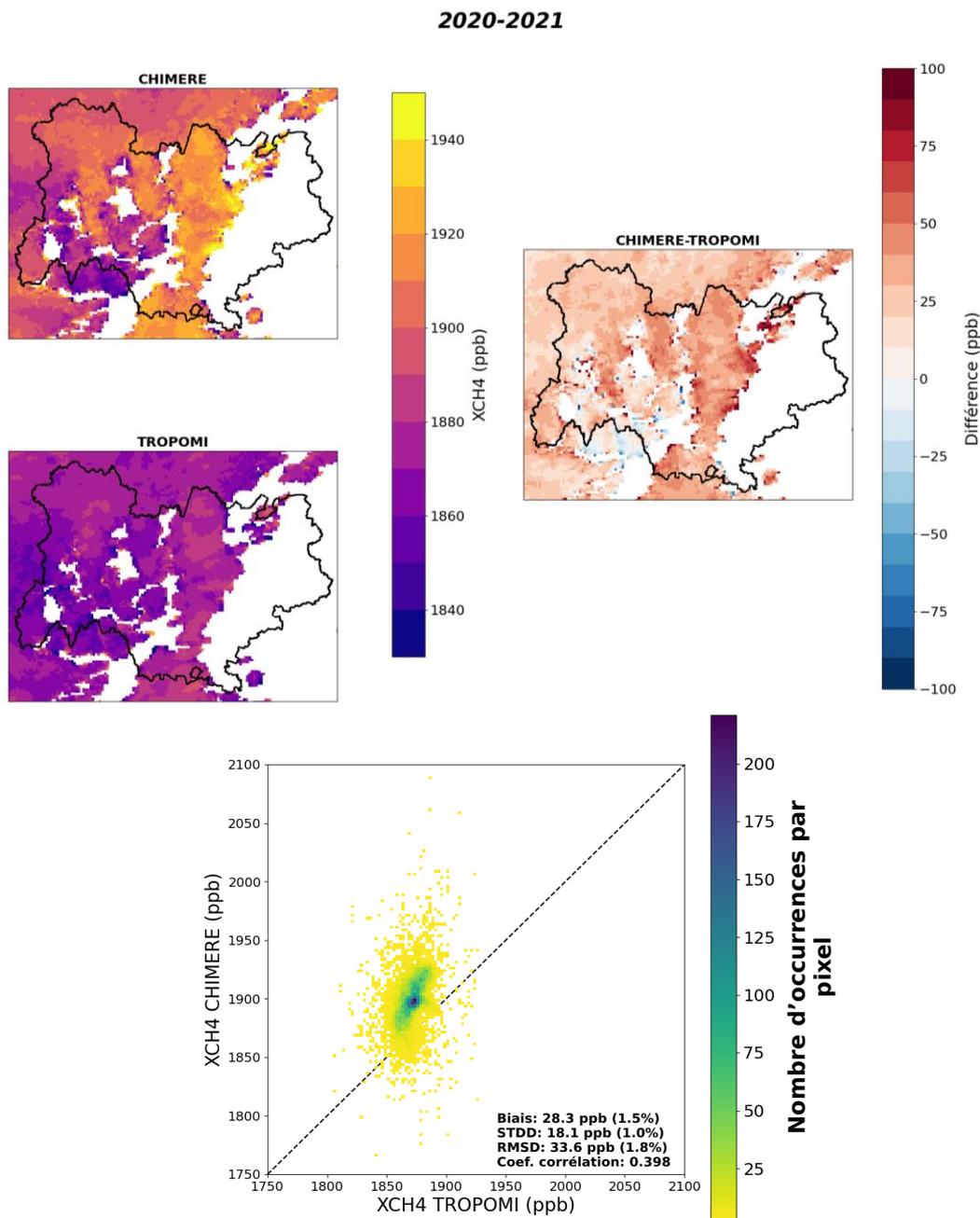


Figure 14 : Comparaison des simulations CHIMERE (a) et des estimations satellites TROPOMI (b) de XCH_4 coïncidentes temporellement et spatialement en région AuRA (2020-2021). En bas (d), histogramme à deux dimensions comparant les données des cartes CHIMERE et TROPOMI

Des pistes sont envisagées pour améliorer la comparaison. Les simulations CHIMERE ne fournissent pas d'information au-delà de 6 km d'altitude. On a alors fait ici l'hypothèse d'une équivalence $XCH_4 \approx XCH_{4\ 0-6\ km}$, avec XCH_4 la fraction molaire de CH_4 moyenne sur la colonne de la surface au sommet de l'atmosphère et $XCH_{4\ 0-6\ km}$ la fraction molaire de CH_4 , moyenne sur la colonne atmosphérique dans le domaine vertical de CHIMERE. Cependant, les rapports de mélange de CH_4 sont, dans les moyennes latitudes de l'hémisphère nord, en moyenne significativement plus faibles à haute altitude (e.g. Wofsy et al., 2011 ; Membrive, 2016). Une partie de la différence entre les simulations CHIMERE et les observations TROPOMI devrait ainsi être éliminée en utilisant un profil vertical type de méthane atmosphérique.

Aussi, il reste compliqué de comparer les variations temporelles de méthane atmosphérique issues de simulations et d'observations satellites. Sur la période 2020-2021, entre 75 et 85 données sont disponibles en chaque point de la région. Mais seulement une dizaine sont des données valides, un effectif très faible pour envisager des comparaisons par mois calendaire (Figure 16).

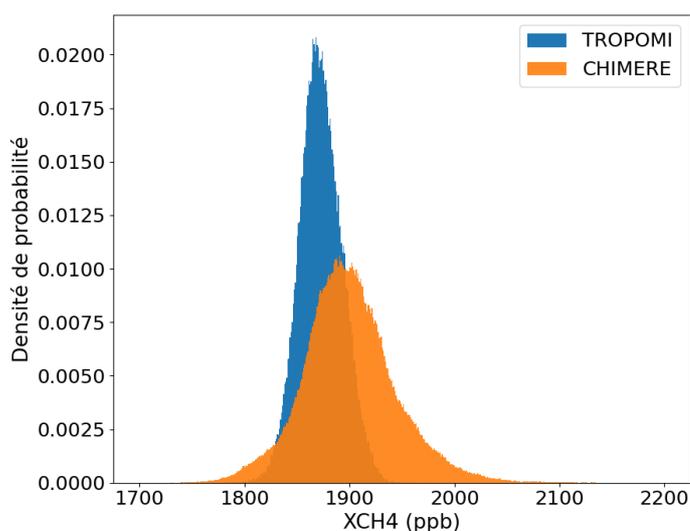


Figure 15 : Histogrammes de toutes les données CHIMERE et TROPOMI colocalisées entre 2020 et 2021 sur le domaine régional.

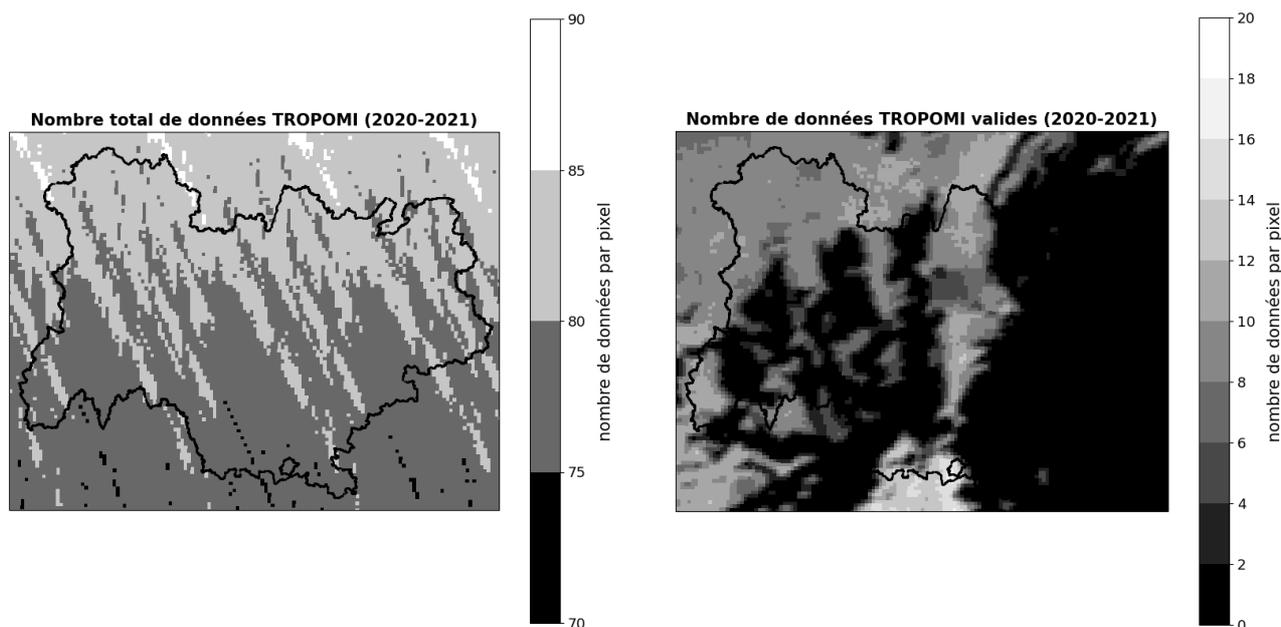


Figure 16 : Effectif des données TROPOMI CH_4 disponibles de 2020 à 2021. A gauche : répartition sur la région AuRA des données TROPOMI existantes sur la période d'intérêt. A droite : la même chose pour les données TROPOMI valides.

3.4. Conclusions et perspectives

Une cartographie régionale du méthane a été faite à partir des données de l'instrument TROPOMI. L'analyse repose encore sur peu de mesures et pourra être enrichie avec des séries temporelles plus longues. Les estimations IASI de CH₄ pourraient être une piste, avec des observations couvrant une quinzaine d'années, mais sont peu sensibles aux plus basses couches atmosphériques (Crevoisier et al., 2009 ; DeWachter et al., 2017).

Des outils permettent cependant d'estimer les émissions de méthane à partir d'un modèle de chimie-transport et d'observations atmosphériques par modélisation inverse (e.g. Berchet et al. (2021)). Ils permettent déjà d'estimer les émissions de sources ponctuelles fortes de méthane telles que des mines de charbon⁴, mais aussi d'autres variables comme les émissions de NO_x à échelle nationale (Lauvaux et al., 2022).

Le cas de la région Auvergne-Rhône-Alpes est délicat pour les observations TROPOMI de méthane, invalides sur une moitié de la superficie. Mieux comprendre les atouts et limites de ces données nécessitera de les considérer à plus large échelle, comme l'échelle nationale.

⁴ Voir aussi <https://app.world-emission.com>

4. Autres usages des données satellites

On présente ici d'autres utilisations possibles des données satellites pour le suivi de la qualité de l'air. Un résumé des espèces identifiées et leur intérêt est présenté pour les instruments IASI (Tableau 1), TROPOMI (Tableau 2) et CrIS (Tableau 3).

4.1. L'ozone troposphérique

Bien que l'ozone atmosphérique soit détecté par satellite depuis 1960, sa composante troposphérique est isolée de la colonne totale bien plus tard (Krueger et al., 1980 ; Fishman et al., 1990). Des méthodes existent désormais pour estimer les concentrations en ozone dans la troposphère basse en-dessous de 3 km d'altitude (e.g. Cuesta et al. (2013)) mais ne renseignent pas directement sur les niveaux de surface. Ces données sont cependant précieuses et peuvent corriger les prévisions des modèles de qualité de l'air via le procédé d'assimilation de données (cf. Section 4.4).

L'essentiel des observations satellites se fait par des instruments embarqués sur satellites défilants comme IASI, avec une couverture spatiale étendue mais une résolution temporelle faible. L'instrument **EPIC** (Earth Polychromatic Imaging Camera) embarqué sur le satellite **DSCOVR** (Deep Space Climate Observatory) permet de décrire le cycle diurne de l'ozone troposphérique avec une résolution temporelle d'une à deux heures sur l'hémisphère éclairé par le Soleil (Marshak et al., 2018 ; Kramarova et al., 2021). La Figure 17 présente un exemple de ces données.

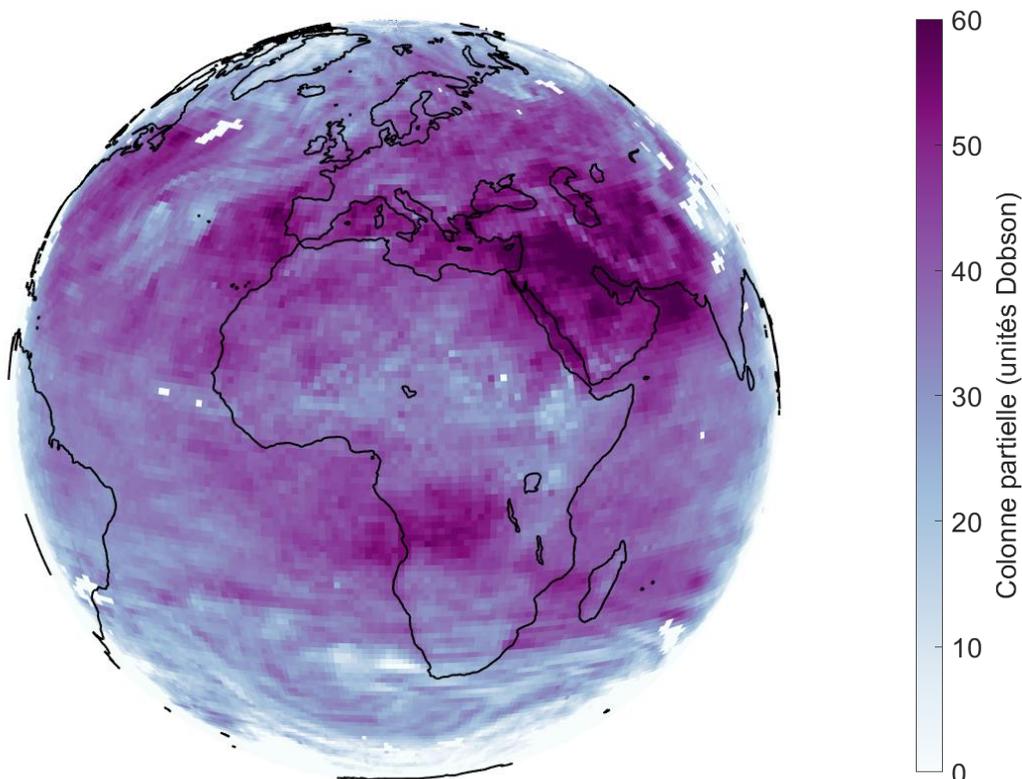


Figure 17 : Ozone troposphérique le 3 août 2018 à 10:53 (UTC), estimé à partir des observations de l'imageur DSCOVR/EPIC.

4.2. Les composés organiques volatils

La télédétection satellite se consacre aussi à l'estimation du contenu atmosphérique en composés organiques volatils (**COVs**), comme illustré par les Tableaux 1 à 3. Des études récentes ont ainsi produit à partir des observations IASI des estimations d'acide acétique (CH_3COOH) et acide formique (HCOOH) (Franco et al., 2020), acétone (Franco et al., 2019), méthanol (CH_3OH , Franco et al., 2018), ou encore de peroxyacétylnitrate (PAN, Franco et al., 2018), une espèce agissant comme un réservoir atmosphérique d'oxydes d'azote. Récemment, Franco et al. (2022) ont aussi produit une estimation satellite IASI de l'éthylène atmosphérique (C_2H_4), un COV à fort potentiel de formation d'ozone, et de sa répartition spatiale mondiale sur la période 2008-2020. Sa répartition sur la France métropolitaine est représentée en Figure 18 (voir aussi répartition mondiale en Figure 28, annexe Figures supplémentaires). Les données présentées sont « super-échantillonnées » et ont subies un ajustement de l'orientation des vents (**WASS**, wind-adjusted supersampling) permettant d'augmenter le contraste sur les panaches en aval des sources d'émission (Clarisse et al., 2019).

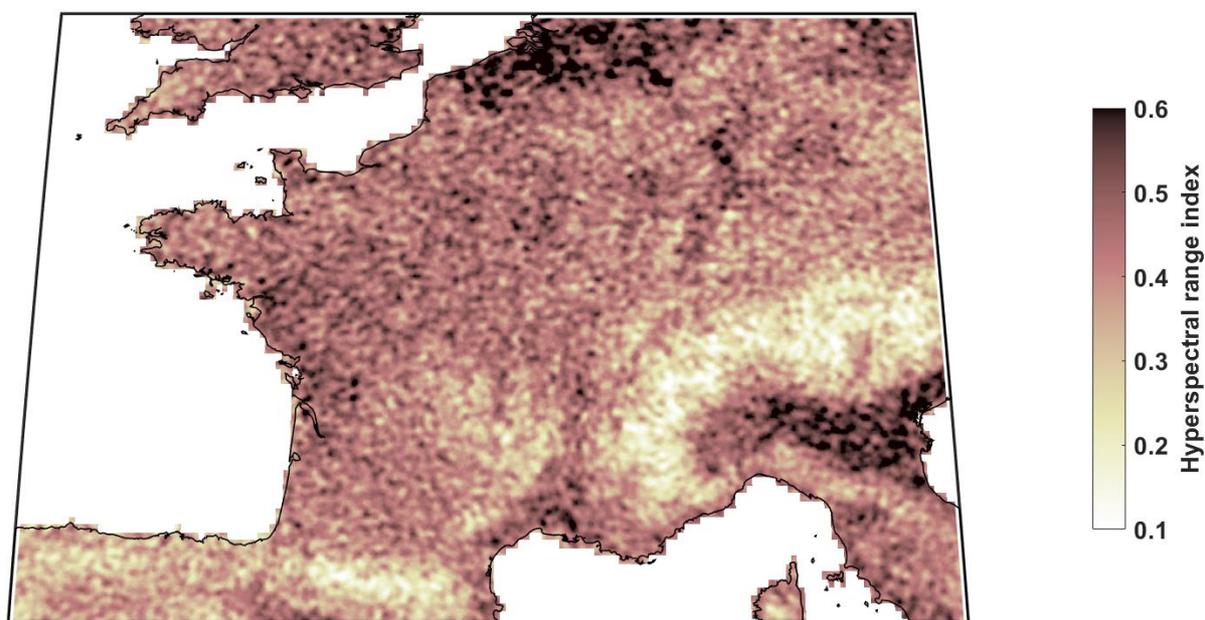


Figure 18 : Ethylène atmosphérique (C_2H_4) en France métropolitaine, estimé par l'instrument satellite IASI. Moyenne 2008-2020 (données Franco et al. (2022)). Données super-échantillonnées avec ajustement de l'orientation des vents.

Sur la Figure 19, on compare à l'échelle régionale les estimations satellites d'éthylène aux colonnes partielles simulées par le modèle CHIMERE entre 2020 et 2021⁵. On retrouve sur les deux jeux de données des niveaux plus élevés de C_2H_4 sur le couloir rhodanien, avec aussi des hautes valeurs apparemment cohérentes en agglomérations de Lyon, Grenoble, Annecy ou encore Salaise-sur-Sanne. D'autres lieux montrent des niveaux atmosphériques importants comme au voisinage de Thizy-les-Bourgs (Rhône) ou encore d'un site de stockage gazier près de Bresse Vallons (Ain). Des émissions significatives de COVs y sont recensées par l'inventaire, mais peu apparentes sur les simulations CHIMERE. Cela peut en partie s'expliquer par l'application du WASS aux données satellites tandis que les simulations n'ont pas d'ajustement d'orientation des vents et ont ainsi des panaches d'émission plus étalés spatialement. Une autre partie de l'explication pourrait venir de la quantification des émissions par l'inventaire devant être affinée.

⁵ On considère uniquement ces deux années, car Atmo ne conserve que les concentrations de surface pour les années précédentes

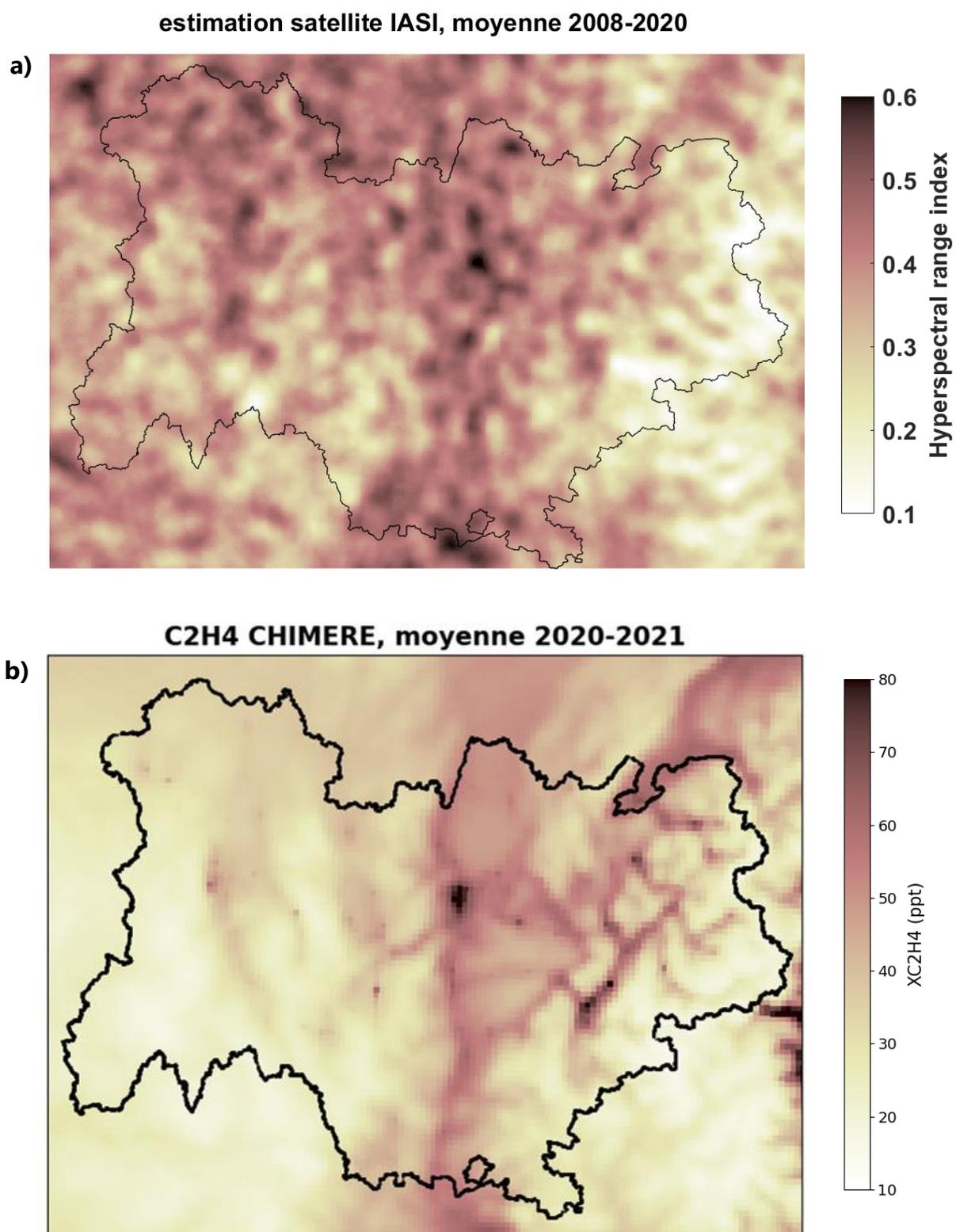


Figure 19 : Comparaison de l'éthylène atmosphérique estimé a) par IASI (colonnes totales, 2008-2020) et b) par le modèle CHIMERE (colonnes partielles entre la surface et ~6 km d'altitude, 2020-2021)

Tableau 1 : Composés atmosphériques estimés à partir des observations IASI (liste non exhaustive)

Composé atmosphérique détecté	Formule	Référence	Intérêt	Temps de vie atmosphérique
Acétone	C ₃ H ₆ O	Franco et al. (2019)	COV oxygéné, contribue à la formation de PAN et de HO _x . Affecte le temps de vie du méthane. Sources mal connues et quantifiées	15-35 jours
Acétylène	C ₂ H ₂	Duflot et al. (2015)	Indicateur de sources de combustion. Emis principalement par les biocarburants. Précurseurs d'aérosols organiques secondaires.	2-4 semaines
Acide acétique	CH ₃ COOH	Franco et al. (2020)	Contribuent aux pluies acides. Présents dans les particules (ions formate et acétate). Produits possiblement par oxydation (OH) et ozonolyse de l'isoprène et de monoterpènes, mais aussi émissions directes. Mesures permettent d'identifier des défauts de description des chaînes d'oxydation du carbone.	~2-10 jours
Acide formique	HCOOH	Franco et al. (2020, 2018)		~ 3-25 jours
Ammoniac	NH ₃	Van Damme et al. (2017)	Précurseur de particules inorganiques secondaires. Emis principalement par les activités agricoles.	Quelques heures (IPCC (2021), Table 6.1)
Cyanure d'hydrogène	HCN	Duflot et al. (2015)	Indicateur de sources de combustion et de transport atmosphérique. Emis principalement par la combustion de biomasse (+ biocarburants et combustibles fossiles).	5-6 mois
Dioxyde de carbone	CO ₂	Crevoisier et al. (2009a)	Gaz à effet de serre. Emis principalement par la combustion d'énergies fossiles, la production de ciment et la déforestation (Friedlingstein et al., 2022).	<ul style="list-style-type: none"> - Après quelques décennies : 70 à 50 % restants - Après 1 000 ans : 15 à 40 % restants. - Après 10 000 ans : 10 à 25 % restants. Retour aux niveaux préindustriels : quelques centaines de milliers d'années (Ciais et al., 2013).
Dioxyde de soufre	SO ₂	Clarisse et al. (2014, 2012)	Emis principalement par la combustion de charbon et de pétrole. Emissions naturelles volcaniques. Précurseur d'aérosols inorganiques secondaires	<ul style="list-style-type: none"> - Troposphère : quelques jours. - Stratosphère : quelques semaines (IPCC (2021), Table 6.1)
Ethylène	C ₂ H ₄	Franco et al. (2022)	Emis par combustion de biomasse, énergies fossiles et biocarburants, industries lourdes, production	Quelques heures

			industrielle de C ₂ H ₄ . Précurseur d'O ₃ et de HCHO. Traceur des émissions anthropiques de COVs et de la pollution de l'air liée aux polluants carbonés réactifs.	
Méthane	CH ₄	Crevoisier et al. (2009b, 2013), De Wachter et al. (2017), Siddans et al. (2017)	Emis principalement par agriculture, combustion d'énergies fossiles, zones humides. Gaz à effet de serre, précurseur d'ozone.	~9 ans (IPCC (2021), Table 6.2)
Méthanol	CH ₃ OH	Franco et al. (2018)	Un des COV les plus abondants et plus émis dans l'atmosphère. Provient de la végétation, les océans, la combustion de biomasse, émissions anthropiques et oxydation d'autres COVs. Contribue à la formation de CO, HCHO et d'O ₃ . Affecte les niveaux d'OH.	Quelques jours
Monoxyde de carbone	CO	Hurtmans et al. (2012), Kerzenmacher et al. (2012), George et al. (2015)	Emis par combustion incomplète de biomasse et de combustibles fossiles. Produit aussi par oxydation de CH ₄ et de COVNM. Traceur de pollution.	1 à 4 mois (IPCC (2021), Table 6.1)
Ozone	O ₃	Boynard et al. (2018), Hurtmans et al. (2012)	Polluant réglementé.	Quelques heures à quelques semaines (IPCC (2021), Table 6.1)
Nitrate de peroxyacétyle (PAN)	CH ₃ COO ₂ NO ₂	Franco et al. (2018)	Issu de l'oxydation de COVs en présence d'oxydes d'azote. Espèce réservoir de NOx. Traceur de photochimie.	≥ quelques jours
Protoxyde d'azote	N ₂ O	Chalinel et al. (2022), Garcia et al. (2018), Barret et al. (2021)	Gaz à effet de serre. Issu principalement de l'agriculture.	~109 ans (temps de résidence, IPCC (2021), Chap. 5.2.3.1)

(Suite Tableau 1)

Tableau 2 : Composés atmosphériques estimés à partir des observations TROPOMI (liste non exhaustive)

Composé atmosphérique détecté	Formule	Référence	Intérêt	Temps de vie atmosphérique
Dioxyde d'azote	NO ₂	Van Geffen et al. (2022), Griffin et al. (2019)	Polluant réglementé, précurseur d'ozone, influence les niveaux d'OH et raccourcit la durée de vie du CH ₄ .	Quelques heures à quelques jours
Dioxyde de soufre	SO ₂	Fioletov et al. (2020)	(cf. Tableau 1)	(cf. Tableau 1)
Formaldéhyde	HCHO	Vigouroux et al. (2020), De Smedt et al. (2018)	Produit d'oxydation de COVs dont isoprène, principalement issu du CH ₄ si éloigné des sources. Utilisé pour identifier sources d'émissions d'isoprène et d'autres COVs d'origine biogénique, pyrogénique et anthropique (Lerot et al., 2021 et références incluses).	Quelques heures
Glyoxal	CHOCHO	Lerot et al. (2021), Chen et al. (2022)	Sources similaires à HCHO, mais avec efficacité de production différente. Utilisé en combinaison avec les données HCHO, pour différencier par types d'émissions de COVs.	Quelques heures
Méthane	CH ₄	Hu et al. (2019)	(cf. Tableau 1)	(cf. Tableau 1)
Monoxyde de carbone	CO	Borsdorff et al. (2019)	(cf. Tableau 1)	(cf. Tableau 1)
Ozone	O ₃	Garane et al. (2019)	(cf. Tableau 1)	(cf. Tableau 1)

Tableau 3 : Composés atmosphériques estimés à partir des observations CrIS (liste non exhaustive)

Composé atmosphérique détecté	Formule	Référence	Intérêt	Temps de vie atmosphérique
Ammoniac	NH ₃	Shephard et al. (2020)	(cf. Tableau 1)	(cf. Tableau 1)
Isoprène	C ₅ H ₈	Fu et al. (2019), Wells et al. (2020, 2022)	COVNM prédominant. Joue un rôle majeur dans la formation d'ozone, la production de particules organiques secondaires et le cycle de l'azote. C'est un puits d'OH. Incertitudes importantes sur ses émissions, son impact sur OH	Entre ~1 heure et ~1 jour selon les niveaux de radicaux OH (Wells et al., 2020)
Nitrate de peroxyacétyle (PAN)	CH ₃ COO ₂ NO ₂	Payne et al. (2022)	(cf. Tableau 1)	(cf. Tableau 1)

4.3. Les évolutions à long terme

Des produits fusionnant des données issues de plusieurs missions satellites permettent d'estimer l'évolution de la composition de l'atmosphère à l'échelle multi-décennale. Par exemple, les données TM4NO2A sont utilisées dans le sixième rapport d'évaluation du GIEC pour décrire les variations du dioxyde d'azote atmosphérique dans les différentes régions du monde entre 1996 et 2016 (IPCC (2021), Chap. 6.3.3.1). Pour cela, elles fusionnent les observations NO₂ des missions satellites GOME, SCIAMACHY et GOME-2 (Georgoulias et al., 2019). La Figure 20 illustre avec ces données la baisse moyenne des niveaux de NO_x sur l'Europe entre 1996 et 2017. Pour des études multi-décennales, on peut aussi mentionner l'existence de données de formaldéhyde troposphérique (HCHO), en développement sur la période 1997-2020 (QA4ECV, 2022).

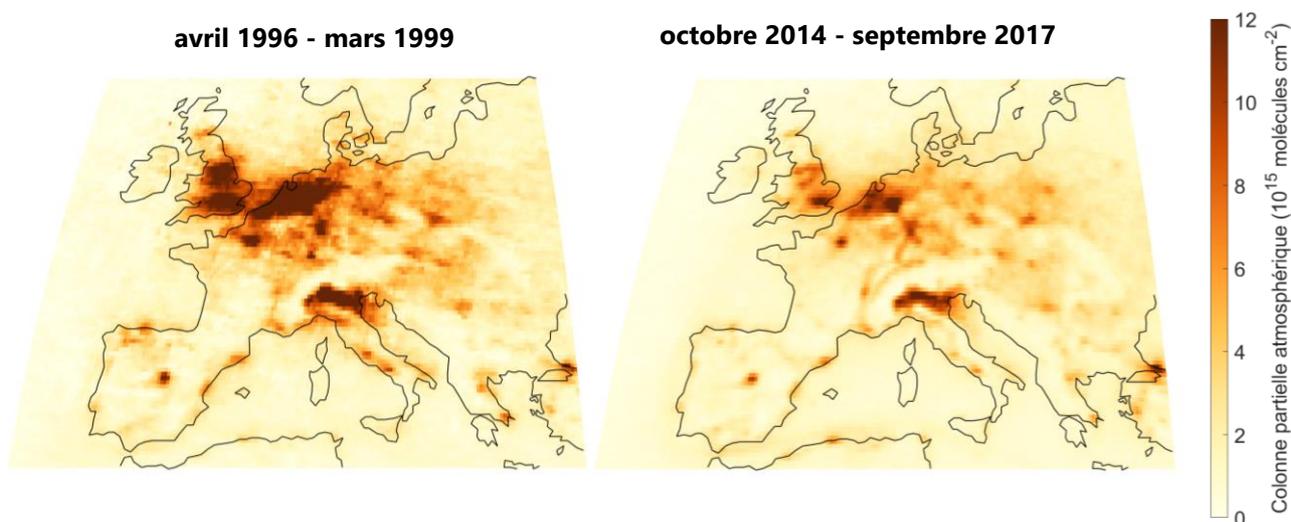


Figure 20 : Estimations satellites de NO₂ troposphérique entre 1996 et 1999 (à gauche) et entre 2014 et 2017 (à droite). Données TM4NO2A (Georgoulias et al. 2019).

4.4. L'assimilation de données

Une autre approche pour avoir une vue la plus complète de la composition de l'atmosphère dans le temps et l'espace, et intégrant les données satellites, est la production d'analyses et de réanalyses via l'assimilation de données. L'analyse est une simulation numérique ajustée par des observations. Pour la composition de l'air, l'analyse se base sur un modèle météorologique et un modèle de chimie-transport, et intègre des observations météorologiques et de composition de l'air. La réanalyse est équivalente mais vise à produire des données cohérentes sur des échelles de temps multi-décennales et assimile les observations avec plus de recul sur leur qualité. Ce type de données fournit par exemple une information sur les concentrations d'ozone de surface tenant compte à la fois des mesures au sol réglementaires mais aussi des colonnes troposphériques d'ozone observées par satellite.

La réanalyse européenne diffusée par CAMS assimile ainsi des données satellites de dioxyde d'azote (NO₂), dioxyde de soufre (SO₂) et de monoxyde de carbone (CO) en plus de nombreuses observations réglementaires de surface (Collin, 2021, voir aussi Tableau 4). Ce travail d'assimilation devrait être étendu à d'autres espèces chimiques dans le cadre du projet européen **CAMEO** (CAMS Service Evolution) de 2023 à 2025⁶.

⁶ <https://doi.org/10.3030/101082125>

Tableau 4 : Données satellites assimilées par les modèles membres de la réanalyse européenne CAMS. Informations extraites de Collin (2021).

Modèle\Espèce	NO₂	SO₂	CO	Epaisseur optique d'aérosols
CHIMERE				
DEHM				
EMEP	OMI			
EURAD-IM	OMI (colonne) GOME-2 (colonne)	OMI (colonne) GOME-2 (colonne)	MOPITT (profil) IASI (colonne partielle)	
GEM-AQ				
LOTOS-EUROS	OMI			
MATCH				
MOCAGE				
SILAM	En tests (colonnes)			En tests (colonnes)

5. Conclusion et perspectives

Ce travail a permis d'étudier le potentiel de diverses données satellites pour compléter la surveillance de la qualité de l'air réalisée par Atmo AuRA. Des travaux sur l'ammoniac ont permis de caractériser ses variations spatiales et temporelles dans l'atmosphère à partir des données IASI, et de mettre en évidence une corrélation entre les contenus intégrés estimés par satellite et les observations de surface. La comparaison entre estimations satellites et modélisations atmosphériques intégrant le cadastre d'émissions d'Atmo montre des différences significatives. Celles-ci nécessiteront de plus amples investigations, en particulier pour les émissions d'ammoniac inventoriées au nord du Puy-de-Dôme.

Ce travail a également permis de développer des outils d'extraction, de suréchantillonnage et d'analyse des observations satellites et de les comparer aux modélisations et mesures atmosphériques effectuées par Atmo. L'utilisation des données satellites TROPOMI a montré qu'il existe actuellement des limites pour étudier le méthane à l'échelle régionale : seul un faible nombre d'observations sont disponibles du fait d'un historique court couvrant ici moins de 3 ans et de conditions strictes nécessaires pour produire des données valides. Une moitié de la région n'est ainsi pas renseignée du fait des reliefs.

L'estimation satellite du contenu atmosphérique en différentes espèces chimiques est un domaine de recherche très actif. De nouveaux jeux de données sont régulièrement mis à disposition du public, et de nouvelles méthodes d'estimation et d'analyse se développent progressivement. L'information fournie par la télédétection spatiale est précieuse et complémentaire des observations et de l'inventaire d'émissions développés par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes. La modélisation numérique de colonnes atmosphériques pourrait permettre d'évaluer la cohérence des inventaires avec les observations satellites, à partir de plusieurs années de simulations CHIMERE comprenant l'information sur la verticale. A plus longue échéance, les données satellites pourraient être assimilées dans les simulations numériques régionales et améliorer la prévision de la qualité de l'air. Des sujets comme l'assimilation de données satellites et la modélisation inverse des émissions de polluants sont cependant des chantiers vastes qui font encore l'objet de travaux de recherche académique notamment à l'échelle européenne dans le cadre du programme Copernicus. A l'échelle de la France aussi, des projets de recherche sont en cours, comme ARGONAUT qui vise à estimer les émissions territoriales d'oxydes d'azote, de monoxyde de carbone, de composés organiques volatils (COV) et de CO₂. Atmo suit attentivement ces développements pour identifier leurs limites actuelles comme leur potentiel prochain.

De futures missions satellites viendront aussi enrichir notre connaissance de la composition de l'atmosphère en région. Que ce soit avec les instruments IRS et IASI-NG pour décrire l'ammoniac, l'ozone et les COVs, 3MI pour les aérosols, ou Sentinel-5 et CO2M pour le méthane et le dioxyde de carbone, l'observation spatiale de la Terre sera un support des activités d'Atmo.

Aussi, la télédétection satellite peut soutenir le suivi de la qualité de l'air en renseignant d'autres variables environnementales que celles décrivant la composition de l'air. L'éclairement solaire incident à la surface de la Terre par exemple est une variable climatique essentielle qui joue un rôle dans la photochimie atmosphérique et dans le cycle de l'ozone troposphérique. L'estimation satellite permet de décrire l'éclairement avec bien plus de précision que les modèles météorologiques tels que celui utilisé par Atmo, et de renseigner ses variations passées depuis les années 1980 (Jimenez et al., 2016, 2022 ; Pfeifroth et al., 2018). Atmo traitera ce sujet dans le cadre de son action région 2023.

Annexes

Figures supplémentaires

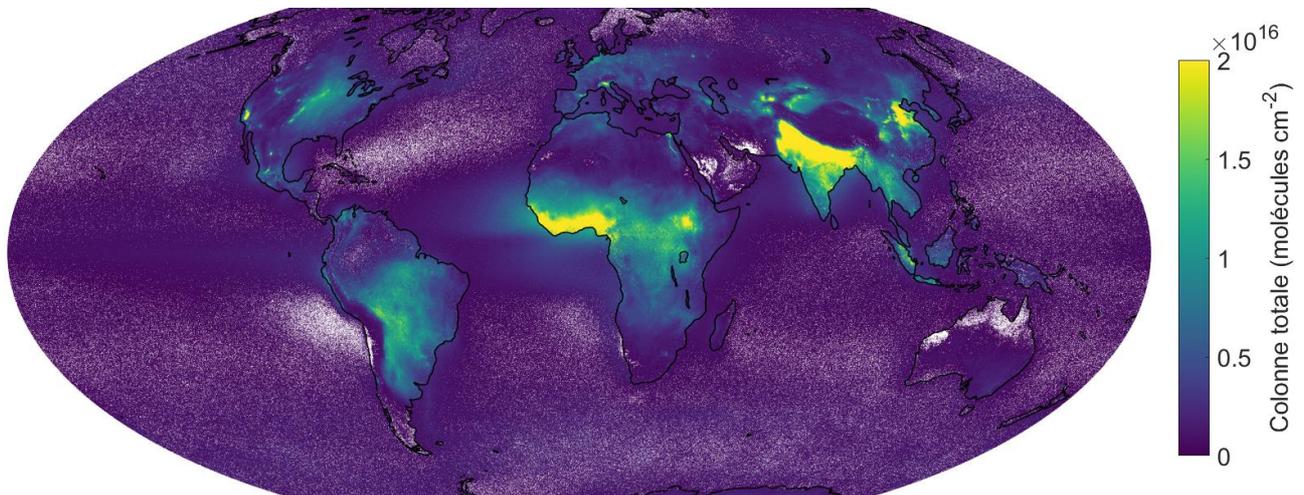


Figure 21 : Répartition mondiale de l'ammoniac atmosphérique entre 2008 et 2016 (données Van Damme et al. (2018a)). Echelle de couleurs linéaire.

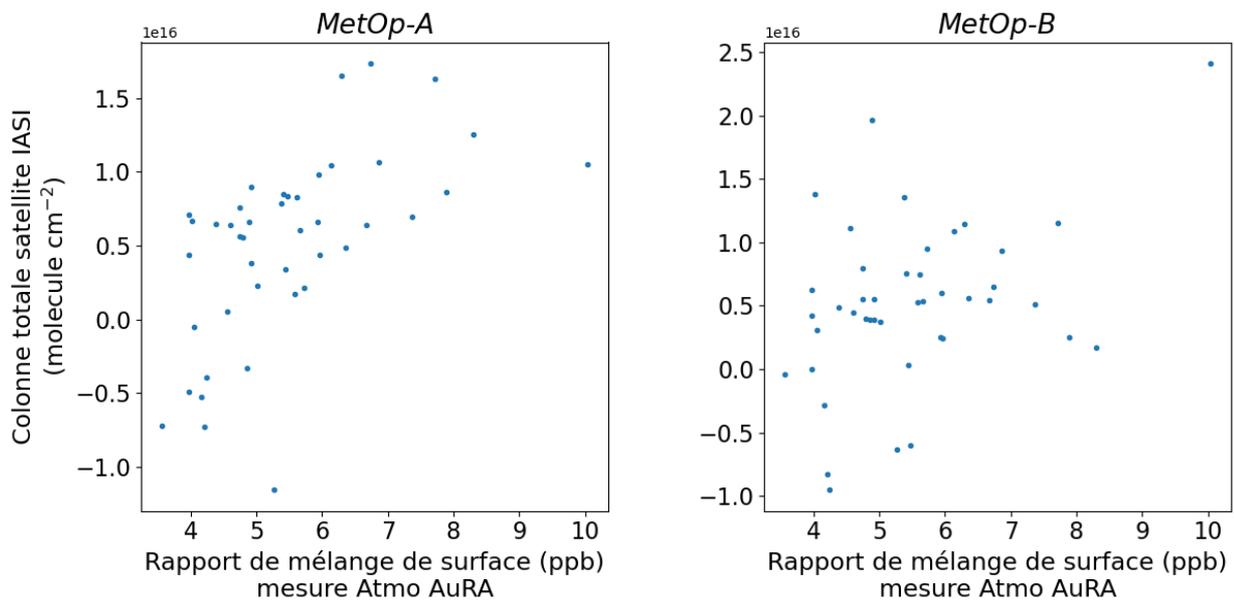


Figure 22 : Corrélogrammes entre mesures d'ammoniac de surface et estimations satellites IASI d'ammoniac atmosphérique à Lyon centre (colonnes totales) entre 2016 et 2020 (moyennes mensuelles). A gauche : pour les données MetOp-A/IASI ; à droite : pour les données MetOp-B/IASI

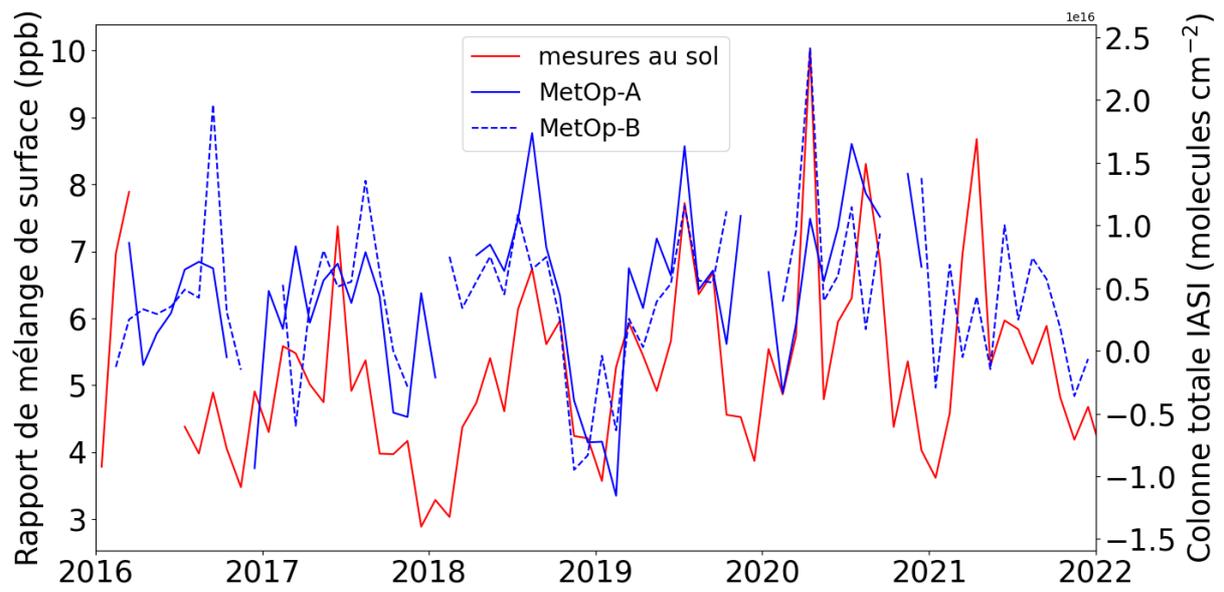


Figure 23 : Estimations à Lyon centre de l'ammoniac atmosphérique à partir des données L2 suréchantillonnées des instruments IASI embarqués sur les satellites MetOp-A et MetOp-B, et mesures de surface colocalisées d'Atmo AuRA.

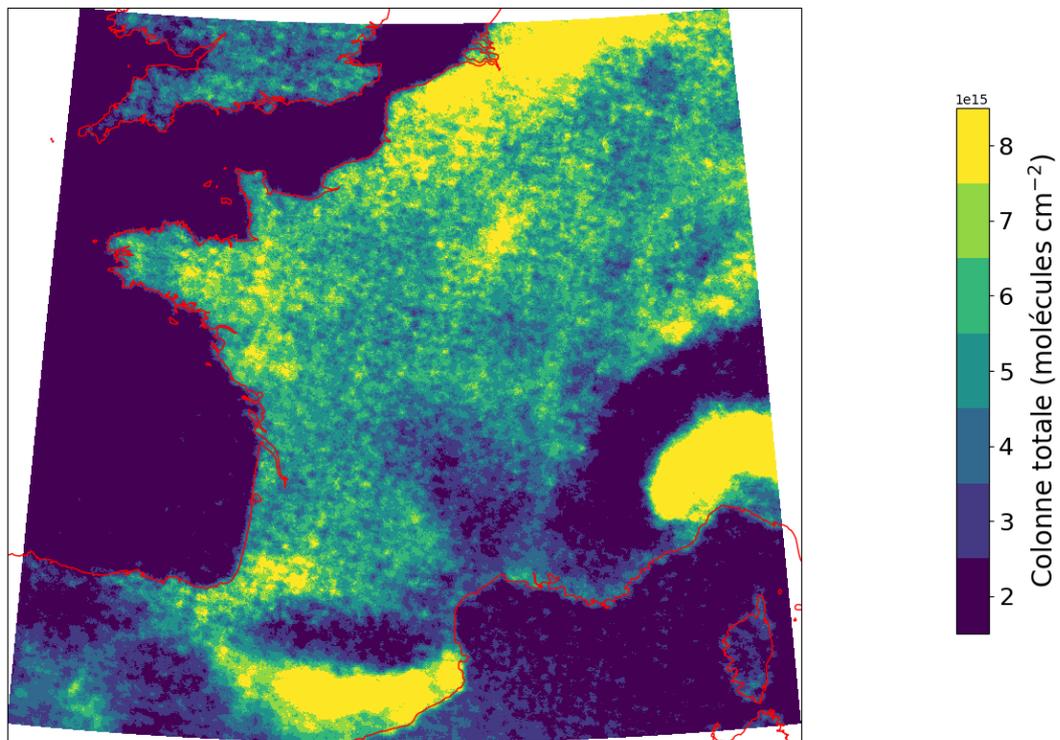
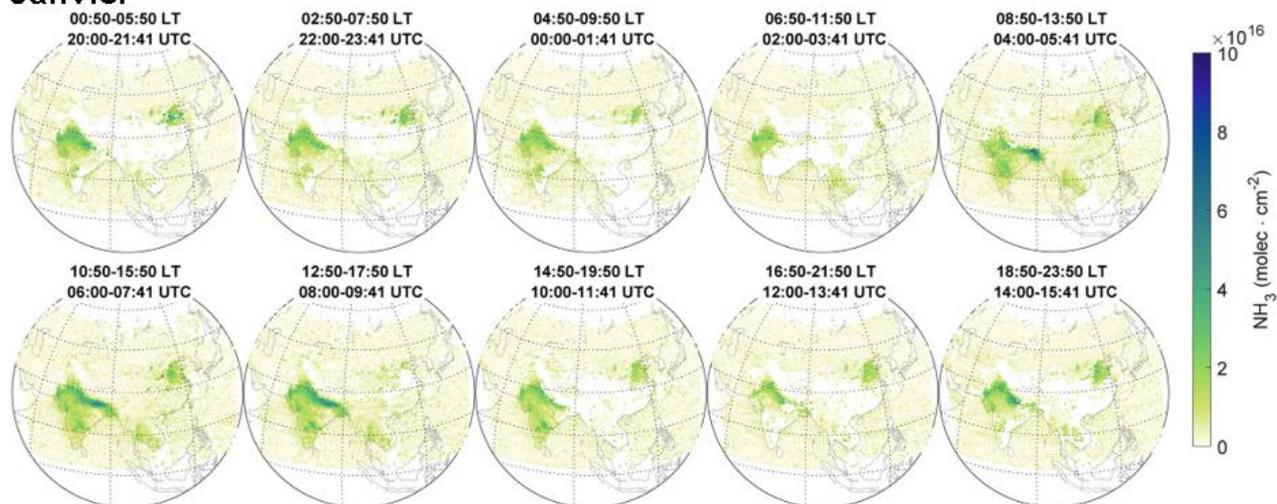
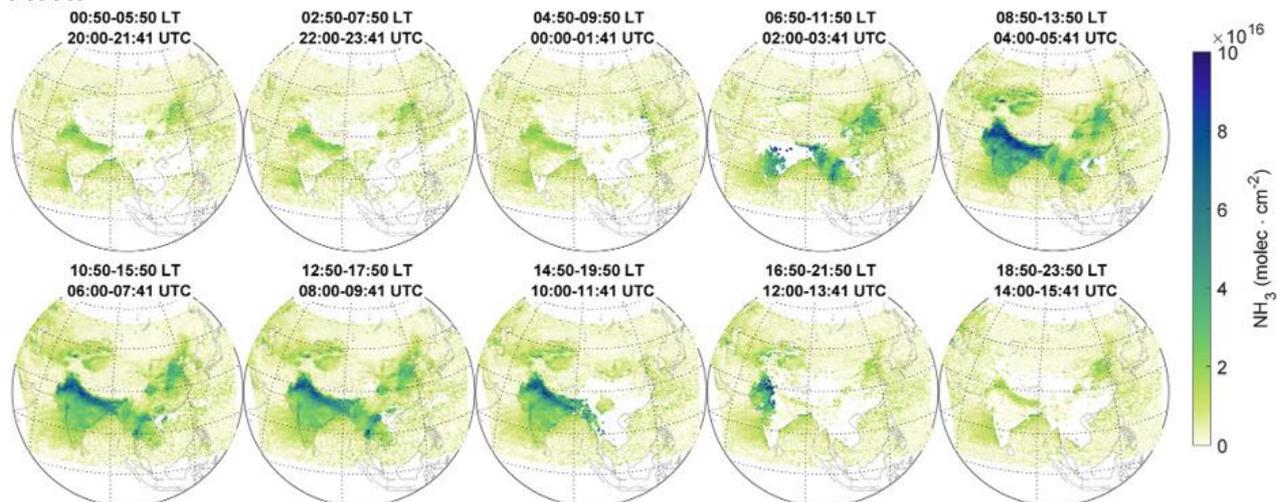


Figure 24 : Répartition de l'ammoniac atmosphérique estimé entre 2008 et 2020 en France métropolitaine par l'instrument satellite IASI (données suréchantillonnées).

Janvier



Avril



Juillet

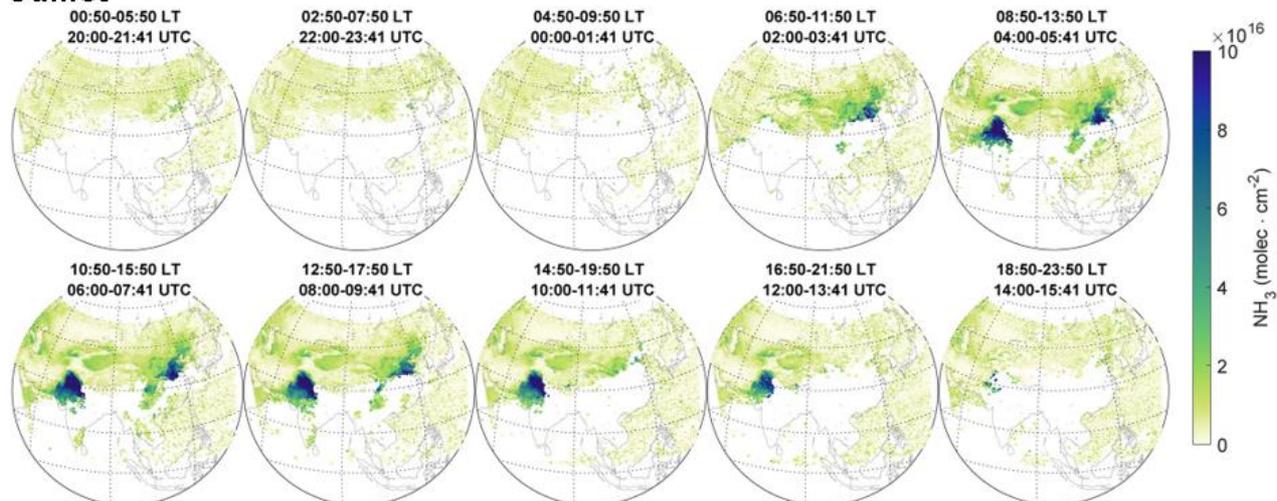


Figure 25 : Cycle journalier du NH_3 atmosphérique estimé depuis le satellite Fengyun-4A. LT= heure locale, UTC= temps universel. Figure issue de Clarisse et al. (2021).

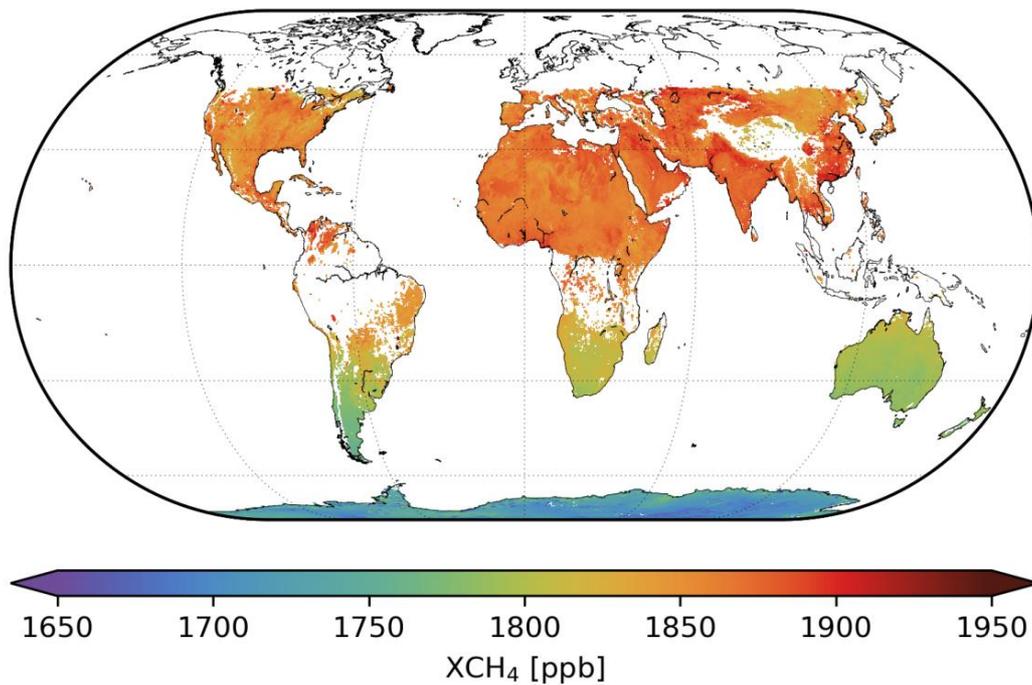


Figure 26 : Carte mondiale de XCH_4 moyennant les données TROPOMI entre le 12 novembre et le 30 décembre 2017. Noter la limite de latitude au nord de laquelle aucune donnée n'est disponible. Cette limite correspond au critère d'exclusion des données avec un angle zénithal solaire supérieur à 70 degrés. Figure extraite de Apituley et al. (2021).

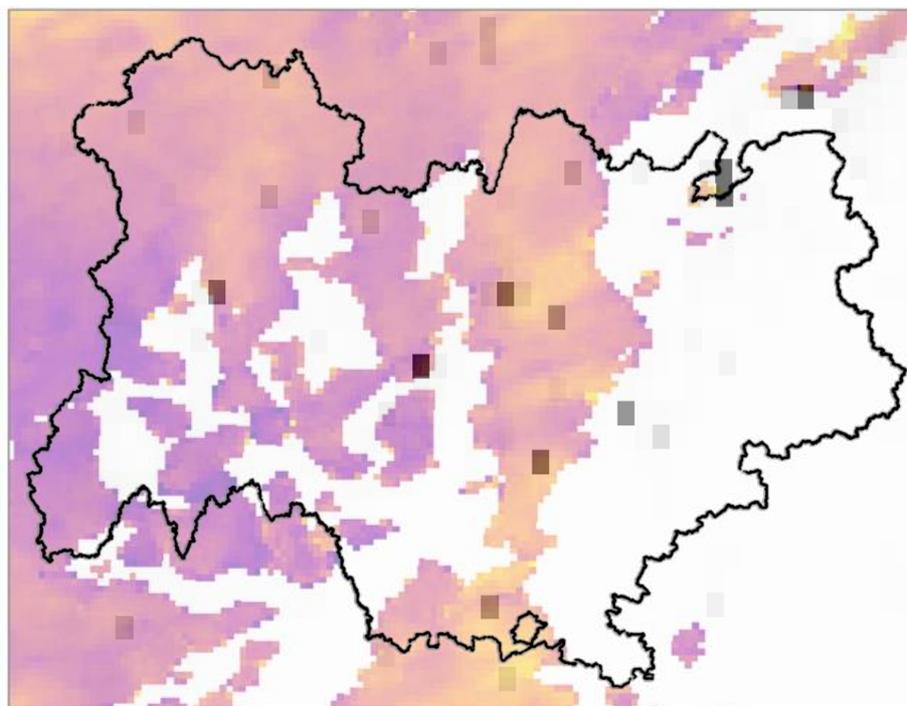


Figure 27 : Superposition des cartes de CH_4 atmosphérique (TROPOMI, 2018-2021) et d'émissions de méthane CAMS (2018-2020) (cf. Figure 11 et Figure 12)

Ethylène atmosphérique (C₂H₄)

estimation satellite IASI, moyenne 2008-2020

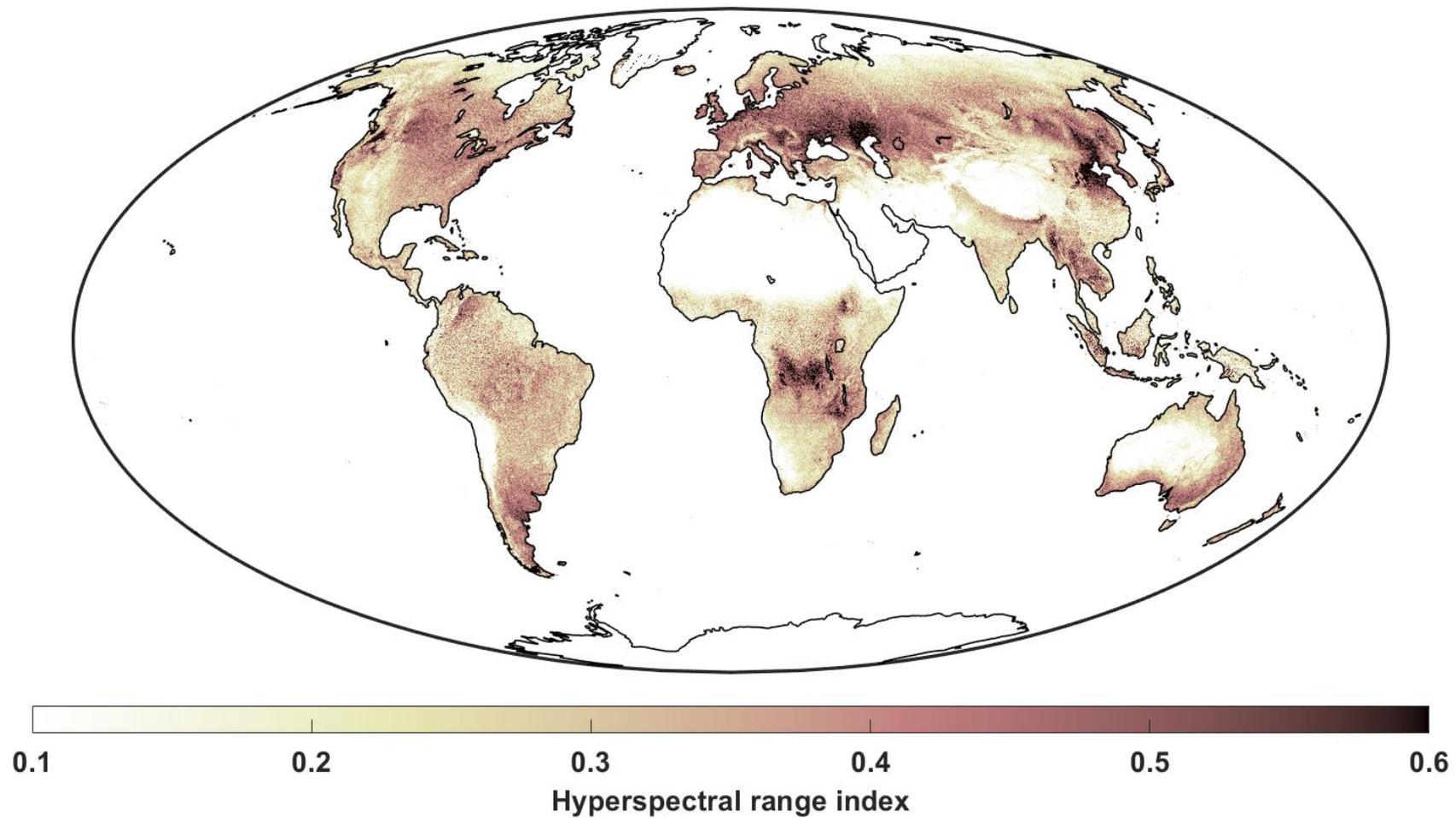


Figure 28 : Répartition mondiale de l'éthylène atmosphérique (C₂H₄) entre 2008 et 2020, estimé par l'instrument satellite IASI. Données super-échantillonnées avec ajustement de l'orientation des vents (données Franco et al. (2022)).

Bibliographie

Apituley A, Pedergnana M, Sneep M, Veeffkind JP, Loyola D, Hasekamp O, Lorente Delgado A, Borsdorff T (2021) Sentinel-5 precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual Methane, SRON-S5P-LEV2-MA-001, CI-7570-PUM, issue 1.1.0

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes (2021), La télédétection spatiale. Les données satellitaires comme outil complémentaire de surveillance au sol de la qualité de l'air. Décembre 2021.

Barret B, Gouzenes Y, Le Flochmoen E, Ferrant S (2021) Retrieval of Metop-A/IASI N₂O Profiles and Validation with NDACC FTIR Data. *Atmosphere* 12. <https://doi.org/10.3390/atmos12020219>

Bauer SE, Tsigaridis K, Miller R (2016) Significant atmospheric aerosol pollution caused by world food cultivation. *Geophysical Research Letters* 43:5394–5400. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2016GL068354>

Berchet A, Sollum E, Thompson RL, Pison I, Thanwerdas J, Broquet G, Chevallier F, Aalto T, Berchet A, Bergamaschi P, Brunner D, Engelen R, Fortems-Cheiney A, Gerbig C, Groot Zwaaftink CD, Haussaire J-M, Henne S, Houweling S, Karstens U, Kutsch WL, Luijkx IT, Monteil G, Palmer PI, van Peet JCA, Peters W, Peylin P, Potier E, Rödenbeck C, Saunio M, Scholze M, Tsuruta A, Zhao Y (2021) The Community Inversion Framework v1.0: a unified system for atmospheric inversion studies. *Geoscientific Model Development* 14:5331–5354. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-5331-2021>

Bessagnet B, Beauchamp M, Guerreiro C, de Leeuw F, Tsyro S, Colette A, Meleux F, Rouil L, Ruysenaars P, Sauter F, Velders GJM, Foltescu VL, van Aardenne J (2014) Can further mitigation of ammonia emissions reduce exceedances of particulate matter air quality standards? *Environmental Science & Policy* 44:149–163. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsci.2014.07.011>

Borsdorff T, aan de Brugh J, Pandey S, Hasekamp O, Aben I, Houweling S, Landgraf J (2019) Carbon monoxide air pollution on sub-city scales and along arterial roads detected by the Tropospheric Monitoring Instrument. *Atmospheric Chemistry and Physics* 19:3579–3588. <https://doi.org/10.5194/acp-19-3579-2019>

Boynard A, Hurtmans D, Garane K, Goutail F, Hadji-Lazaro J, Koukouli ME, Wespes C, Vigouroux C, Keppens A, Pommereau J-P, Pazmino A, Balis D, Loyola D, Valks P, Sussmann R, Smale D, Coheur P-F, Clerbaux C (2018) Validation of the IASI FORLI/EUMETSAT ozone products using satellite (GOME-2), ground-based (Brewer–Dobson, SAOZ, FTIR) and ozonesonde measurements. *Atmospheric Measurement Techniques* 11:5125–5152. <https://doi.org/10.5194/amt-11-5125-2018>

Cao H, Henze DK, Zhu L, Shephard MW, Cady-Pereira K, Dammers E, Sitwell M, Heath N, Lonsdale C, Bash JO, Miyazaki K, Flechard C, Fauvel Y, Kruit RW, Feigenspan S, Brümmer C, Schrader F, Twigg MM, Leeson S, Tang YS, Stephens ACM, Braban C, Vincent K, Meier M, Seitler E, Geels C, Ellermann T, Sanocka A, Capps SL (2022) 4D-Var Inversion of European NH₃ Emissions Using CrIS NH₃ Measurements and GEOS-Chem Adjoint With Bi-Directional and Uni-Directional Flux Schemes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 127:e2021JD035687. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2021JD035687>

Chalinel R, Attié J-L, Ricaud P, Vidot J, Kangah Y, Hauglustaine D, Thompson R (2022) Evaluation and Global-Scale Observation of Nitrous Oxide from IASI on Metop-A. *Remote Sensing* 14. <https://doi.org/10.3390/rs14061403>

Chen Y, Su W, Xing C, Yin H, Lin H, Zhang C, Liu H, Hu Q, Liu C (2022) Kilometer-level glyoxal retrieval via satellite for anthropogenic volatile organic compound emission source and secondary organic aerosol formation identification. *Remote Sensing of Environment* 270:112852. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112852>

Ciais, P, Sabine C, Bala G, Bopp L, Brovkin V, Canadell J, Chhabra A, DeFries R, Galloway J, Heimann M, Jones C, Le Quéré C, Myneni RB, Piao S and Thornton P, 2013: Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J.

Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Citepa (2022). Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France – Format Secten. https://www.citepa.org/wp-content/uploads/Citepa_Rapport-Secten-2022_Rapport-complet_v1.8.pdf

Clarisse L, Clerbaux C, Dentener F, Hurtmans D, Coheur P-F (2009) Global ammonia distribution derived from infrared satellite observations. *Nature Geoscience* 2:479–483. <https://doi.org/10.1038/ngeo551>

Clarisse L, Hurtmans D, Clerbaux C, Hadji-Lazaro J, Ngadi Y, Coheur P-F (2012) Retrieval of sulphur dioxide from the infrared atmospheric sounding interferometer (IASI). *Atmospheric Measurement Techniques* 5:581–594. <https://doi.org/10.5194/amt-5-581-2012>

Clarisse L, Coheur P-F, Theys N, Hurtmans D, Clerbaux C (2014) The 2011 Nabro eruption, a SO₂ plume height analysis using IASI measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics* 14:3095–3111. <https://doi.org/10.5194/acp-14-3095-2014>

Clarisse L, Van Damme M, Clerbaux C, Coheur P-F (2019) Tracking down global NH₃ point sources with wind-adjusted superresolution. *Atmospheric Measurement Techniques* 12:5457–5473. <https://doi.org/10.5194/amt-12-5457-2019>

Clarisse L, Van Damme M, Hurtmans D, Franco B, Clerbaux C, Coheur P-F (2021) The Diel Cycle of NH₃ Observed From the FY-4A Geostationary Interferometric Infrared Sounder (GIIRS). *Geophysical Research Letters* 48:e2021GL093010. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2021GL093010>

Clerbaux C, Boynard A, Clarisse L, George M, Hadji-Lazaro J, Herbin H, Hurtmans D, Pommier M, Razavi A, Turquety S, Wespes C, Coheur P-F (2009) Monitoring of atmospheric composition using the thermal infrared IASI/MetOp sounder. *Atmospheric Chemistry and Physics* 9:6041–6054. <https://doi.org/10.5194/acp-9-6041-2009>

Collin G (2021) Regional Production, updated documentation covering all regional operational systems and the ENSEMBLE, Following U3 upgrade, november 2020, CAMS50_2018SC2_D2.0.2-U3_Models_documentation_202101_v1. Accès via : https://confluence.ecmwf.int/download/attachments/202173092/CAMS50_2018SC2_D2.0.2-U3_Models_documentation_202101_v1.docx?version=1&modificationDate=1614853774016&api=v2 (dernier accès le 14/02/2023)

Colomb A, Ramonet M, Yver-Kwok C, Delmotte M, Pichon J (2022) ICOS ATC CH₄ Release, Puy de Dôme (10.0 m), 2016-08-25–2022-02-28, ICOS RI, <https://hdl.handle.net/11676/l8WoEXzmy-QMO9StPqES1JVu>

Crevoisier C, Chédin A, Matsueda H, Machida T, Armante R, Scott NA (2009a) First year of upper tropospheric integrated content of CO₂ from IASI hyperspectral infrared observations. *Atmospheric Chemistry and Physics* 9:4797–4810. <https://doi.org/10.5194/acp-9-4797-2009>

Crevoisier C, Nobileau D, Fiore AM, Armante R, Chédin A, Scott NA (2009b) Tropospheric methane in the tropics – first year from IASI hyperspectral infrared observations. *Atmospheric Chemistry and Physics* 9:6337–6350. <https://doi.org/10.5194/acp-9-6337-2009>

Crevoisier C, Nobileau D, Armante R, Crépeau L, Machida T, Sawa Y, Matsueda H, Schuck T, Thonat T, Pernin J, Scott NA, Chédin A (2013) The 2007–2011 evolution of tropical methane in the mid-troposphere as seen from space by MetOp-A/IASI. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13:4279–4289. <https://doi.org/10.5194/acp-13-4279-2013>

Cuesta J, Eremenko M, Liu X, Dufour G, Cai Z, Höpfner M, von Clarmann T, Sellitto P, Foret G, Gaubert B, Beekmann M, Orphal J, Chance K, Spurr R, Flaud J-M (2013) Satellite observation of lowermost tropospheric ozone by multispectral synergism of IASI thermal infrared and GOME-2 ultraviolet measurements over Europe. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13:9675–9693. <https://doi.org/10.5194/acp-13-9675-2013>

Dammers E, McLinden CA, Griffin D, Shephard MW, Van Der Graaf S, Lutsch E, Schaap M, Gainairu-Matz Y, Fioletov V, Van Damme M, Whitburn S, Clarisse L, Cady-Pereira K, Clerbaux C, Coheur PF, Erismann JW (2019)

NH₃ emissions from large point sources derived from CrIS and IASI satellite observations. *Atmospheric Chemistry and Physics* 19:12261–12293. <https://doi.org/10.5194/acp-19-12261-2019>

Dammers E, Shephard MW, Griffin D, Chow E, White E, Hickman J, Tokaya J, Lutsch E, Kharol S, van der Graaf S, Cady-Pereira K, Bittman S, McLinden C, Erisman JW, Schaap M (2022). County-level ammonia emissions monitored worldwide, 28 June 2022, PREPRINT (Version 1) available at Research Square <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1752718/v1>

De Longueville H, Clarisse L, Whitburn S, Franco B, Bauduin S, Clerbaux C, Camy-Peyret C, Coheur P-F (2021) Identification of Short and Long-Lived Atmospheric Trace Gases From IASI Space Observations. *Geophysical Research Letters* 48:e2020GL091742. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2020GL091742>

De Smedt I, Theys N, Yu H, Danckaert T, Lerot C, Compennolle S, Van Roozendaal M, Richter A, Hilboll A, Peters E, Pedernana M, Loyola D, Beirle S, Wagner T, Eskes H, van Geffen J, Boersma KF, Veeffkind P (2018) Algorithm theoretical baseline for formaldehyde retrievals from S5P TROPOMI and from the QA4ECV project. *Atmospheric Measurement Techniques* 11:2395–2426. <https://doi.org/10.5194/amt-11-2395-2018>

De Wachter E, Kumps N, Vandaele AC, Langerock B, De Mazière M (2017) Retrieval and validation of MetOp/IASI methane. *Atmospheric Measurement Techniques* 10:4623–4638. <https://doi.org/10.5194/amt-10-4623-2017>

Duflot V, Wespes C, Clarisse L, Hurtmans D, Ngadi Y, Jones N, Paton-Walsh C, Hadji-Lazaro J, Vigouroux C, De Mazière M, Metzger J-M, Mahieu E, Servais C, Hase F, Schneider M, Clerbaux C, Coheur P-F (2015) Acetylene (C₂H₂) and hydrogen cyanide (HCN) from IASI satellite observations: global distributions, validation, and comparison with model. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15:10509–10527. <https://doi.org/10.5194/acp-15-10509-2015>

EEA, 2021(dernier accès le 27/01/2023) : <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer>

EUMETSAT (2021) MTG-IRS L2 ATBD, EUM/RSP/TEN/17/935387, accessible via <https://www.eumetsat.int/media/45439> (dernier accès le 27/01/2023)

Eurostat, 2022 (dernier accès le 13/01/2023) : https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_air_emis/default/table?lang=en

Evangelidou N, Balkanski Y, Eckhardt S, Cozic A, Van Damme M, Coheur P-F, Clarisse L, Shephard MW, Cady-Pereira KE, Hauglustaine D (2021) 10-year satellite-constrained fluxes of ammonia improve performance of chemistry transport models. *Atmospheric Chemistry and Physics* 21:4431–4451. <https://doi.org/10.5194/acp-21-4431-2021>

Fioletov V, McLinden CA, Griffin D, Theys N, Loyola DG, Hedelt P, Krotkov NA, Li C (2020) Anthropogenic and volcanic point source SO₂ emissions derived from TROPOMI on board Sentinel-5 Precursor: first results. *Atmospheric Chemistry and Physics* 20:5591–5607. <https://doi.org/10.5194/acp-20-5591-2020>

Fiore AM, Jacob DJ, Field BD, Streets DG, Fernandes SD, Jang C (2002) Linking ozone pollution and climate change: The case for controlling methane. *Geophysical Research Letters* 29:25-1-25-4. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2002GL015601>

Fishman J, Watson CE, Larsen JC, Logan JA (1990) Distribution of tropospheric ozone determined from satellite data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 95:3599–3617. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/JD095iD04p03599>

Fortems-Cheiney A, Dufour G, Dufossé K, Couvidat F, Gilliot J-M, Siour G, Beekmann M, Foret G, Meleux F, Clarisse L, Coheur P-F, Van Damme M, Clerbaux C, Générumont S (2020) Do alternative inventories converge on the spatiotemporal representation of spring ammonia emissions in France? *Atmospheric Chemistry and Physics* 20:13481–13495. <https://doi.org/10.5194/acp-20-13481-2020>

Franco B, Clarisse L, Stavrou T, Müller J-F, Van Damme M, Whitburn S, Hadji-Lazaro J, Hurtmans D, Taraborrelli D, Clerbaux C, Coheur P-F (2018) A General Framework for Global Retrievals of Trace Gases From

- IASI: Application to Methanol, Formic Acid, and PAN. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 123:13,963–13,984. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2018JD029633>
- Franco B, Clarisse L, Stavrakou T, Müller J-F, Pozzer A, Hadji-Lazaro J, Hurtmans D, Clerbaux C, Coheur P-F (2019) Acetone Atmospheric Distribution Retrieved From Space. *Geophysical Research Letters* 46:2884–2893. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2019GL082052>
- Franco B, Clarisse L, Stavrakou T, Müller J-F, Taraborrelli D, Hadji-Lazaro J, Hannigan JW, Hase F, Hurtmans D, Jones N, Lutsch E, Mahieu E, Ortega I, Schneider M, Strong K, Vigouroux C, Clerbaux C, Coheur P-F (2020) Spaceborne Measurements of Formic and Acetic Acids: A Global View of the Regional Sources. *Geophysical Research Letters* 47:e2019GL086239. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2019GL086239>
- Franco B, Clarisse L, Van Damme M, Hadji-Lazaro J, Clerbaux C, Coheur P-F (2022) Ethylene industrial emitters seen from space. *Nature Communications* 13:6452. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34098-8>
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Gregor, L., Hauck, J., Le Quéré, C., Lujikx, I. T., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Alkama, R., ... Zheng, B. (2022). Global Carbon Budget 2022. *Earth System Science Data*, 14(11), 4811–4900. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>
- Fu D, Millet DB, Wells KC, Payne VH, Yu S, Guenther A, Eldering A (2019) Direct retrieval of isoprene from satellite-based infrared measurements. *Nature Communications* 10:3811. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11835-0>
- Garane K, Koukoulis M-E, Verhoelst T, Lerot C, Heue K-P, Fioletov V, Balis D, Bais A, Bazureau A, Dehn A, Goutail F, Granville J, Griffin D, Hubert D, Keppens A, Lambert J-C, Loyola D, McLinden C, Pazmino A, Pommereau J-P, Redondas A, Romahn F, Valks P, Van Roozendaal M, Xu J, Zehner C, Zerefos C, Zimmer W (2019) TROPOMI/S5P total ozone column data: global ground-based validation and consistency with other satellite missions. *Atmospheric Measurement Techniques* 12:5263–5287. <https://doi.org/10.5194/amt-12-5263-2019>
- García OE, Schneider M, Ertl B, Sepúlveda E, Borger C, Diekmann C, Wiegeler A, Hase F, Barthlott S, Blumenstock T, Raffalski U, Gómez-Peláez A, Steinbacher M, Ries L, de Frutos AM (2018) The MUSICA IASI CH₄ and N₂O products and their comparison to HIPPO, GAW and NDACC FTIR references. *Atmospheric Measurement Techniques* 11:4171–4215. <https://doi.org/10.5194/amt-11-4171-2018>
- George M, Clerbaux C, Bouarar I, Coheur P-F, Deeter MN, Edwards DP, Francis G, Gille JC, Hadji-Lazaro J, Hurtmans D, Inness A, Mao D, Worden HM (2015) An examination of the long-term CO records from MOPITT and IASI: comparison of retrieval methodology. *Atmospheric Measurement Techniques* 8:4313–4328. <https://doi.org/10.5194/amt-8-4313-2015>
- Georgoulias AK, van der A RJ, Stammes P, Boersma KF, Eskes HJ (2019) Trends and trend reversal detection in 2 decades of tropospheric NO₂ satellite observations. *Atmospheric Chemistry and Physics* 19:6269–6294. <https://doi.org/10.5194/acp-19-6269-2019>
- Griffin D, Zhao X, McLinden CA, Boersma F, Bourassa A, Dammers E, Degenstein D, Eskes H, Fehr L, Fioletov V, Hayden K, Kharol SK, Li S-M, Makar P, Martin RV, Mihele C, Mittermeier RL, Krotkov N, Sneepe M, Lamsal LN, Linden M ter, Geffen J van, Veeffkind P, Wolde M (2019) High-Resolution Mapping of Nitrogen Dioxide With TROPOMI: First Results and Validation Over the Canadian Oil Sands. *Geophysical Research Letters* 46:1049–1060. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2018GL081095>
- Hoesly RM, Smith SJ, Feng L, Klimont Z, Janssens-Maenhout G, Pitkanen T, Seibert JJ, Vu L, Andres RJ, Bolt RM, Bond TC, Dawidowski L, Kholod N, Kurokawa J-I, Li M, Liu L, Lu Z, Moura MCP, O'Rourke PR, Zhang Q (2018) Historical (1750–2014) anthropogenic emissions of reactive gases and aerosols from the Community Emissions Data System (CEDS). *Geoscientific Model Development* 11:369–408. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-369-2018>
- Hu H, Landgraf J, Detmers R, Borsdorff T, Aan de Brugh J, Aben I, Butz A, Hasekamp O (2018) Toward Global Mapping of Methane With TROPOMI: First Results and Intersatellite Comparison to GOSAT. *Geophysical Research Letters* 45:3682–3689. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2018GL077259>

Hurtmans D, Coheur P-F, Wespes C, Clarisse L, Scharf O, Clerbaux C, Hadji-Lazaro J, George M, Turquety S (2012) FORLI radiative transfer and retrieval code for IASI. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 113:1391–1408. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2012.02.036>

IPCC (2021) *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom

ISSWG (2018) IASI-NG Science Plan. Ed. Smith F, Crevoisier C, v1.0, December 2018. Accès via : https://www-cdn.eumetsat.int/files/2020-04/pdf_science_epssg_iasi_ng_plan.pdf (dernier accès le 16/02/2023)

Jacob DJ, Varon DJ, Cusworth DH, Dennison PE, Frankenberg C, Gautam R, Guanter L, Kelley J, McKeever J, Ott LE, Poulter B, Qu Z, Thorpe AK, Worden JR, Duren RM (2022) Quantifying methane emissions from the global scale down to point sources using satellite observations of atmospheric methane. *Atmospheric Chemistry and Physics* 22:9617–9646. <https://doi.org/10.5194/acp-22-9617-2022>

Jiménez PA, Hacker JP, Dudhia J, Haupt SE, Ruiz-Arias JA, Gueymard CA, Thompson G, Eidhammer T, Deng A (2016) WRF-Solar: Description and Clear-Sky Assessment of an Augmented NWP Model for Solar Power Prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society* 97:1249–1264. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00279.1>

Jiménez PA, Yang J, Kim J-H, Sengupta M, Dudhia J (2022) Assessing the WRF-Solar Model Performance Using Satellite-Derived Irradiance from the National Solar Radiation Database. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 61:129–142. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-21-0090.1>

JOUE (2016) Directive (EU) 2016/2284 du Parlement Européen et du Conseil du 14 décembre 2016 concernant la réduction des émissions nationales de certains polluants atmosphériques, modifiant la directive 2003/35/CE et abrogeant la directive 2001/81/CE. *Journal officiel de l'Union Européenne*. <https://eur-ex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016L2284&from=FR>

Kerzenmacher T, Dils B, Kumps N, Blumenstock T, Clerbaux C, Coheur P-F, Demoulin P, García O, George M, Griffith DWT, Hase F, Hadji-Lazaro J, Hurtmans D, Jones N, Mahieu E, Notholt J, Paton-Walsh C, Raffalski U, Ridder T, Schneider M, Servais C, De Mazière M (2012) Validation of IASI FORLI carbon monoxide retrievals using FTIR data from NDACC. *Atmospheric Measurement Techniques* 5:2751–2761. <https://doi.org/10.5194/amt-5-2751-2012>

Köhler P, Nehrbass-Ahles C, Schmitt J, Stocker TF, Fischer H (2017) A 156 kyr smoothed history of the atmospheric greenhouse gases CO₂, CH₄, and N₂O and their radiative forcing. *Earth System Science Data* 9:363–387. <https://doi.org/10.5194/essd-9-363-2017>

Kramarova NA, Ziemke JR, Huang L-K, Herman JR, Wargan K, Seftor CJ, Labow GJ and Oman LD (2021) Evaluation of Version 3 Total and Tropospheric Ozone Columns From Earth Polychromatic Imaging Camera on Deep Space Climate Observatory for Studying Regional Scale Ozone Variations. *Frontiers in Remote Sensing* 2:734071. <https://doi.org/10.3389/frsen.2021.734071>

Krueger AJ, Guenther B, Fleig AJ, Heath DF, Hilsenrath E, McPeters R, Prabhakara C (1980) Satellite Ozone Measurements. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences* 296:191–204

Kuze A, Suto H, Nakajima M, Hamazaki T (2009) Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring. *Appl Opt* 48:6716–6733. <https://doi.org/10.1364/AO.48.006716>

Lambert, J-C, Keppens A, Compernelle S, Eichmann K-U, de Graaf M, Hubert D, Langerock B, Ludewig A, Sha MK, Verhoelst T, Wagner T, Ahn C, Argyrouli A, Balis D, Chan KL, De Smedt I, Eskes H, Fjæraa AM, Garane K, Gleason JF, Goutail F, Granville J, Hedelt P, Heue K-P, Jaross G, Kleipool Q, Koukouli ML, Lorente Delgado A, Lutz R, Nanda S, Niemeijer S, Pazmiño A, Pinardi G, Pommereau J-P, Richter A, Rozemeijer N, Sneep M, Stein Zweers D, Theys N, Tilstra G, Torres O, Valks P, van Geffen J, Vigouroux C, Wang P, Weber M (2022) Quarterly Validation Report of the Copernicus Sentinel-5 Precursor Operational Data Products #14: April 2018 – March

2022. S5P MPC Routine Operations Consolidated Validation Report series, Issue #14, Version 14.01.01, 202 pp., 6 April 2022.

Lan X, Thoning KW, and Dlugokencky EJ (2023) Trends in globally-averaged CH₄, N₂O, and SF₆ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. Version 2023-01

Landgraf J, Lorente A, Langerock B, Sha MK (2021) S5P Mission Performance Centre Methane [L2_CH4_] Readme, S5P-MPC-SRON-PRF-CH4, issue 2.1, version V02.03.01

Lauvaux T, Giron C, Mazzolini M, d'Aspremont A, Duren R, Cusworth D, Shindell D, P. Ciais (2022) Global assessment of oil and gas methane ultra-emitters. *Science* 375:557–561. <https://doi.org/10.1126/science.abj4351>

Lerot C, Hendrick F, Van Roozendaal M, Alvarado LMA, Richter A, De Smedt I, Theys N, Vlietinck J, Yu H, Van Gent J, Stavrakou T, Müller J-F, Valks P, Loyola D, Irie H, Kumar V, Wagner T, Schreier SF, Sinha V, Wang T, Wang P, Retscher C (2021) Glyoxal tropospheric column retrievals from TROPOMI – multi-satellite intercomparison and ground-based validation. *Atmospheric Measurement Techniques* 14:7775–7807. <https://doi.org/10.5194/amt-14-7775-2021>

Lorente A, Borsdorff T, Butz A, Hasekamp O, aan de Brugh J, Schneider A, Wu L, Hase F, Kivi R, Wunch D, Pollard DF, Shiomi K, Deutscher NM, Velasco VA, Roehl CM, Wennberg PO, Warneke T, Landgraf J (2021) Methane retrieved from TROPOMI: improvement of the data product and validation of the first 2 years of measurements. *Atmospheric Measurement Techniques* 14:665–684. <https://doi.org/10.5194/amt-14-665-2021>

Liu L, Zhang X, Wong AYH, Xu W, Liu X, Li Y, Mi H, Lu X, Zhao L, Wang Z, Wu X, Wei J (2019) Estimating global surface ammonia concentrations inferred from satellite retrievals. *Atmospheric Chemistry and Physics* 19:12051–12066. <https://doi.org/10.5194/acp-19-12051-2019>

Louergue L, Schilt A, Spahni R, Masson-Delmotte V, Blunier T, Lemieux B, Barnola J-M, Raynaud D, Stocker TF, Chappellaz J (2008) Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH₄ over the past 800,000 years. *Nature* 453:383–386. <https://doi.org/10.1038/nature06950>

Maasackers JD, Varon DJ, Elfarsdóttir A, McKeever J, Jervis D, Mahapatra G, Pandey S, Lorente A, Borsdorff T, Foorhuis LR, Schuit BJ, Tol P, van Kempen TA, van Hees R, Ilse Aben (2022) Using satellites to uncover large methane emissions from landfills. *Science Advances* 8:eabn9683. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abn9683>

Marais EA, Pandey AK, Van Damme M, Clarisse L, Coheur P-F, Shephard MW, Misselbrook T, Zhu L, Luo G, Yu F (2021) UK Ammonia Emissions Estimated Observations and GEOS-Chem. *Journal of Geophysical Research* 126:e2021JD035237. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2021JD035237>

Marshak A, Herman J, Adam S, Karin B, Carn S, Cede A, Geogdzhayev I, Huang D, Huang L-K, Knyazikhin Y, Kowalewski M, Krotkov N, Lyapustin A, McPeters R, Meyer KG, Torres O, Yang Y (2018) Earth Observations from DSCOVR EPIC Instrument. *Bulletin of the American Meteorological Society* 99:1829–1850. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0223.1>

Megaritis AG, Fountoukis C, Charalampidis PE, Pilinis C, Pandis SN (2013) Response of fine particulate matter concentrations to changes of emissions and temperature in Europe. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13:3423–3443. <https://doi.org/10.5194/acp-13-3423-2013>

Membrive O (2016) Caractérisation de la distribution verticale des gaz à effet de serre CO₂ et CH₄ par mesures sous ballons. Application à la validation d'observations satellites. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI. https://theses.hal.science/tel-01525863/file/these_archivage_3151327.pdf (dernier accès le 06/02/2023)

MTECT, Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires (2022). Décret n° 2022-1654 du 26 décembre 2022 définissant les trajectoires annuelles de réduction des émissions de protoxyde d'azote et d'ammoniac du secteur agricole jusqu'en 2030. *Journal officiel*, n°299 du 27 décembre 2022.

NASA/LARC/SD/ASDC (2017) DSCOVR EPIC Level 4 Tropospheric Ozone. NASA Langley Atmospheric Science Data Center DAAC.

Parker RJ, Webb A, Boesch H, Somkuti P, Barrio Guillo R, Di Noia A, Kalaitzi N, Anand JS, Bergamaschi P, Chevallier F, Palmer PI, Feng L, Deutscher NM, Feist DG, Griffith DWT, Hase F, Kivi R, Morino I, Notholt J, Oh Y-

S, Ohyama H, Petri C, Pollard DF, Roehl C, Sha MK, Shiomi K, Strong K, Sussmann R, Té Y, Velasco VA, Warneke T, Wennberg PO, Wunch D (2020) A decade of GOSAT Proxy satellite CH₄ observations. *Earth System Science Data* 12:3383–3412. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3383-2020>

Payne VH, Kulawik SS, Fischer EV, Brewer JF, Huey LG, Miyazaki K, Worden JR, Bowman KW, Hintsä E, Moore F, Elkins JW, Juncosa Calahorrano J (2022) Satellite measurements of peroxyacetyl nitrate from the Cross-Track Infrared Sounder: comparison with ATom aircraft measurements. *Atmospheric Measurement Techniques* 15:3497–3511. <https://doi.org/10.5194/amt-15-3497-2022>

Pfeifroth U, Sanchez-Lorenzo A, Manara V, Trentmann J, Hollmann R (2018) Trends and Variability of Surface Solar Radiation in Europe Based On Surface- and Satellite-Based Data Records. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 123:1735–1754. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2017JD027418>

Pozzer A, Tsimpidi AP, Karydis VA, de Meij A, Lelieveld J (2017) Impact of agricultural emission reductions on fine-particulate matter and public health. *Atmospheric Chemistry and Physics* 17:12813–12826. <https://doi.org/10.5194/acp-17-12813-2017>

QA4ECV (2022), dernier accès le 01/02/2023 : <http://www.temis.nl/qa4ecv/ch2o.html>

Shephard MW, Cady-Pereira KE (2015) Cross-track Infrared Sounder (CrIS) satellite observations of tropospheric ammonia. *Atmospheric Measurement Techniques* 8:1323–1336. <https://doi.org/10.5194/amt-8-1323-2015>

Shephard MW, Dammers E, Cady-Pereira KE, Kharol SK, Thompson J, Gainariu-Matz Y, Zhang J, McLinden CA, Kovachik A, Moran M, Bittman S, Sioris CE, Griffin D, Alvarado MJ, Lonsdale C, Savic-Jovicic V, Zheng Q (2020) Ammonia measurements from space with the Cross-track Infrared Sounder: characteristics and applications. *Atmospheric Chemistry and Physics* 20:2277–2302. <https://doi.org/10.5194/acp-20-2277-2020>

Siddans R, Knappett D, Kerridge B, Waterfall A, Hurley J, Latter B, Boesch H, Parker R (2017) Global height-resolved methane retrievals from the Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI) on MetOp. *Atmospheric Measurement Techniques* 10:4135–4164. <https://doi.org/10.5194/amt-10-4135-2017>

Sitwell M, Shephard MW, Rochon Y, Cady-Pereira K, Dammers E (2022) An ensemble-variational inversion system for the estimation of ammonia emissions using CrIS satellite ammonia retrievals. *Atmospheric Chemistry and Physics* 22:6595–6624. <https://doi.org/10.5194/acp-22-6595-2022>

Van Damme M, Whitburn S, Clarisse L, Clerbaux C, Hurtmans D, Coheur P-F (2017) Version 2 of the IASI NH₃ neural network retrieval algorithm: near-real-time and reanalysed datasets. *Atmospheric Measurement Techniques* 10:4905–4914. <https://doi.org/10.5194/amt-10-4905-2017>

Van Damme M, Clarisse L, Whitburn S, Hadji-Lazaro J, Hurtmans D, Clerbaux C, Coheur P-F (2018a) Industrial and agricultural ammonia point sources exposed. *Nature* 564:99–103. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0747-1>

Van Damme M, Clarisse L, Whitburn S, Hadji-Lazaro J, Hurtmans D, Clerbaux C, Coheur P-F (2018b): Level 2 dataset and Level 3 oversampled average map of the IASI/Metop-A ammonia (NH₃) morning column measurements (ANNI-NH₃-v2.1R-I) from 2008 to 2016. PANGAEA, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.894736>

van der Graaf S, Dammers E, Segers A, Kranenburg R, Schaap M, Shephard MW, Erismann JW (2022) Data assimilation of CrIS NH₃ satellite observations for improving spatiotemporal NH₃ distributions in LOTOS-EUROS. *Atmospheric Chemistry and Physics* 22:951–972. <https://doi.org/10.5194/acp-22-951-2022>

van Geffen J, Eskes H, Compennolle S, Pinardi G, Verhoelst T, Lambert J-C, Sneep M, ter Linden M, Ludewig A, Boersma KF, Veeffkind JP (2022) Sentinel-5P TROPOMI NO₂ retrieval: impact of version v2.2 improvements and comparisons with OMI and ground-based data. *Atmospheric Measurement Techniques* 15:2037–2060. <https://doi.org/10.5194/amt-15-2037-2022>

Veeffkind JP, Aben I, McMullan K, Förster H, de Vries J, Otter G, Claas J, Eskes HJ, de Haan JF, Kleipool Q, van Weele M, Hasekamp O, Hoogeveen R, Landgraf J, Snel R, Tol P, Ingmann P, Voors R, Kruizinga B, Vink R, Visser H, Levelt PF (2012) TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the

atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. *Remote Sensing of Environment* 120:70–83. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.027>

Viatte C, Wang T, Van Damme M, Dammers E, Meleux F, Clarisse L, Shephard MW, Whitburn S, Coheur PF, Cady-Pereira KE, Clerbaux C (2020) Atmospheric ammonia variability and link with particulate matter formation: a case study over the Paris area. *Atmospheric Chemistry and Physics* 20:577–596. <https://doi.org/10.5194/acp-20-577-2020>

Vigouroux C, Langerock B, Bauer Aquino CA, Blumenstock T, Cheng Z, De Mazière M, De Smedt I, Grutter M, Hannigan JW, Jones N, Kivi R, Loyola D, Lutsch E, Mahieu E, Makarova M, Metzger J-M, Morino I, Murata I, Nagahama T, Notholt J, Ortega I, Palm M, Pinardi G, Röhling A, Smale D, Stremme W, Strong K, Sussmann R, Té Y, van Roozendaal M, Wang P, Winkler H (2020) TROPOMI–Sentinel-5 Precursor formaldehyde validation using an extensive network of ground-based Fourier-transform infrared stations. *Atmospheric Measurement Techniques* 13:3751–3767. <https://doi.org/10.5194/amt-13-3751-2020>

Warner JX, Wei Z, Strow LL, Dickerson RR, Nowak JB (2016) The global tropospheric ammonia distribution as seen in the 13-year AIRS measurement record. *Atmospheric Chemistry and Physics* 16:5467–5479. <https://doi.org/10.5194/acp-16-5467-2016>

Wells KC, Millet DB, Payne VH, Deventer MJ, Bates KH, de Gouw JA, Graus M, Warneke C, Wisthaler A, Fuentes JD (2020) Satellite isoprene retrievals constrain emissions and atmospheric oxidation. *Nature* 585:225–233. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2664-3>

Wells KC, Millet DB, Payne VH, Vigouroux C, Aquino CAB, De Mazière M, de Gouw JA, Graus M, Kurosu T, Warneke C, Wisthaler A (2022) Next-Generation Isoprene Measurements From Space: Detecting Daily Variability at High Resolution. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 127:e2021JD036181. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2021JD036181>

West JJ, Fiore AM (2005) Management of Tropospheric Ozone by Reducing Methane Emissions. *Environmental Science & Technology* 39:4685–4691. <https://doi.org/10.1021/es048629f>

Wofsy SC, HIPPO science team and cooperating modellers and satellite teams (2011) HIAPER Pole-to-Pole Observations (HIPPO): fine-grained, global-scale measurements of climatically important atmospheric gases and aerosols. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 369:2073–2086. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0313>