

Surveillance de la qualité de l'air à travers les données satellites

**Bilan de la qualité de l'air sur la région
Nouvelle-aquitaine - Etude exploratoire**

Référence : PI_INT_20_051

Version finale du : 02/02/2021

Auteur(s) : Agnès Hulin
Contact Atmo Nouvelle-Aquitaine :
E-mail : contact@atmo-na.org
Tél. : 09 84 200 100

www.atmo-nouvelleaquitaine.org

Titre : Surveillance de la qualité de l'air à travers les données satellites / Etude exploratoire

Reference : PI INT 20 051

Version : finale du 02-02-2021

Nombre de pages : 39 (couverture comprise)

	Rédaction	Vérification	Approbation
Nom	Agnès Hulin	Agnès Hulin	Patrick Bourquin
Qualité	Responsable service innovation/partenariat	Responsable service innovation/partenariat	Directeur délégué communication/partenariat
Visa		NA	

Conditions d'utilisation

Atmo Nouvelle-Aquitaine fait partie du dispositif français de surveillance et d'information sur la qualité de l'air. Sa mission s'exerce dans le cadre de la loi sur l'air du 30 décembre 1996 et de ses décrets d'application.

A ce titre et compte tenu de ses statuts, Atmo Nouvelle-Aquitaine est garant de la transparence de l'information sur les résultats de ces travaux selon les règles suivantes :

- Atmo Nouvelle-Aquitaine est libre de leur diffusion selon les modalités de son choix : document papier, communiqué, résumé dans ses publications, mise en ligne sur son site internet (www.atmo-nouvelleaquitaine.org)
- les données contenues dans ce rapport restent la propriété d'Atmo Nouvelle-Aquitaine. En cas de modification de ce rapport, seul le client sera informé d'une nouvelle version. Tout autre destinataire de ce rapport devra s'assurer de la version à jour sur le site Internet de l'association.
- en cas d'évolution de normes utilisées pour la mesure des paramètres entrant dans le champ d'accréditation d'Atmo Nouvelle-Aquitaine, nous nous engageons à être conforme à ces normes dans un délai de 6 mois à partir de leur date de parution
- toute utilisation totale ou partielle de ce document doit faire référence à Atmo Nouvelle-Aquitaine et au titre complet du rapport.

Atmo Nouvelle-Aquitaine ne peut en aucune façon être tenu responsable des interprétations, travaux intellectuels, publications diverses résultant de ses travaux pour lesquels l'association n'aura pas donnée d'accord préalable. Dans ce rapport, les incertitudes de mesures ne sont pas utilisées pour la validation des résultats des mesures obtenues.

En cas de remarques sur les informations ou leurs conditions d'utilisation, prenez contact avec Atmo Nouvelle-Aquitaine :

- depuis le [formulaire de contact](#) de notre site Web
- par mail : contact@atmo-na.org
- par téléphone : 09 84 200 100

Sommaire

1. Notions générales sur l'atmosphère terrestre.....	6
1.1. Les échanges dynamiques entre stratosphère et troposphère.....	6
1.2. La répartition verticale des composants de l'atmosphère.....	7
2. La production de données de qualité de l'air par satellites.....	9
2.1. Les satellites.....	9
2.2. Le principe de la mesure.....	9
2.3. Les unités de mesures.....	10
3. Bilan de la qualité de l'air sur la région Nouvelle Aquitaine.....	12
3.1. Le dioxyde d'azote (NO ₂).....	12
3.1.1. Bilan 2019 des concentrations de NO ₂ (Sentinel 5p).....	12
3.1.1. Evolution des concentrations de NO ₂ pendant la période du 17 mars au 11 mai 2020 (Sentinel 5p).....	14
3.1.2. Evolution des concentrations moyennes annuelles de dioxyde d'azote depuis 2005 (OMI Aura).....	16
3.2. L'ammoniac (NH ₃).....	18
3.2.1. Bilan des concentrations annuelles d'ammoniac en 2019 sur la région Nouvelle Aquitaine.....	18
3.3. L'ozone (O ₃).....	19
3.3.1. Données d'ozone : IASI + GOME2.....	20
3.4. Le méthane (CH ₄).....	21
3.5. Le dioxyde de carbone (CO ₂).....	23
3.5.1. Evolution des concentrations de CO ₂ depuis 2010.....	23
3.5.2. Cartographie des émissions et puits de CO ₂ liés à la végétation.....	23
3.6. Le monoxyde de carbone (CO).....	24
3.7. Les particules.....	25
3.7.1. Exemple d'un épisode lié à l'écobuage sur les Pyrénées.....	27
3.7.2. Exemple d'un épisode lié aux embruns.....	28
3.7.3. Exemple d'un épisode lié aux particules désertiques.....	28
3.7.4. Evolution sur 30 ans des concentrations au sol de Black Carbon.....	29
3.7.5. Impact à l'échelle mondiale des incendies Californiennes de l'été 2020.....	30
3.8. La modélisation inverse des émissions.....	31
3.8.1. Emissions anthropogéniques de dioxyde de soufre (SO ₂).....	32
3.8.2. Emissions de Black carbone issues de la combustion de biomasse.....	33
4. Exploitation des données satellites dans le cadre de la surveillance régionale de la qualité de l'air.	34
5. Conclusions.....	36

AOD	: Aerosol Optical Depth
CHOCHO	: éthanedial ou glyoxal
CO	: monoxyde de carbone
CO2	: dioxyde de carbone
EUMETSAT	: organisation Européenne pour l'exploitation des SATellites METéorologiques
NH3	: ammoniac
HCHO	: formaldéhyde
HNO3	: acide nitrique
MSG	: Meteosat Second Generation
MTG	: Meteosat Third Generation)
	MTG-S : Sounding mission satellite
	MTG-I : Imaging mission satellite
NIR	: proche infrarouge ; SWIR : infrarouge courte longueur d'onde ;
LEO	: orbite terrestre basse
GEO	: orbite géostationnaire
ESA	: Agence spatiale Européenne
IR	: infrarouge
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
NEE	: Net Ecosystème Exchange
NO2	: dioxyde d'azote
NOAA	: National Oceanic and Atmospheric Administration
OMI	: Ozone Monitoring Instrument)
ppbv	: parties par billion en volume
SCIAMACHY	: SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric Cartography
TIR	: Infrarouge thermique
UV	: ultraviolet
VCD	: Vertical Column Density
VIS	: visible (longueur d'onde comprise entre 400 et 500 nm)
VMR	: Volume mixing ratio

Les mesures satellites de composition chimique de la troposphère existent depuis plusieurs dizaines d'années. Les premières mesures, de faible résolution spatiale et temporelle, ont permis de décrire le transport de panaches de polluants à longue distance. L'amélioration des mesures et les progrès réalisés sur l'algorithmie d'analyse permettent aujourd'hui d'apporter de l'information précise aux échelles régionales voire métropolitaines.

Complémentaires des réseaux de surface existants, notamment en renseignant des zones peu ou pas couvertes par les mesures in-situ, les observations satellites peuvent être utilisées à différents niveaux :

- servir à contraindre les inventaires d'émissions de polluants,
- permettre une analyse fine de résultats de simulation sur de vastes régions et dans toute la colonne atmosphérique,
- être assimilées par les modèles pour délivrer des informations plus réalistes.

Elles sont complémentaires aux données produites par les AASQA et ouvrent de nouvelles possibilités dans la surveillance du territoire régional.

Que les données soient brutes, élaborées, produites par la NASA ou par l'ESA, il apparaît le besoin pour les traiter de mieux maîtriser et comprendre les conditions de leur production, les modèles utilisés et hypothèses associées, ainsi que les limites de leur exploitation.

1. Notions générales sur l'atmosphère terrestre

1.1. Les échanges dynamiques entre stratosphère et troposphère

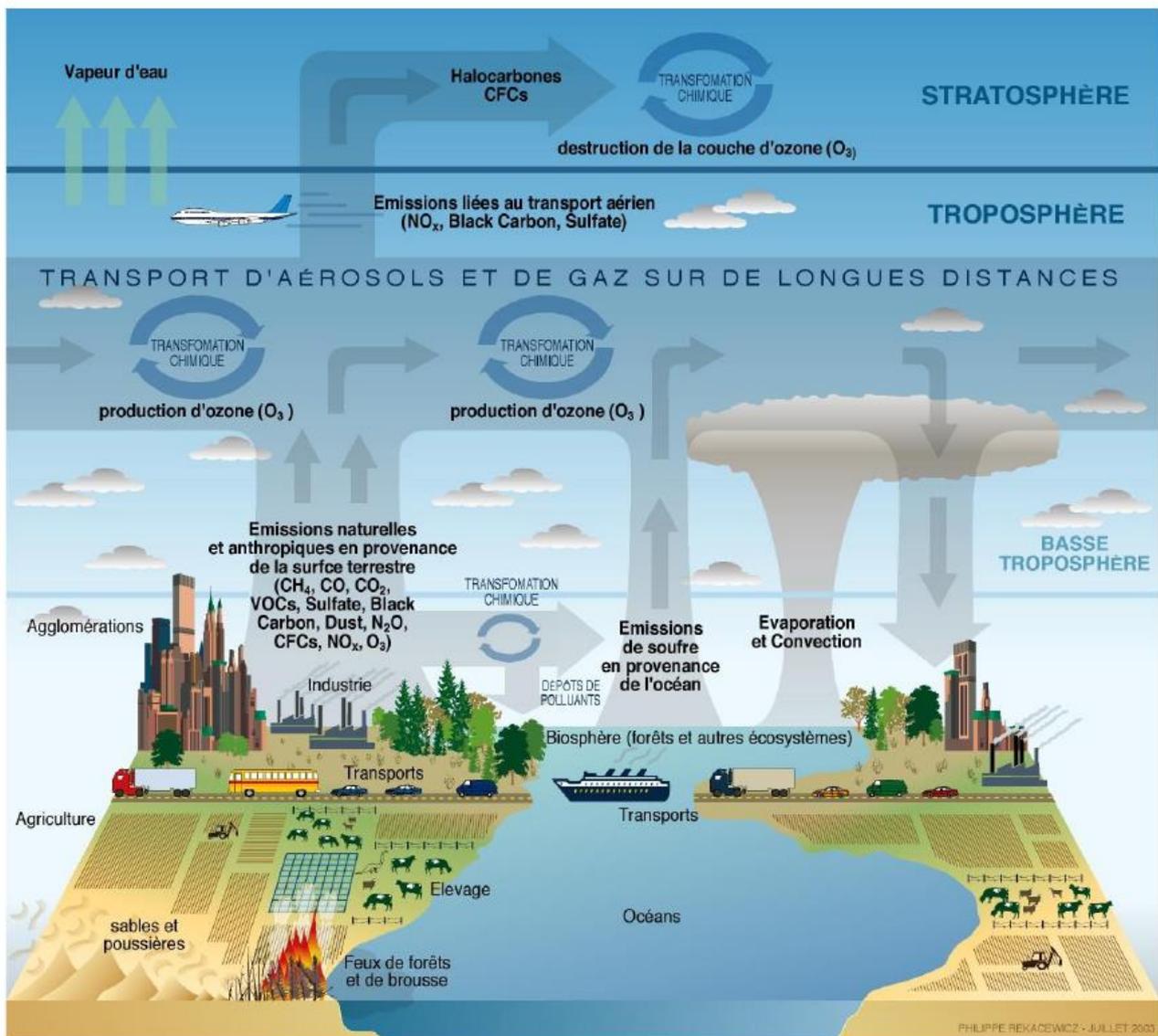


Figure 1 : Les transports de polluants dans les différentes couches de l'atmosphère (Source : <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/climatologie-climat-couche-ozone-746/page/6/>)

Les échanges de matière et d'énergie à travers la tropopause, qui sépare la troposphère de la stratosphère, sont très fréquents, mais encore mal quantifiés : d'une façon générale, il y a transfert de bas en haut au niveau des tropiques, transfert latéral à moyenne latitude et transfert vers le bas au niveau des pôles. Mais de nombreux transferts ont lieu en dehors des régions tropicales et des pôles, notamment lorsque des langues d'air stratosphérique pénètrent dans la troposphère, lors de ce que l'on appelle les foliations de tropopause.

La hauteur de la troposphère varie selon la latitude depuis environ 17 kilomètres à l'équateur jusqu'à environ 9 km aux pôles, mais aussi en fonction des saisons.

La stratosphère est la seconde couche de l'atmosphère ; elle est située entre six et seize kilomètres d'altitude pour sa limite inférieure (tropopause) et cinquante kilomètres d'altitude pour sa limite supérieure (stratopause) par rapport à la surface de la Terre et selon sa latitude sur le globe (entre douze et cinquante kilomètres d'altitude en moyenne).

Un satellite comme Sentinel-5p est situé à 824 km d'altitude, soit bien au-delà de la stratosphère. On parle de mesures sur la colonne totale pour la masse d'air comprise entre le satellite et le sol. La distinction est souvent faite entre la colonne totale, la troposphère ou la stratosphère.

Dans le cas de Sentinel5p, TROPOMI fournit la mesure du NO₂ dans la colonne troposphérique.

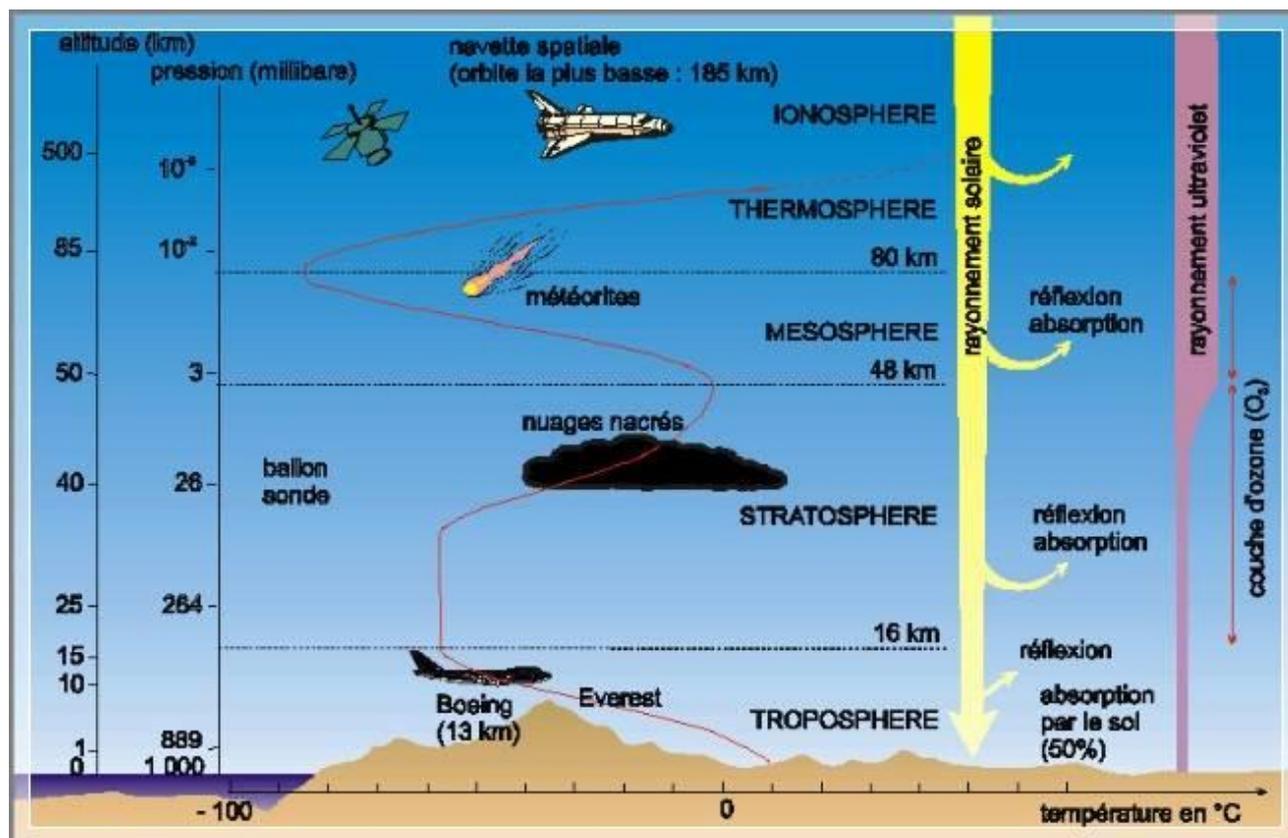


Figure 2 : les différentes couches de l'atmosphère (<https://meteo45.com>)

1.2. La répartition verticale des composants de l'atmosphère

La Figure 3 décrit une situation type de la répartition verticale des principaux constituants et gaz traces de l'atmosphère. L'ozone est un cas à part car les concentrations les plus élevées ne sont pas mesurées au sol mais à 20-30 km d'altitude au niveau de la « couche d'ozone ». La mesure d'une colonne verticale n'apportera donc pas d'information sur la présence du polluant au niveau du sol. C'est pourquoi les mesures d'ozone par satellite sont le plus souvent fournies en profil vertical avec des valeurs associées à différentes altitudes.

Le NO₂ est un polluant de faible durée de vie. Il est émis par les sources anthropiques et biogéniques au niveau du sol, où les concentrations sont les plus élevées. Ces dernières décroissent très rapidement avec l'altitude, pour remonter à nouveau, mais dans des niveaux beaucoup plus faibles au-delà des 10 kilomètres d'altitude. La mesure de la colonne verticale sera donc une bonne approximation de la concentration en NO₂ au sol.

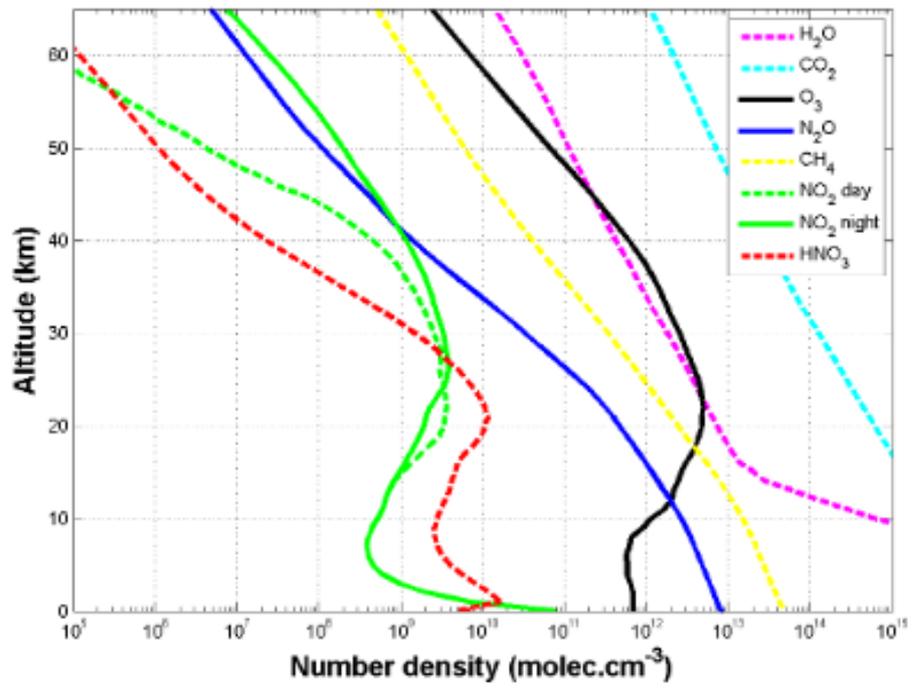


Figure 3 : Profils verticaux des principaux constituants et gaz traces de l'atmosphère [DE CLERCQ, IASB]

2. La production de données de qualité de l'air par satellites

2.1. Les satellites

Plusieurs missions ont été lancées depuis le siècle dernier pour la mesure de la qualité de l'air depuis l'espace. Actuellement, différentes catégories d'appareils de mesures, embarqués sur différents satellites parcourent la planète, produisant des données de qualité de l'air, à des résolutions géographiques différentes, sur les polluants d'intérêts majeurs dont le dioxyde d'azote, les particules, l'ozone ou le dioxyde de soufre. Des exemples de missions et appareils de mesures sont présentés dans le tableau suivant.

Satellite/ mission	Organisme	Appareil de mesure	Principales espèces mesurées	Résolution géographique	Début de disponibilité de la mesure
AQUA	NASA	AIRS, MODIS	CO, O3, NH3, aérosols, CO2	10 à 50km	déc-99
AURA	NASA	OMI	NO2, O3, SO2, aérosols	13 km x 25 km	juil-04
METOP-(A,B,C)	CNES/ Eumetsat	IASI	NH3, O3, NO2,CO, HCOOH	12 km	2016 (Metop- A)
Sentinel 5p	ESA	TROPOMI	O3, NO2, SO2, CH4, CO, formaldehyde, aerosols	5.5 x 3.5 km	octobre 2017
MTG-S1 / Sentinel 4 (lancement prévu en 2023)	ESA	UVN	O3, NO2, SO2, aérosols, CHOCHO et HCHO	8 km	Prévu en 2023

Les principaux satellites qui fournissent la donnée de qualité de l'air sur la France sont aujourd'hui des satellites à orbite polaire, qui couvrent quotidiennement la majeure partie de la planète. Ils fournissent une donnée ponctuelle par jour, lors de leur passage au-dessus d'un territoire, toujours à la même heure.

Le satellite de la mission Sentinel 4, dont le lancement initialement prévu en 2019 a été décalé en 2023, aura une orbite géostationnaire, avec un champ de mesure qui couvrira l'Europe et le nord de l'Afrique. Contrairement aux satellites actuellement opérationnels, Sentinel-4 produira sur cette zone une donnée de mesure à l'échelle horaire durant toutes les heures du jour.

2.2. Le principe de la mesure

Les capteurs optiques embarqués sur les satellites produisent des images acquises sur différentes longueurs d'onde (λ). Ils mesurent l'énergie solaire réfléchi (UV, visible, proche infrarouge) ou encore l'énergie émise par la surface terrestre (infrarouge thermique).

Le rayonnement qui traverse l'atmosphère est influencé par la présence des gaz et particules. Cette influence va dépendre de la longueur d'onde, du type et du diamètre des polluants mais également de l'angle d'incidence solaire et de l'angle de visée du satellite (Horvath 1997).

La donnée de mesure par satellite est exploitée sous les formes suivantes :

- Cartographies : pour la représentation spatiale de la présence des polluants, avec des résolutions très variables selon l'origine de la donnée (de 50 km à 1 km)
- Séries temporelles : à l'échelle journalière, mensuelle ou annuelle, puisqu'on ne dispose que d'une mesure par jour pour les satellites en orbite héliosynchrone. Ce type d'exploitation va prendre une toute autre ampleur lorsque la mission Sentinel 4, embarquée sur un satellite à orbite géostationnaire, sera opérationnelle.
- Profils verticaux : pour la compréhension de déplacement de panaches sur de grande échelle géographique



Figure 4 : profils verticaux de poussières du Sahara vue par le satellite Calipso - © NASA

- Prévisions : certaines sources de données satellites sont exploitées dans des modèles statistiques pour produire une donnée de prévision à court terme.

2.3. Les unités de mesures

La télédétection est l'ensemble des techniques qui sont utilisées pour la détermination à distance des propriétés des surfaces et de l'atmosphère terrestres à partir des rayonnements qu'elles réfléchissent ou émettent dans différents domaines de longueurs d'ondes.

On parle de télédétection passive lorsque le satellite reçoit :

- le rayonnement solaire incident réfléchi par la surface terrestre et l'atmosphère dans le domaine du visible et de l'infrarouge proche,
- le rayonnement propre de la Terre dans l'infrarouge lointain.

Contrairement aux appareils de mesure au sol couramment utilisés dans les réseaux de mesures, les données produites par les satellites ne sont pas accessibles en concentration de type $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (à moins d'avoir fait l'objet de retraitement ou modélisation).

Selon la source de données et le polluant étudié, les données vont être accessibles sous différents formats unités et altitudes. A titre d'exemple, les données de dioxyde d'azote de Sentinel 5p sont disponibles en nombre de molécules sur la colonne atmosphérique totale (colonne d'air situé entre le satellite et le sol terrestre), avec une distinction avec les molécules contenues dans la tropopause et la stratosphère.

Les données de méthane de de Sentinel sont disponibles en pbb moyennées sur la colonne totale.

Dans le cas de l'ozone notamment, les données sont souvent fournies à plusieurs altitudes, comme dans le cas des données IASI-GOME 2.

Dans le cas des particules, les informations sont, entre autres, fournies en épaisseur optique (AOD, Aerosol Optical Depth) incluant toutes les espèces présentes, sans distinction de granulométrie, avec une différenciation par longueur d'onde d'absorption.

→ **VMR** : (Volume mixing ratio)

Le ratio de mélange d'un gaz (aussi appelée fraction molaire) est le nombre de mole d'un gaz par mole d'air. Il est donné en mole/mole, ou, lorsqu'on parle de VMR (volume mixing ratio) en v/v (Volume du gaz/volume d'air), puisque le volume occupé par un gaz parfait est proportionnel au nombre de molécule.

La fraction molaire d'un gaz a l'avantage de rester constante lorsque la densité de l'air change.

→ **AOD** : aerosol optical depth (ou AOT pour Aerosol Optical Thickness)

Le degré auquel l'aérosol empêche la transmission de la lumière par absorption ou diffusion de la lumière à travers la totalité de la colonne verticale de l'atmosphère située entre le satellite et la surface terrestre.

→ **VCD** : Vertical Column Densité

Nombre de molécule d'un gaz atmosphérique contenu dans la colonne d'air située entre le satellite et la surface terrestre (par unité de surface terrestre).

3. Bilan de la qualité de l'air sur la région Nouvelle Aquitaine

3.1. Le dioxyde d'azote (NO₂)

La durée de vie du dioxyde d'azote est relativement courte et sa concentration est maximale directement aux abords des sources d'émissions. La durée de vie du NO₂ est trop courte pour qu'il puisse être transporté dans la stratosphère. La mesure de la colonne verticale sera donc une bonne approximation de la concentration en NO₂ au sol.

3.1.1. Bilan 2019 des concentrations de NO₂ (Sentinel 5p)

Mission : Sentinel 5p
Instrument : TROPOMI (+ autres pour la prise en compte de la couverture nuageuse)
Résolution 5.5 x 3.5 km (7x3.5 avant le 7 août 2019)
Données : VCD (Vertical Column Density) en mole/cm² sur la colonne troposphérique
qa_value>0.5 (indice de qualité de la donnée retenu)

La carte Figure 5 représente les concentrations moyennes annuelles (colonne troposphérique) en NO₂ sur la France pour l'année 2019, mesurées par Sentinel 5p.

Plusieurs enseignements peuvent en être tirés pour la région Nouvelle Aquitaine ; la région présente dans l'ensemble les concentrations moyennes en NO₂ parmi les plus faibles du territoire national. Les valeurs les plus élevées sont mesurées à Bordeaux, le long de l'autoroute A63 et au niveau de Bayonne/Biarritz dans la continuité des surconcentrations observées sur la côte espagnole.

Les départements du nord de la région (Deux Sèvres et Vienne) ont des concentrations plus élevées par rapport au reste du territoire car ils sont sous l'influence des masses d'air provenant du nord de la France, en particulier de la région Parisienne et des pays frontaliers comme la Belgique, l'Allemagne ou la Grande Bretagne.

Des concentrations sensiblement plus élevées sont observées en zone maritime, en lien entre autres avec le trafic des navires, sur la Méditerranée et la Manche mais l'Atlantique sur la côte Aquitaine semble plus épargné par cette pollution.

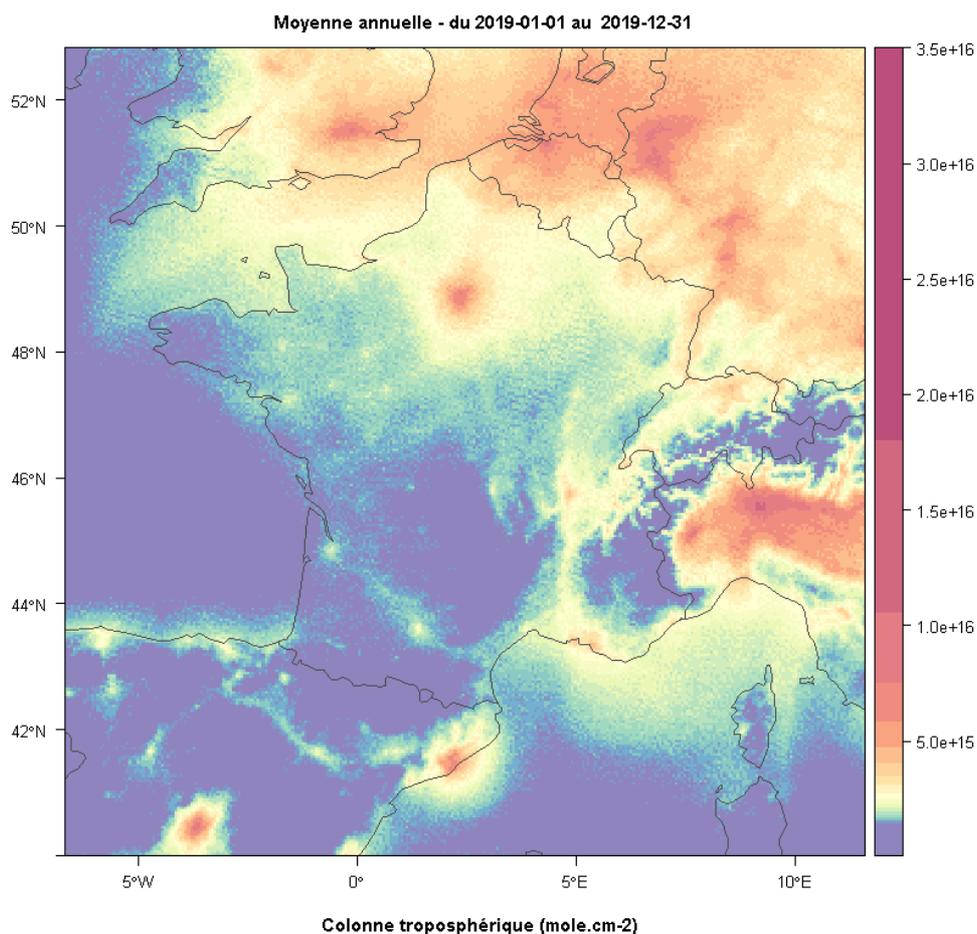


Figure 5 : moyenne annuelle 2019 de la colonne troposphérique NO2 – Sentinel5p

La Figure 6 représente l'évolution des concentrations de la colonne troposphérique au cours de l'année 2019. Elle illustre le caractère saisonnier du polluant, avec les valeurs plus élevées durant l'hiver, ici en particulier durant mes mois de janvier et février, et qui diminuent nettement durant l'été. Les concentrations les plus faibles sont ici représentées durant les mois de juin à août.

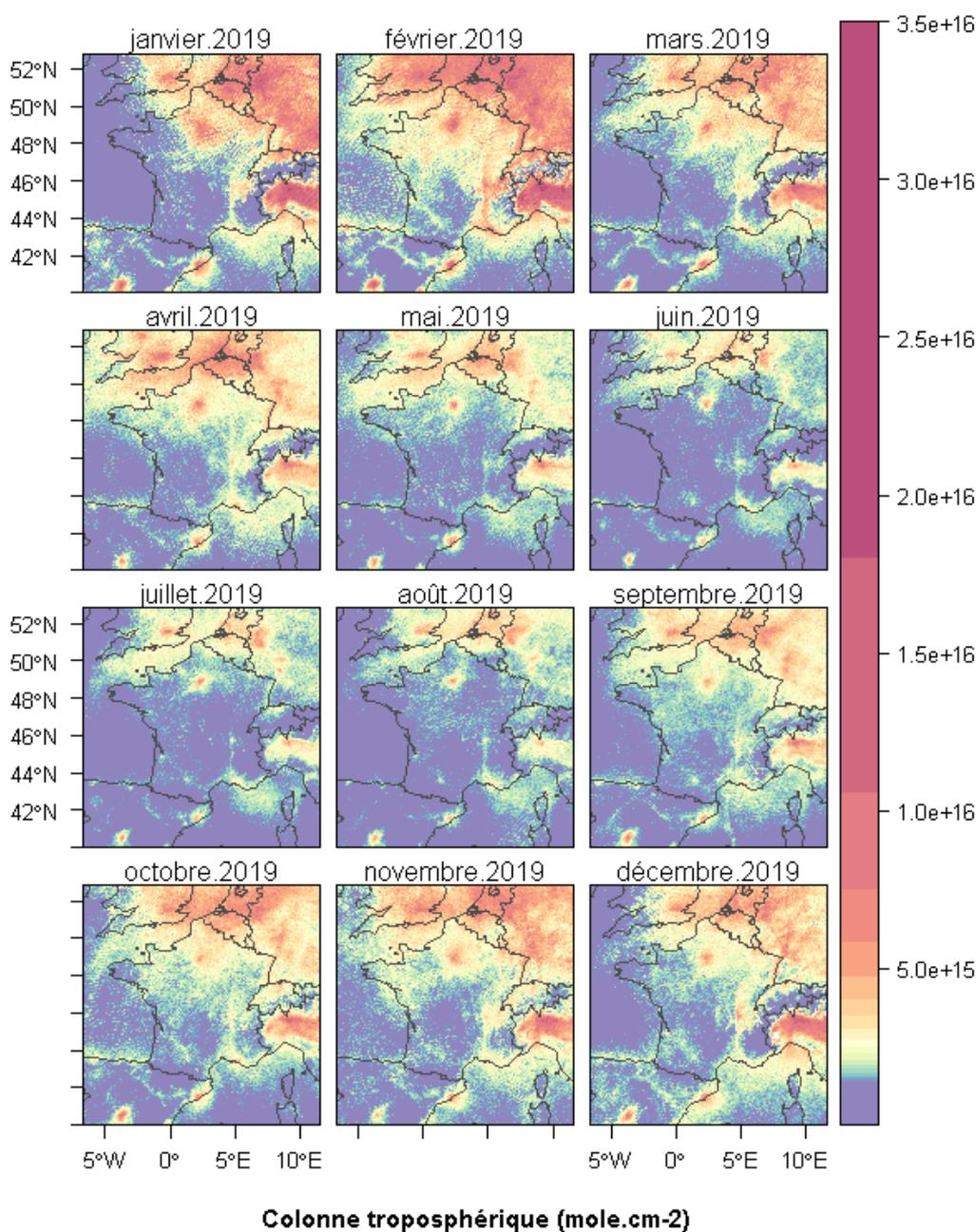


Figure 6 : concentrations mensuelles de la colonne troposphérique NO₂ -2019- Sentinel 5p

3.1.1. Evolution des concentrations de NO₂ pendant la période du 17 mars au 11 mai 2020 (Sentinel 5p)

Les cartes de la Figure 7 montre l'impact du confinement de mars/avril 2020 sur les concentrations de NO₂ dans la colonne troposphérique, mesuré par Sentinel-5p en comparant les concentrations à la même période en 2019. Même si les conditions climatiques changent d'une année à l'autre, la durée de la période prise en compte est suffisante pour permettre la comparaison.

La baisse des concentrations est bien visible sur presque l'ensemble du territoire national, et en particulier au niveau des principales agglomérations, dont Bordeaux Métropole. Les baisses sont en particulier plus marquées sur l'Île de France et la vallée du Rhône et la Méditerranée.

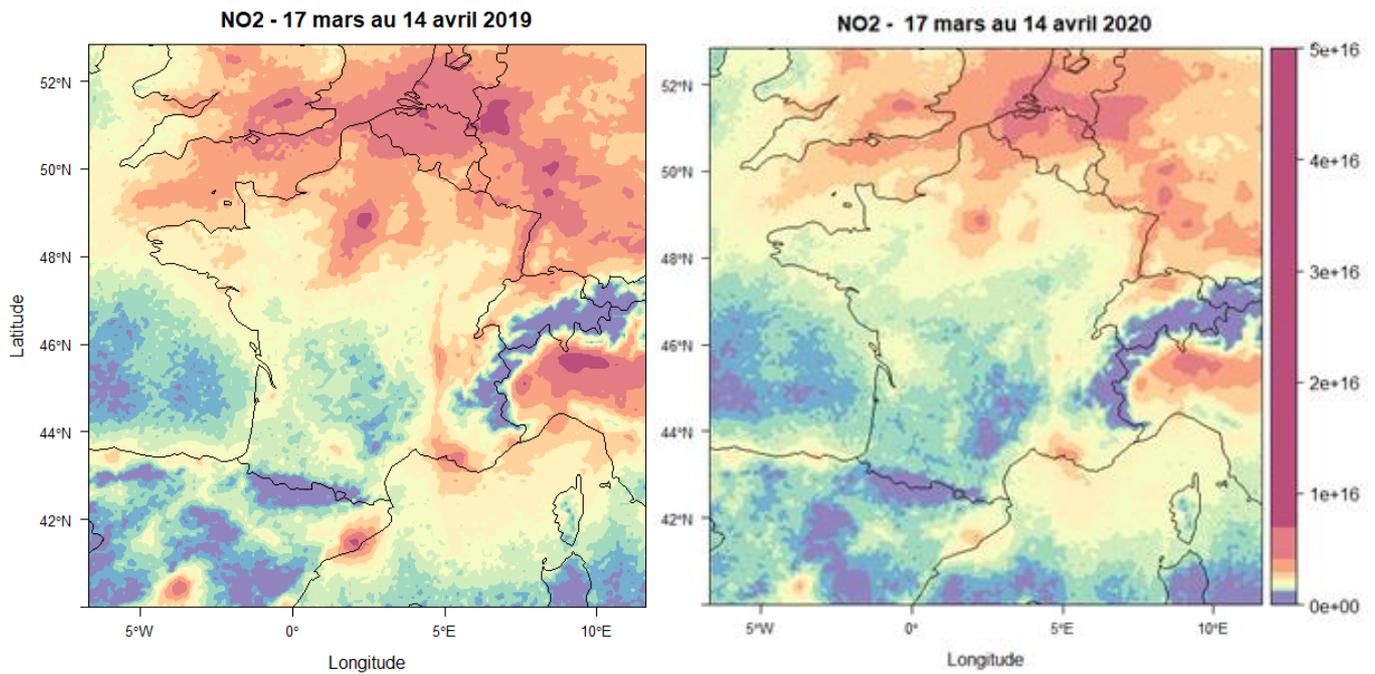


Figure 7 : NO₂ - colonne troposphérique en mole.cm⁻². Données Sentinel5p sur la période du 17 mars au 14 avril 2019 à gauche et 2020 à droite.

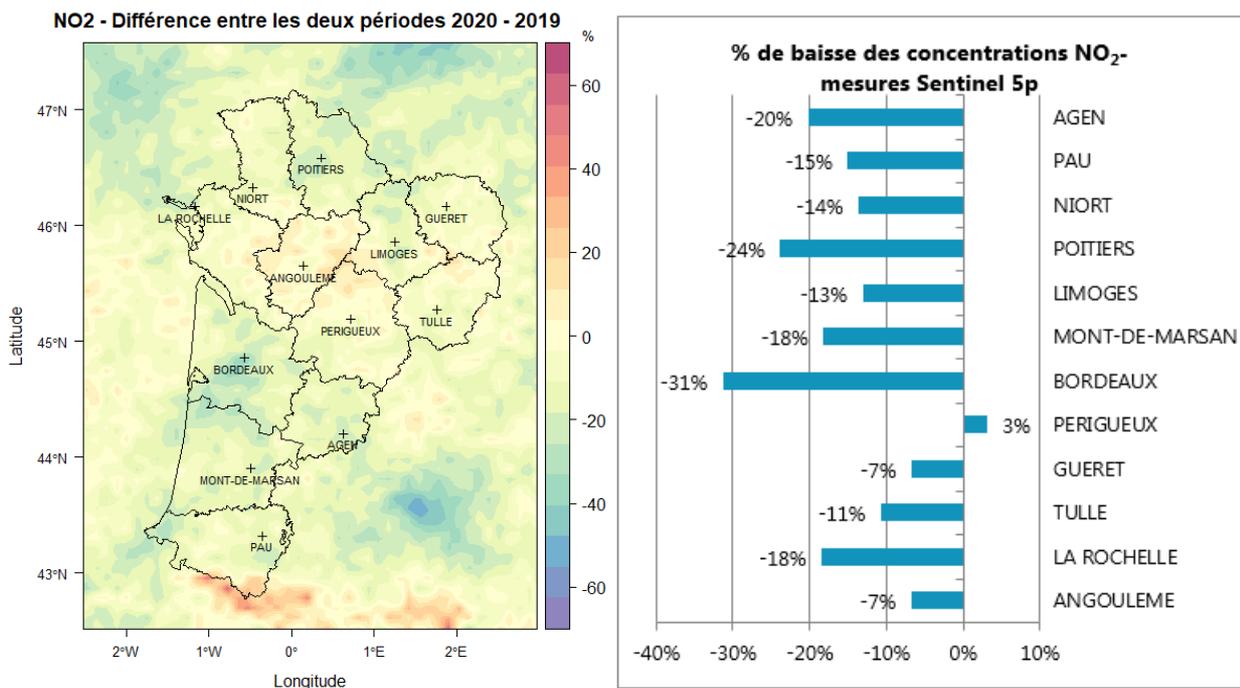


Figure 8 : évolution en % des concentrations NO₂ mesurées sur la région Nouvelle-Aquitaine entre les périodes du 17 mars au 14 avril 2019 et du 17 mars au 14 avril 2020.

La Figure 8 détail cette comparaison sur la région Nouvelle-Aquitaine. Sur la quasi-totalité des agglomérations du territoire, les baisses de concentrations sont significatives. Les plus fortes baisses sont mesurées sur Bordeaux. Sur certaines zones de la région, là où les concentrations NO₂ sont les plus basses (Pyrénées, Charente, Dordogne), les valeurs sont plus stables, voir par endroit en légère hausse. Périgueux est ainsi la seule agglomération parmi celle prises en compte où on observe une légère augmentation des concentrations entre les 2 périodes.

3.1.2. Evolution des concentrations moyennes annuelles de dioxyde d'azote depuis 2005 (OMI Aura)

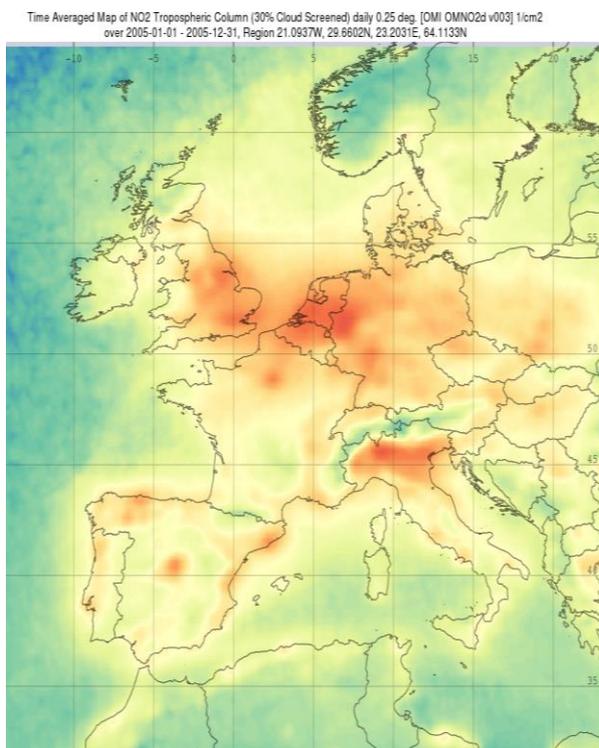
Satellite : Aura
Instrument : OMI
Résolution : 0.25x0.25 degrés (environ 20 km sur la France)
Données disponibles pour une couverture nuageuse < 30%
Données : VCD (Vertical Column Density) en mole/cm² sur la colonne totale et sur la colonne troposphérique et la colonne stratosphérique

La résolution de OMI-AURA est beaucoup plus faible que celle de Sentinel5p, la mesure a donc peu d'intérêt dans la production d'un bilan lorsque la mesure Sentinel5p est disponible (depuis octobre 2017). On dispose en revanche avec OMI-AURA d'un historique important, démarrant fin 2004, et qui permet un suivi objectif de l'évolution des concentrations dans la colonne troposphérique ces 15 dernières années.

Les deux cartes ci-dessous représente les moyennes annuelles en NO₂ mesurées par satellites en 2005 et 2019, soit l'année la plus ancienne et l'année la plus récente disponible via OMI. Elles illustrent la baisse des concentrations de dioxyde d'azote, également observées au niveau des stations de mesures, de ces vingt dernières années. Cette baisse est visible au niveau des grands axes routiers, des grandes métropoles comme Paris, ou des zones industrielles comme celles du nord de l'Italie.

A noter que certains axes maritimes sont visibles sur la carte (en particulier du sud de l'Angleterre au nord-ouest de l'Espagne, autant en 2005 qu'en 2019). L'impact du trafic maritime sur la Manche est en revanche difficilement différenciable de l'impact des panaches des sources anthropiques terrestres.

2005 – NO₂ colonne troposphérique



2019– NO₂ colonne troposphérique

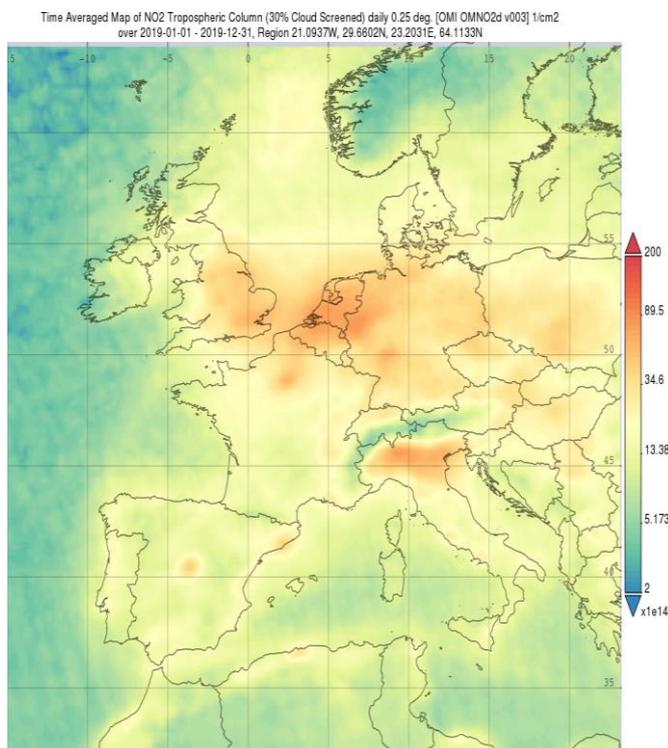


Figure 9 : Concentrations moyennes annuelles sur la colonne troposphérique- NO₂ 2005 et 2019, OMI-AURA, NASA. (cartes produites avec GIOVANNI)

La carte suivante est un zoom de ces données à l'échelle de la Nouvelle-Aquitaine. Elle présente en % l'évolution de la concentrations NO₂ de la colonne troposphérique entre 2005 et 2019. Comme partout ailleurs, les valeurs de NO₂ sont en baisse, en particulier là où les émissions sont les plus importantes : en zone urbaine

(en particulier sur Bordeaux, où la baisse avoisine les 40%) ou le long des autoroutes (A62, A10). Ces baisses sont, entre autres, liées à l'amélioration des émissions individuelles des véhicules particuliers lors du renouvellement du parc routier.

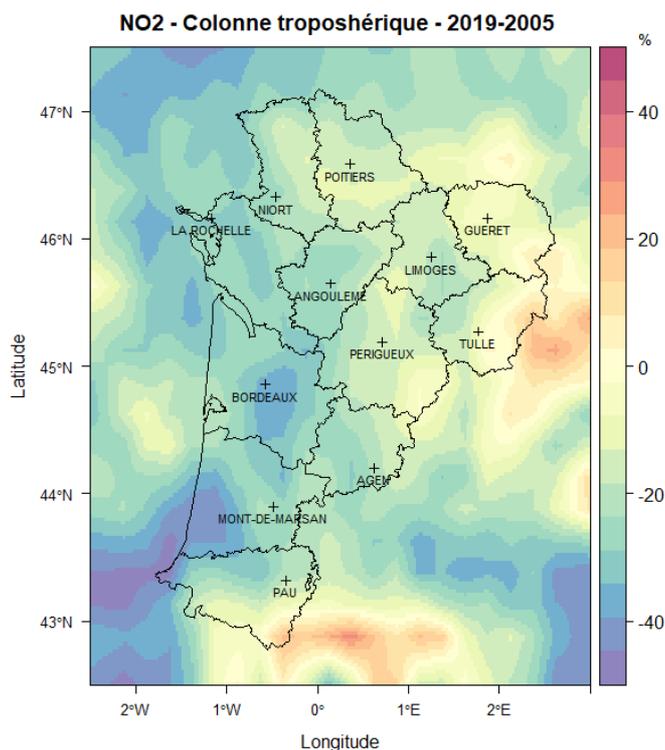


Figure 10 : Evolution en % des concentrations de NO₂ en région Nouvelle-Aquitaine entre 2005 et 2019 (OMI-AURA)

Le graphique suivant représente l'évolution des moyennes mensuelles mesurées par le satellite Aura sur Bordeaux (moyenne sur le territoire) entre 2005 et 2019. La droite en pointillé représente la tendance sur l'ensemble de la période.

Les variations saisonnières (augmentation en période hivernale, baisse en période estivale) sont bien représentées par la mesure satellite, avec une importante variabilité interannuelle. De même que sur la représentation cartographique, la tendance sur la période montre une baisse significative des concentrations en NO₂ sur Bordeaux.

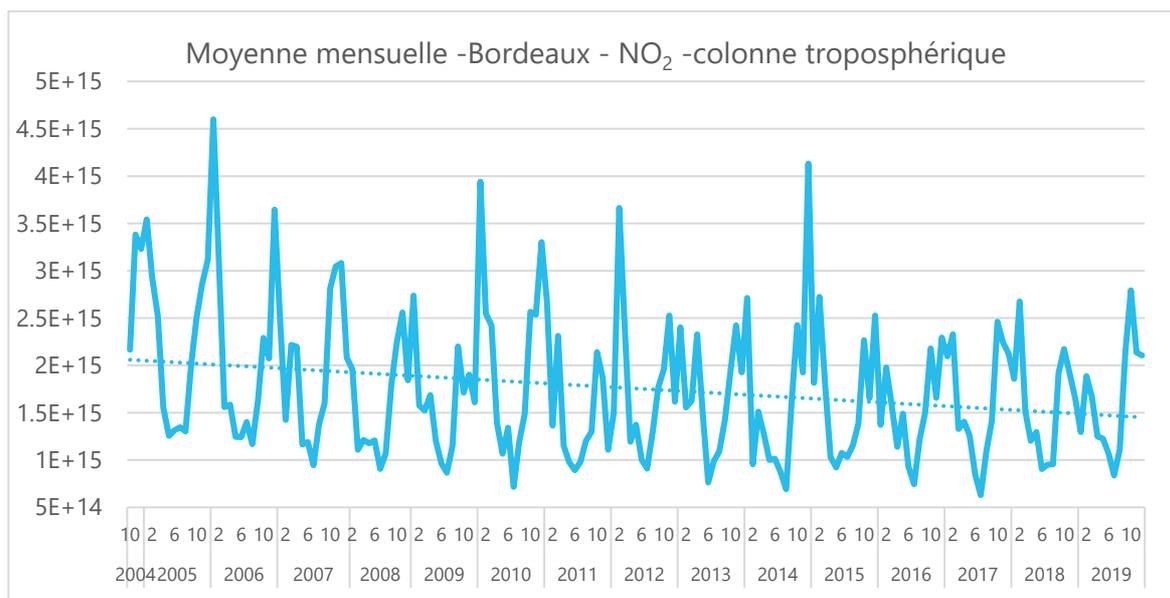


Figure 11 : évolution des concentrations mensuelles de la colonne troposphérique sur Bordeaux mesurées par AURA/OMI.

3.2. L'ammoniac (NH₃)

3.2.1. Bilan des concentrations annuelles d'ammoniac en 2019 sur la région Nouvelle Aquitaine

Satellite : METOP
Instrument : IASI
Résolution : 12-km-diameter-pixels spaced by 25 km at nadir
Données : Colonne totale (mole.cm⁻²)

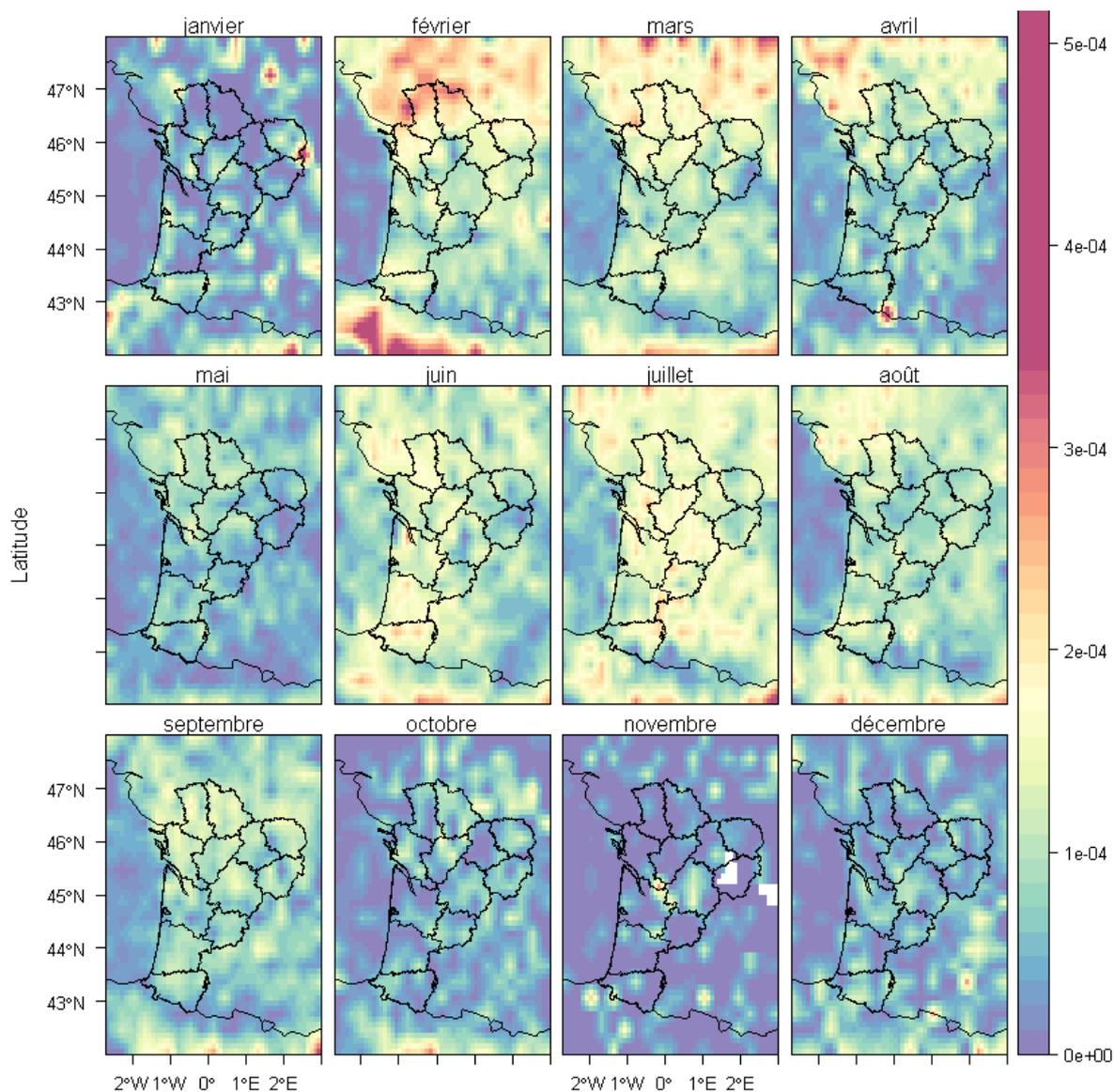


Figure 12 : Concentrations moyennes mensuelles d'ammoniac mesurées par IASI en 2019 sur la région Nouvelle-Aquitaine.

La Figure 25 représente sur le territoire régional la variabilité saisonnière et la répartition spatiale des concentrations d'ammoniac. Les niveaux augmentent au printemps, en particulier sur le nord de la région (Deux Sèvres, Vienne). A cette époque de l'année, les températures nocturnes sont encore fraîches, et la présence d'ammoniac combinée à celle des oxydes d'azote conduit généralement à la formation de particules secondaires semi-volatiles de nitrate d'ammonium. Elles sont souvent à l'origine des pics de pollution par les

PM10 qui apparaissent à la fin de l'hiver et au début du printemps. Cela a été par exemple le cas durant le mois d'avril 2020, où des pics de pollutions par les particules ont été enregistrés en France malgré la baisse des activités liées au confinement (Figure 26).

Les concentrations d'ammoniac baissent ensuite en avril mai, pour augmenter à nouveau durant l'été. A cette période de l'année, les températures sont trop élevées pour permettre la formation de nitrate d'ammonium, il n'y a donc plus d'épisode de pollution en lien avec des particules semi-volatiles malgré la présence de l'ammoniac. Les concentrations baissent à nouveau à partir de l'automne jusqu'au mois de janvier.

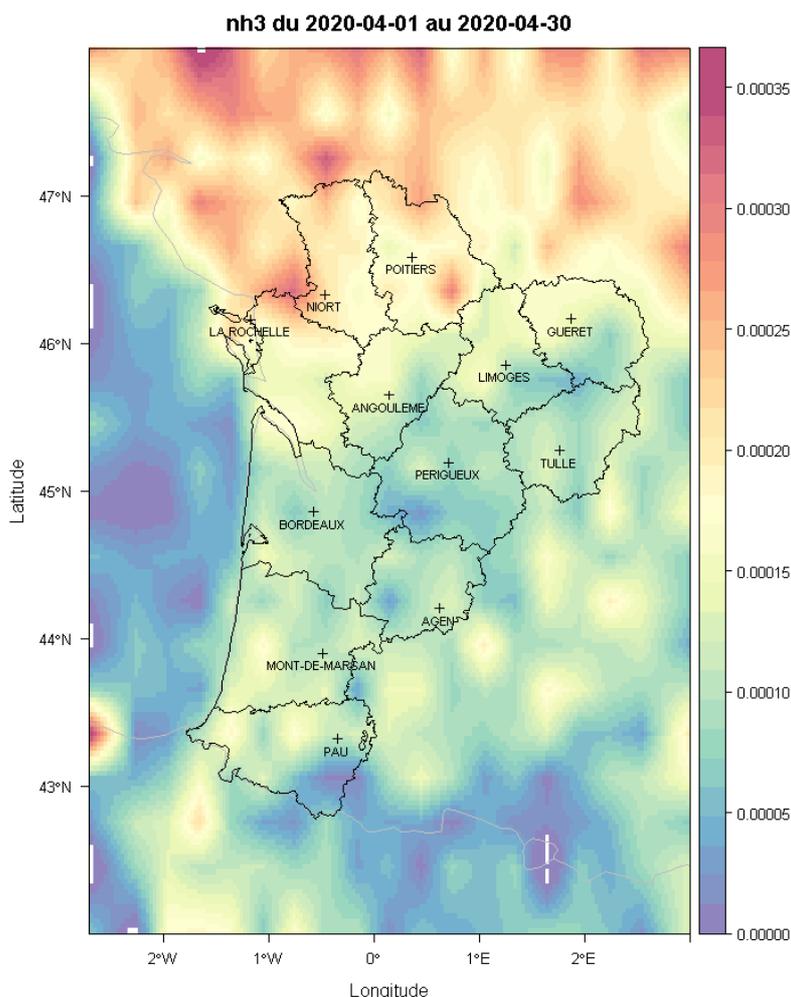


Figure 13 : concentrations moyenne mensuelle d'ammoniac en avril 2020 (données IASI)

3.3. L'ozone (O₃)

Les données d'ozone sont plus difficiles à appréhender via la mesure satellite si l'on souhaite obtenir une information au niveau du sol. Les concentrations au niveau du sol sont en effet très inférieures aux concentrations à plusieurs dizaines de kilomètres du sol, comme le montre les profils d'ozone observés sur Bordeaux en juillet et novembre 2020 (Figure 14).

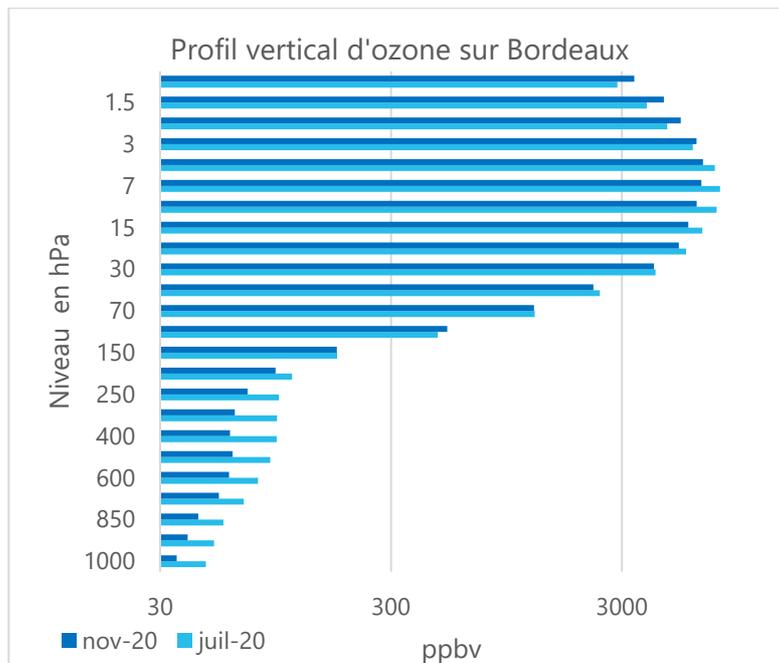


Figure 14 Profil vertical d'ozone au-dessus de Bordeaux (moyenne des mois de juillet et novembre 2020)
(Données : daytime-ascending, AIRS/TERRA)

C'est pourquoi les données d'ozone de mesures par satellites sont souvent fournies en profils verticaux, avec souvent une sensibilité médiocre au niveau du sol.

C'est à partir de ce constat que le LISA (CNRS) a produit une donnée combinée des mesures des instruments IASI + GOME2 pour obtenir une donnée exploitable à moins de 3 kilomètres d'altitude.

3.3.1. Données d'ozone : IASI + GOME2

Satellite : METOP
 Instrument : IASI + GOME2
 Résolution : 12-km-diameter-pixels spaced by 25 km at nadir
 Données : Niveau < 3km (mol.mol⁻¹)

Les valeurs d'ozone (mixing ratio en mol/mol) sont fournies sous forme de profil sur 35 niveaux pour chaque maille. Chaque niveau correspond à une altitude ASL (Above Sea Level) avec un pas de :

- 1km en dessous de 26 km
- 2 km entre 26km et 30km
- 5 km entre 30km et 60km

L'ozone en basse altitude est évalué au niveau à 3km ASL, là où la réponse IASI+GOME2 est la meilleure.

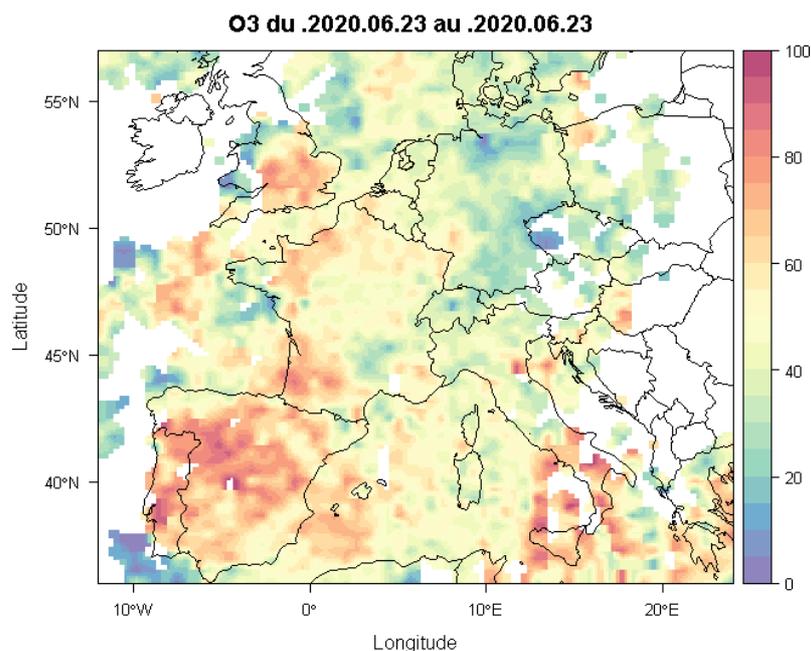


Figure 15 ozone à 3km (mole.mole⁻¹) pour la journée du 23 juin 2020. IASI + GOME2

3.4. Le methane (CH₄)

Mission/Satellite : Sentinel 5p
 Instrument : TROPOMI
 Résolution : 5.5 x 3.5 km
 Longueur d'onde : 760 nm + SWIR
 Données : mixed ratio 10⁻⁹ (ppb) sur la colonne totale
 qa>0.5 (indice de qualité de la donnée retenu)

La carte Figure 16 représente les valeurs de méthane (nombre de mole de méthane par mole d'air) mesurées par TROPOMI-Sentinel5p sur la France durant l'année 2019. Hormis quelques spots particuliers, les concentrations les plus élevées du territoire sont situées sur un segment traversant la France en partant de la Charente-Maritime, passant par la région Centre Val de Loire et se terminant sur la région Champagne-Ardenne.

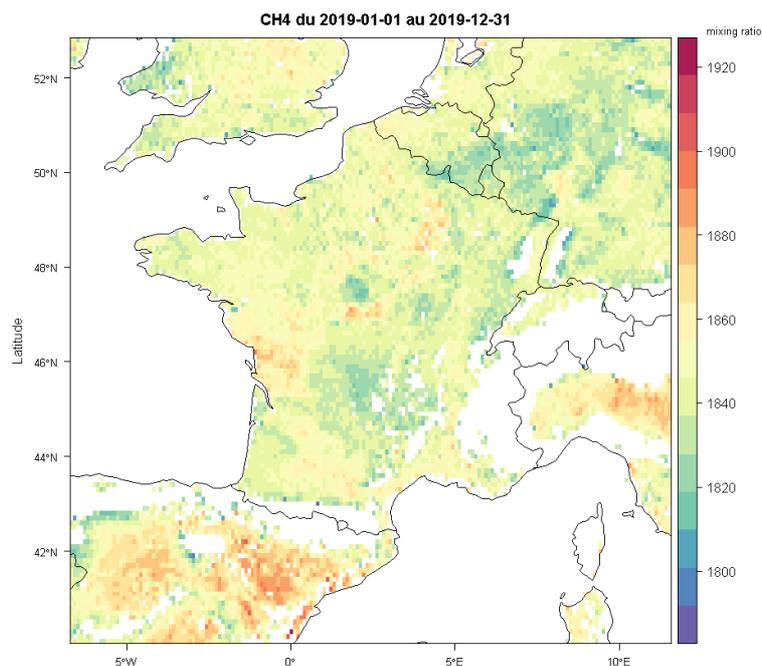


Figure 16 : Méthane - Mixing - ratio - TROPOMI/Sentinel 5p - moyenne 2019 sur le territoire français. Le trait gris délimite les départements de la région Nouvelle-Aquitaine

La carte Figure 17 montre les mêmes valeurs à l'échelle du territoire de Nouvelle-Aquitaine. Les valeurs les plus élevées n'ont pas été mesurées au niveau des marais (Deux-Sèvres, Vendée) ni au niveau des zones d'élevages bovins du Limousin, mais sur la Charente Maritime et l'ouest de la Charente, la Vienne et le Lot et Garonne. La comparaison de la localisation de ces territoires avec la carte de l'occupation des sols Figure 17 montre que les zones où le ratio est le plus élevé correspondent aux plus fortes densités de terres cultivées (terres arables). On peut avancer l'hypothèse des épandages d'engrais organiques, source d'émissions de méthane, pour expliquer ces résultats.

Le nord des Pyrénées Atlantiques, ou le sud des Landes, où la densité de terres cultivées est également élevée ont un ratio plus faible, reflet probable de techniques culturales ou de sols de nature différente.

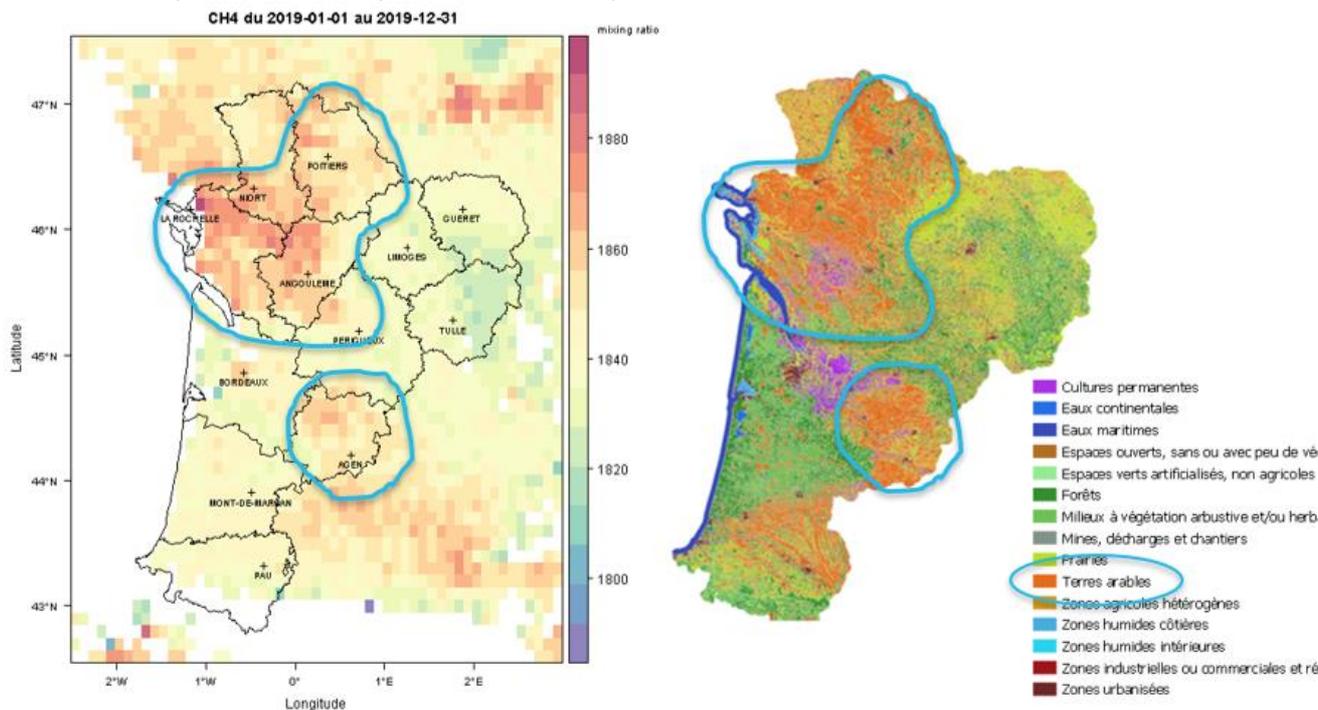


Figure 17 : Méthane - Mixing - ratio - TROPOMI/Sentinel 5p – moyenne 2019 sur la région Nouvelle Aquitaine et occupation du sol sur la Région Nouvelle-aquitaine (source CLC 2012)

Les concentrations de méthane augmentent de manière générale au fil des ans. La Figure 18 en est une illustration, via la représentation de l'évolution des concentrations mensuelles de méthane mesurées par AIRS le satellite AURA de la NASA depuis 2002 (il ne s'agit pas d'une situation spécifique à La Rochelle, dont le territoire n'a été choisi qu'à titre d'exemple).

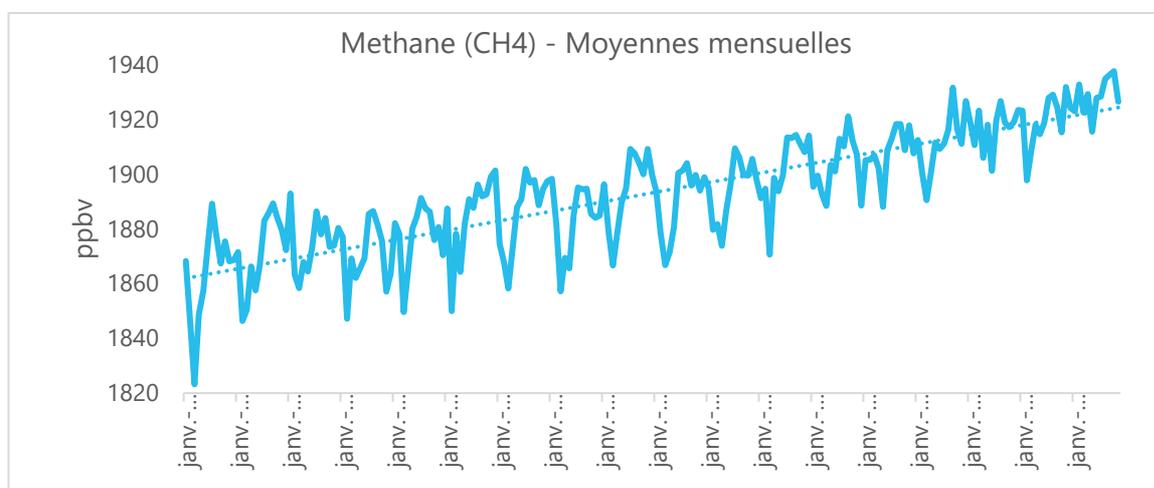


Figure 18 : évolution des concentrations mensuelles de méthane au niveau de La Rochelle depuis 2003 altitude 1000 hPa– source AIRS, NASA

3.5. Le dioxyde de carbone (CO₂)

3.5.1. Evolution des concentrations de CO₂ depuis 2010

Satellite : Aqua
Instrument : AIRS
Résolution : 2 x 2.5 °
Données : ppbv

Le graphique ci-dessous représente l'évolution des concentrations de CO₂ sur la période 2010-2017 sur les 3 agglomérations de Bordeaux, Limoges et Poitiers. Les données sont issues de l'instrument AIRS de la NASA, qui n'est plus en capacité de mesurer le CO₂ depuis 2017.

L'évolution des concentrations est à la hausse, comme sur l'ensemble du territoire national. Il s'agit d'un polluant dont la présence est homogène sur de grandes échelles géographiques, ce qui explique la grande similarité des valeurs entre les trois territoires pris en exemple.

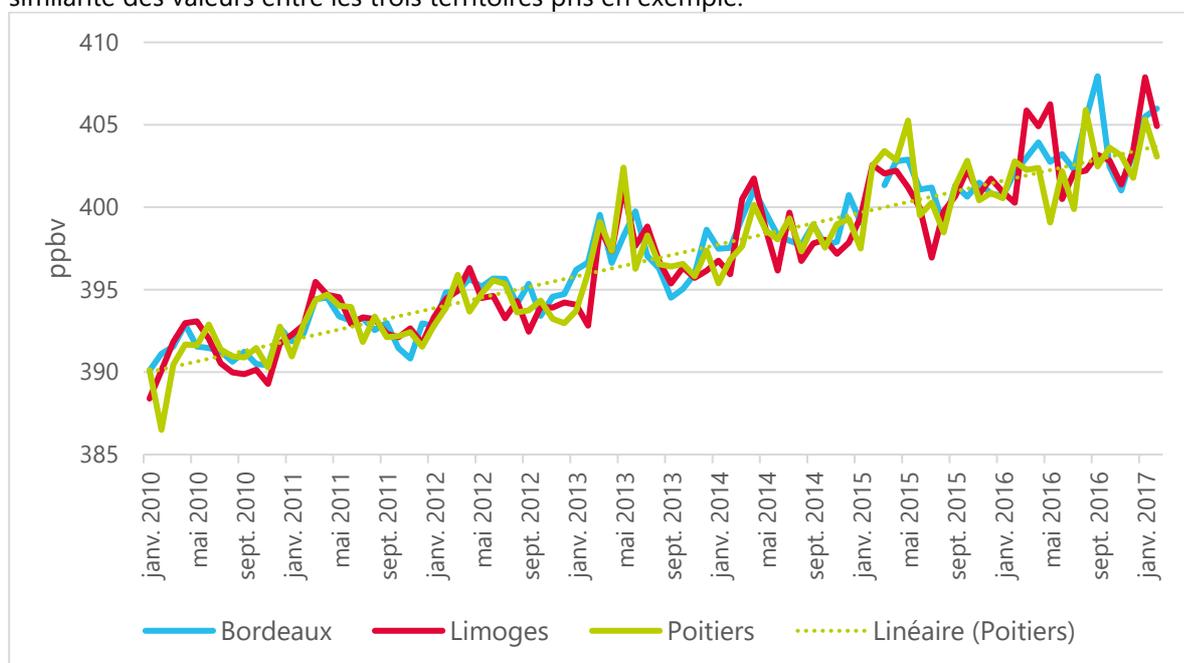


Figure 19 : AIRS - Evolution des concentrations troposphériques mensuelles de CO₂ sur 3 agglomérations de 2010 à 2017

3.5.2. Cartographie des émissions et puits de CO₂ liés à la végétation

Satellite : AQUA, SUOMI NPP
Instrument : MODIS, VIIRS
Résolution : 9 km
Données : g C.m⁻².j⁻¹

Les écosystèmes et la végétation jouent un rôle majeur dans la dynamique des émissions et puits de CO₂, fortement dépendant de la nature des écosystèmes. L'étude de ces phénomènes permet de mieux comprendre les potentiels de séquestration du CO₂.

Le potentiel de séquestration du CO₂ d'un écosystème est fonction du climat, de l'utilisation des terres, des pratiques locales, du type de sol et de la topographie. Au cours d'une année, un même écosystème peut être source de CO₂, généralement pendant la période hivernale (respiration), et puits de CO₂ pendant la période estivale (photosynthèse).

Les données SMAP produites par la NASA fournissent une donnée journalière sur l'ensemble du globe des flux de CO₂ liés aux écosystèmes à travers le NEE : Net Ecosystème Exchange. Lorsque le NEE est positif, l'écosystème émet du CO₂, lorsqu'il est négatif, l'écosystème absorbe du CO₂.

Le NEE est fourni par classe de végétation selon le système PFT.

Le NEE est fonction des saisons comme le montre la Figure 20. Durant les mois de février et mars, tous les écosystèmes de la région sont émetteurs de CO₂ en raison de leur respiration.

Durant les mois de mis à juillet, à l'inverse, le NEE est négatif, les écosystèmes séquestrent le carbone.

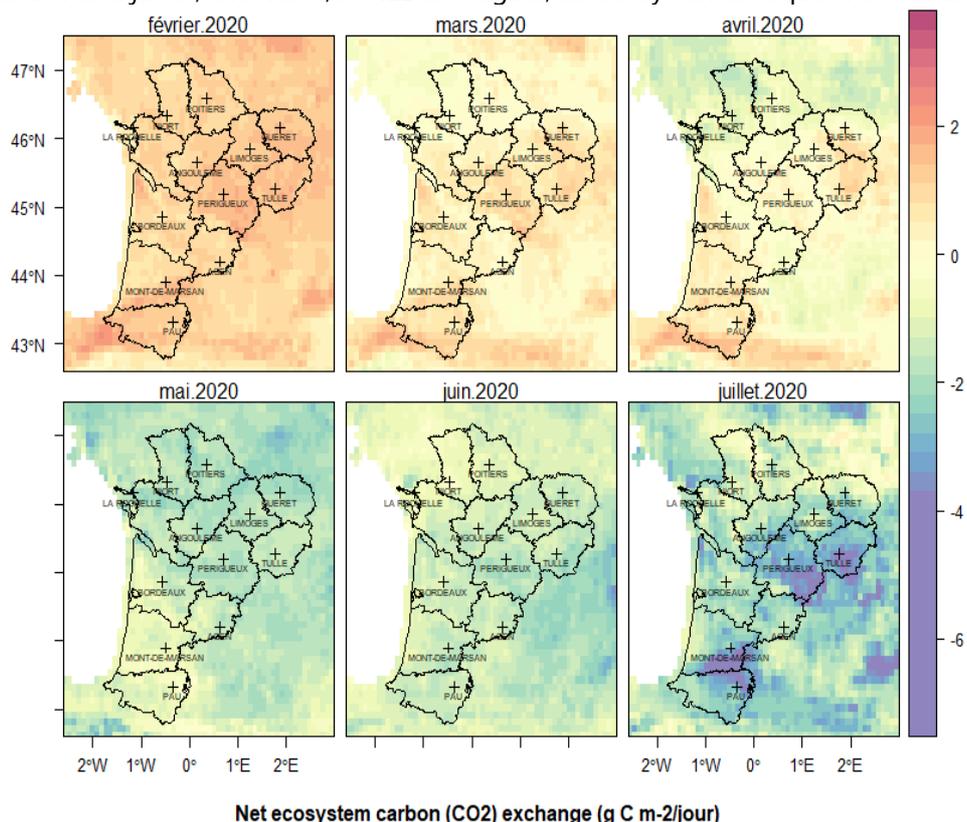


Figure 20: moyenne mensuelle 2020 des échanges nets de CO₂ par les écosystèmes

3.6. Le monoxyde de carbone (CO)

Satellite : Aqua
 Instrument : AIRS
 Résolution : 1 °
 Données : ppbv , profil vertical. Données disponibles pour différentes altitudes définies en niveau de pression (hPa).

Le graphique ci-dessous représente l'évolution des concentrations moyennes mensuelles de monoxyde de carbone mesurées sur l'agglomération de Limoges depuis 2003 (mesure proche du sol / altitude 925 hPa). Les concentrations suivent un cycle saisonnier avec des valeurs plus élevées durant l'hiver. La tendance globale à l'échelle de la vingtaine d'année représentée est une tendance à la baisse qui se poursuit encore durant la dernière décennie. Il ne s'agit pas d'un cas spécifique au sud de la région, les concentrations de CO sont en baisse sur tout le territoire (hors source ponctuelle spécifique).

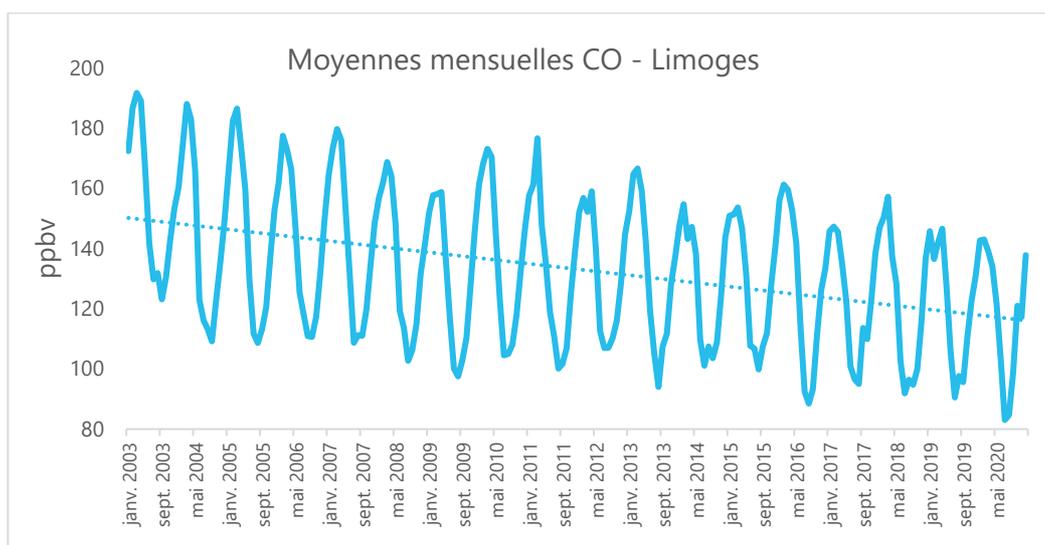


Figure 21 : Moyenne mensuelle de monoxyde de carbone (Daytime/Ascending, AIRS-only) à 925 hPa [AIRS AIRS3STM v006 de janvier 2003 à décembre 2020 sur l'aire : 1.9995W, 42.9112N, 0.813W, 44.0538.

3.7. Les particules

1. Particules

Satellites : TERRA+ AQUA

Instrument : MODIS

Résolution : 1km

Données : AOD 055

2. Composition des particules

Programme : MERRA2 (NASA)

Données : Dust, Embruns marins, Carbone organique, Black carbon, DMS, Sulfate. Concentrations au niveau du sol.

Si la quantification des espèces gazeuses a atteint un bon niveau de précision, ce n'est pas le cas pour les aérosols, souvent décrits uniquement sous la forme de leur effet sur l'épaisseur optique (AOD, Aerosol Optical Depth) et faisant un bilan de toutes les espèces présentes (PM2.5 et PM10).

En revanche, la multiplicité de satellites peut permettre d'affiner l'évaluation d'une concentration par recoupements entre les mesures. Des données « élaborées » de mesures des particules par satellite sont ainsi disponibles avec une résolution kilométrique.

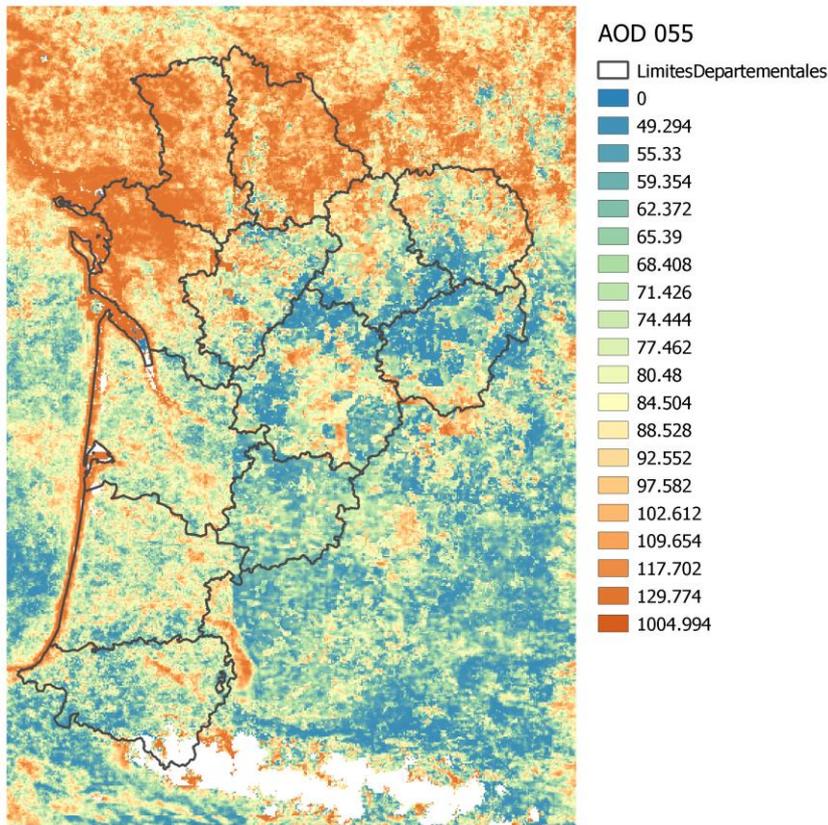


Figure 22 : Valeur moyenne pour l'AOD 055 du 01/03/2019 au 31/05/2019

La carte de la Figure 22 montre une moyenne mensuelle pour les aérosols mesurées de mars à mai 2019. Durant cette période, les concentrations ont été plus élevées sur le nord de la France, en raison de la présence

courant à cette période de l'année du nitrate d'ammonium. Des zones du territoires apparaissent également avec des valeurs plus élevées : c'est le cas par exemple de la zone industrielle de Lacq, ou de la façade atlantique, comme représenté dans la Figure 24.

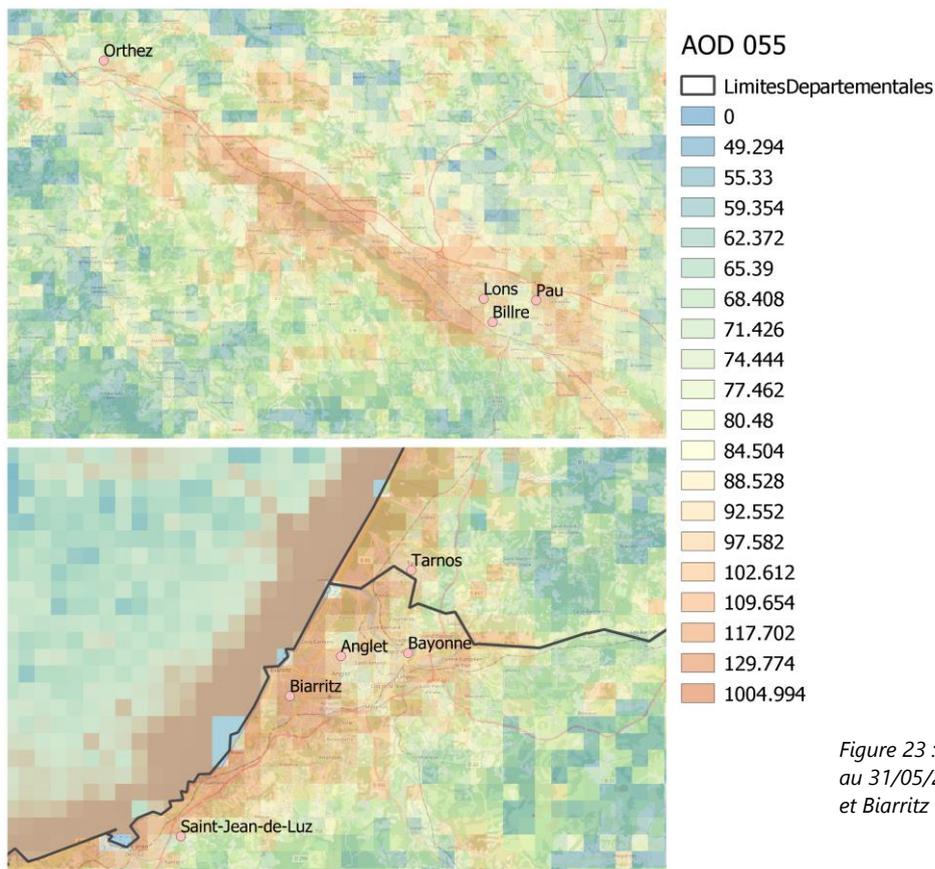
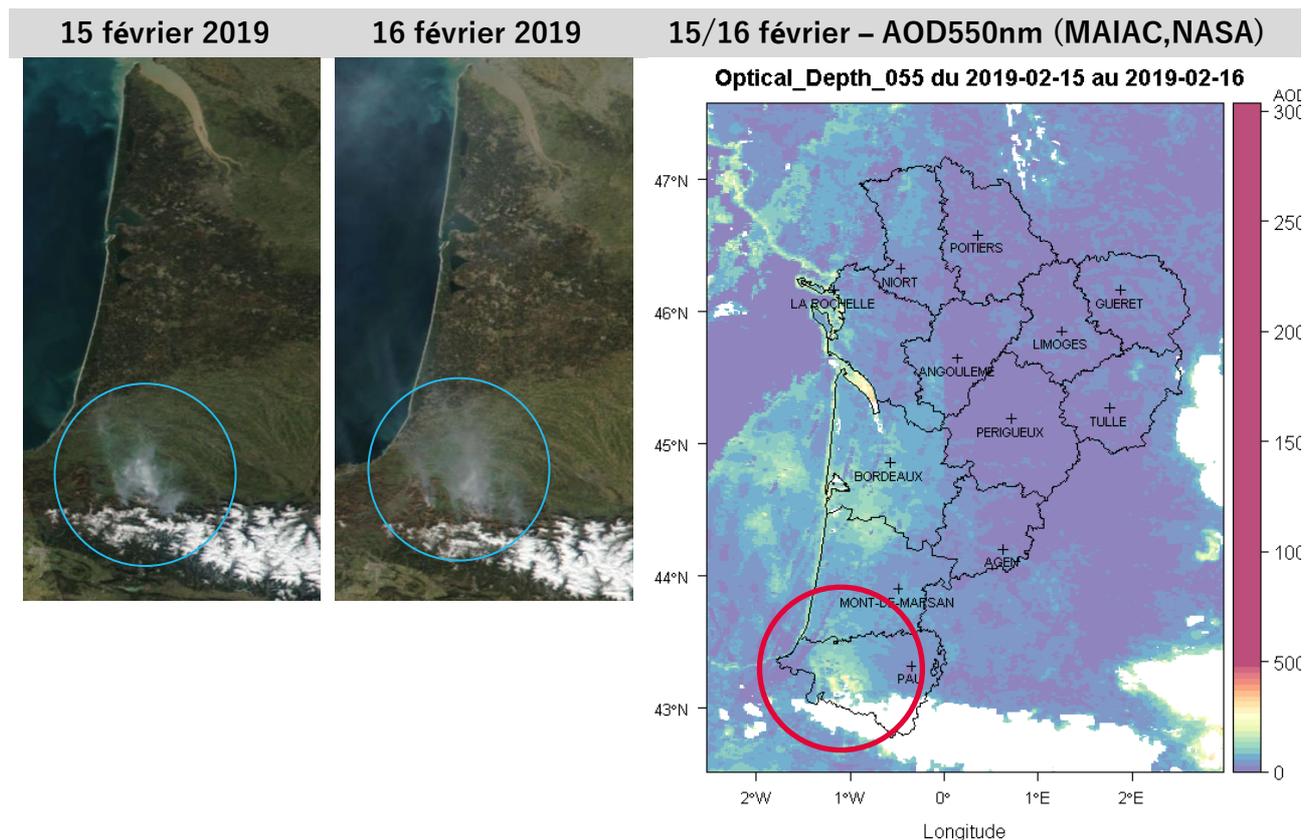


Figure 23 : Valeur moyenne pour l'AOD 055 du 01/03/2019 au 31/05/2019 - Zoom sur la zone Lacq (entre Orthez et Pau) et Biarritz

3.7.1. Exemple d'un épisode lié à l'écoquage sur les Pyrénées

En février 2019, le sud de la région Aquitaine a connu d'importants incendies sur le massif des Pyrénées dû à une pratique massive des écoquages. Le vent était orienté sud, le panache de fumée était visible à l'œil nu dans le tiers sud de la région.

La figure suivante représente à gauche les photos satellites des 15 et 16 février. Les panaches de fumée sont nettement visibles sur les images. Les données d'absorption par les particules produites par la NASA sur la carte de droite (données MAIAC) montre que les appareils de mesures sur les satellites ont bien pu bien quantifier l'impact de ces panaches. On observe des concentrations de particules sur la colonne totale plus élevées sur le sud de la région, sur la zone où se pratique l'écoquage.



L'impact de l'écoquage est également visible sur les données MERRA.

Le système MERRA, géré par la NASA (GMAO), intègre des données de divers systèmes satellites dans des modèles numériques pour produire des informations spatiales et temporelles de synthèse sur des variables climatiques difficilement directement observables. La donnée MERRA2 donne entre autres une information sur le détail de la composition et des sources de particules

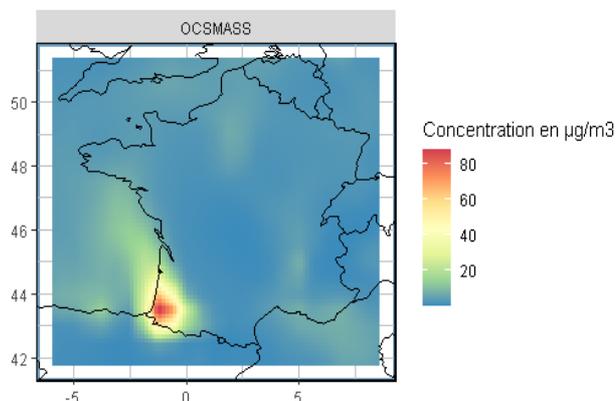


Figure 24 : MERRA2 (NASA), OC au sol des 15 et 16/02/2019

La carte de la représente les concentrations au sol du Carbone organique (OC), en moyenne sur les journées des 15 et 16 février 2019.

3.7.2. Exemple d'un épisode lié aux embruns

De par l'importance de sa façade Atlantique, la région Nouvelle Aquitaine est souvent concernée par des hausses des niveaux de particules à proximité de la cote, quand les conditions climatiques y sont favorables, c'est-à-dire par fort vent d'ouest. Les stations de mesure les plus proches du littoral enregistrent alors des hausses de concentrations en PM10 et PM2.5.

Cela a été, à titre d'exemple, le cas du 10 février 2020, comme illustré sur la Figure 25. Les valeurs les plus fortes sont à proximité de la côte, mais l'impact des embruns ne se limite pas à la façade Atlantique, et des hausses de concentrations de particules sont enregistrées jusqu'au centre de la France.

Les données MERRA pour la journée du 10 février confirment la contribution majeure des particules de sels marins.

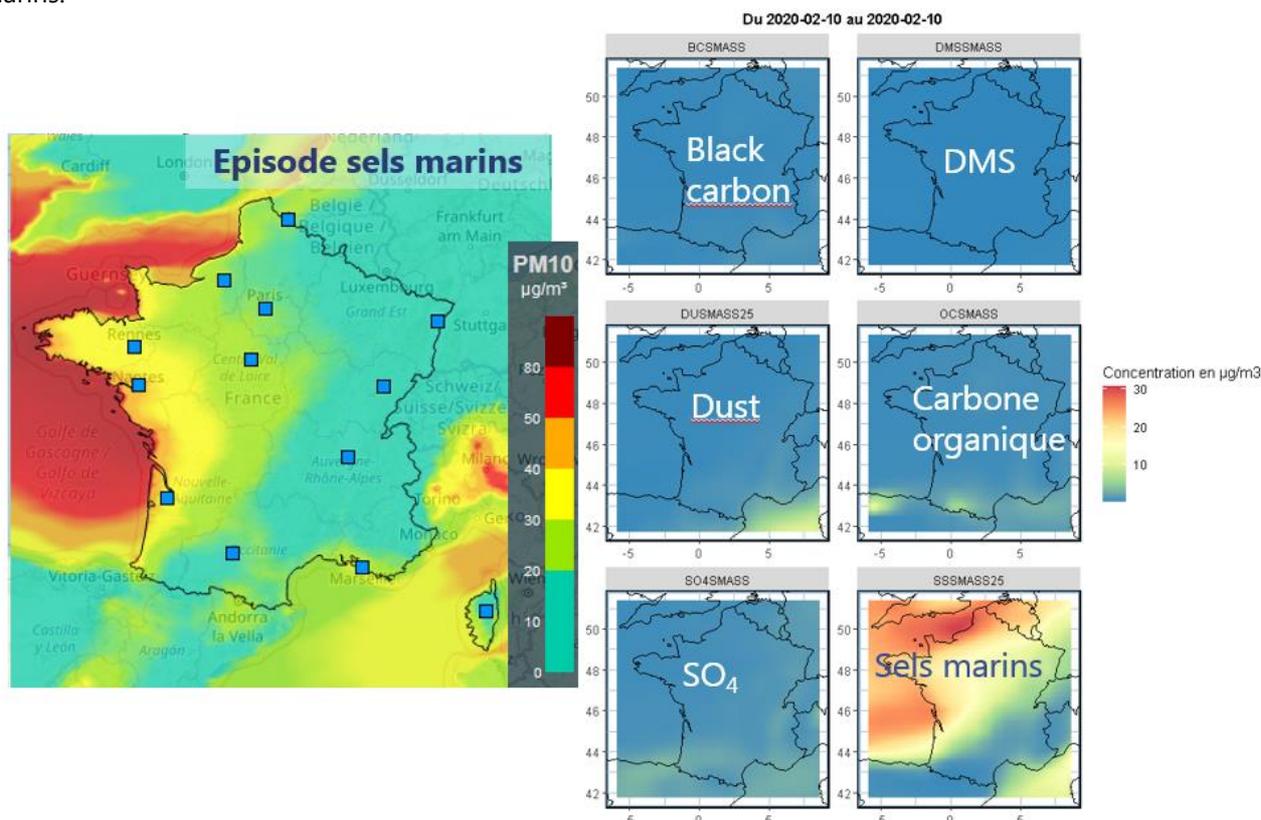


Figure 25 : Concentrations moyennes de PM10 estimées par PREVAIR (à gauche) et valeurs MERRA (à droite) au niveau du sol pour la journée du 10/02/2020

3.7.3. Exemple d'un épisode lié aux particules désertiques

Les 21 et 22 octobre 2020, des hausses des niveaux de particules ont touché le sud de la France au niveau des régions Occitanie et Nouvelle Aquitaine. Les données MERRA pour ces deux jours montrent qu'il s'agissait d'un phénomène combiné entre un nuage de poussières désertiques (Dust) et des sels marins sur la Méditerranée.

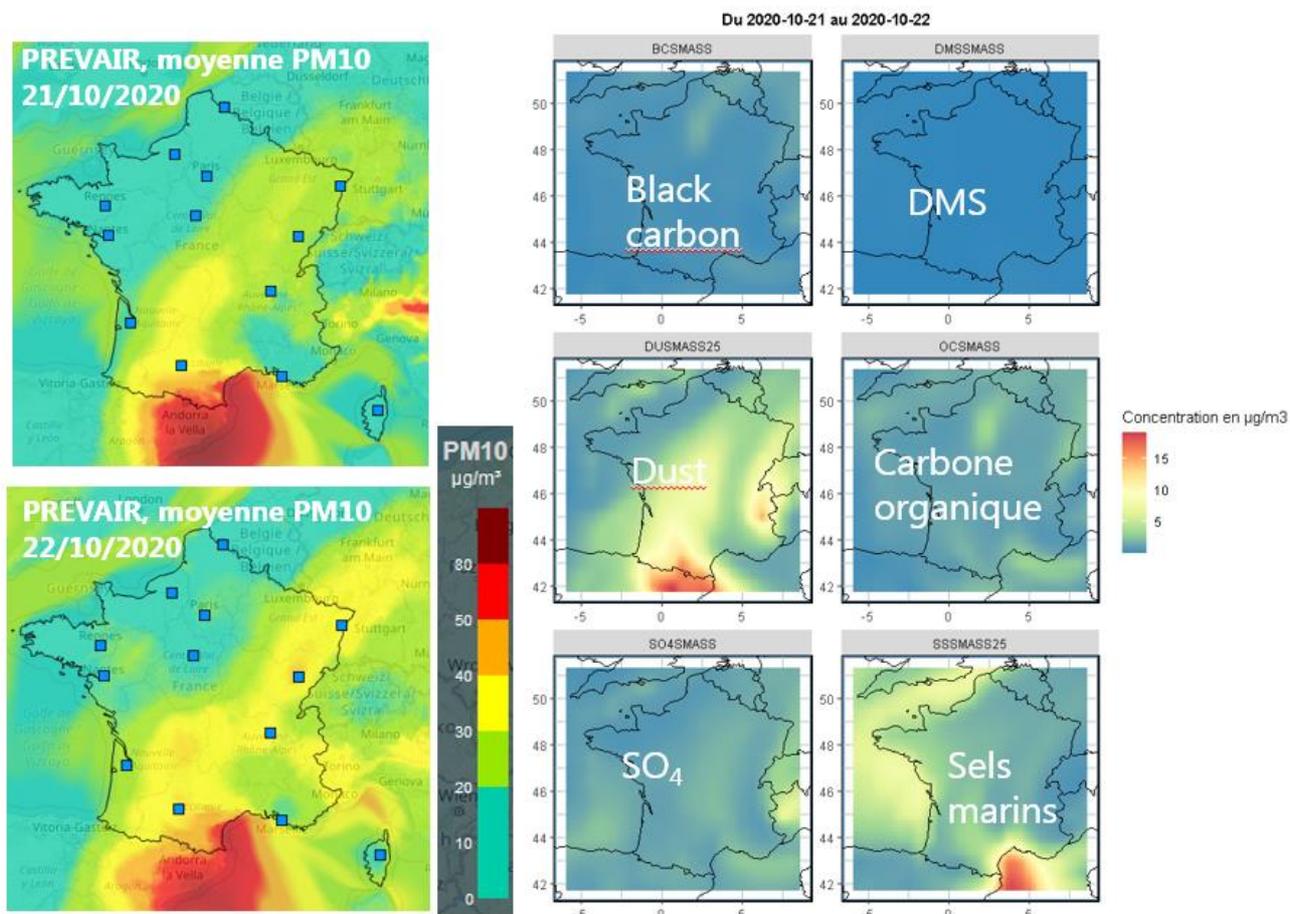


Figure 26 : Concentrations moyenne de PM10 estimée par PREVAIR (à gauche) et valeurs MERRA (à droite) au niveau du sol pour les journées des 21 et 22 octobre 2020

3.7.4. Evolution sur 30 ans des concentrations au sol de Black Carbon

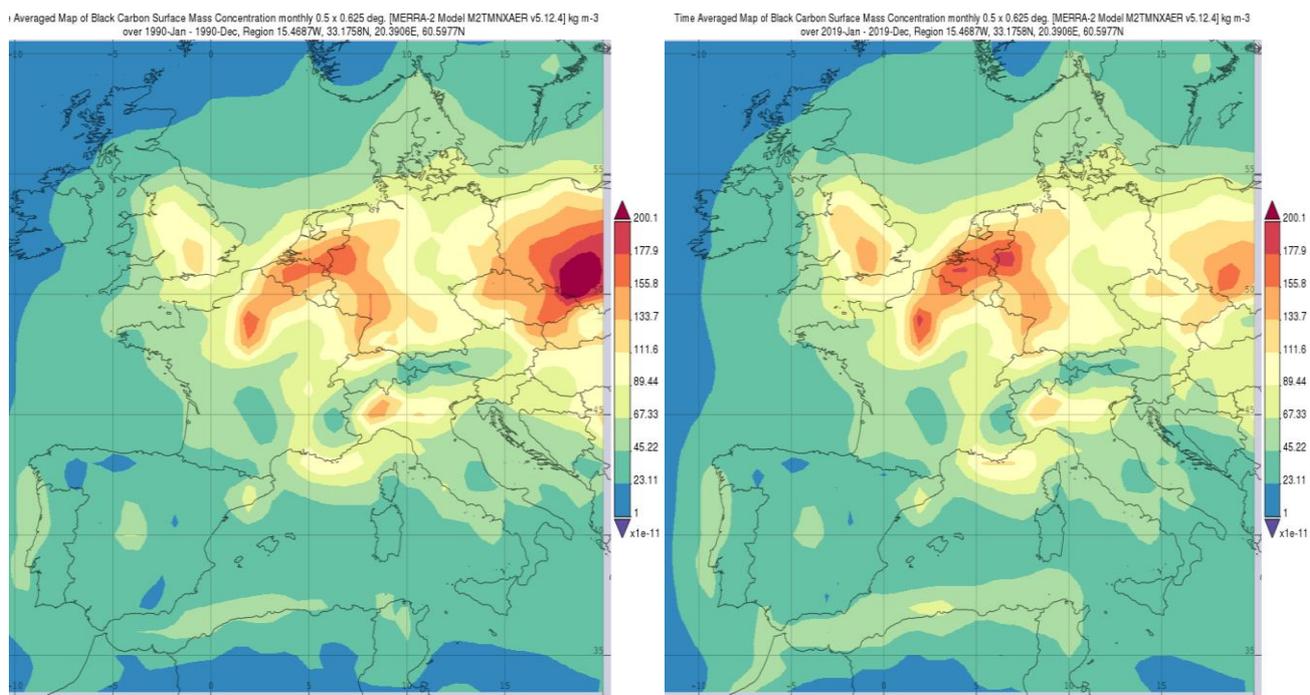


Figure 27 : Concentration au sol de Black Carbon sur l'Europe moyennes annuelles pour 1990 (à gauche) et 2019 (à droite). (source des données : MERRA2). (cartes produites avec GIOVANNI)

Les cartes de la Figure 27 montrent les concentrations moyennes annuelles de Black Carbon (carbone suie) sur la France en 1990 à gauche et 2019 à droite. On observe une baisse flagrante des concentrations sur l'est du domaine du domaine, au niveau de la Pologne. A l'inverse, sur la France, les concentrations sont en hausse, en particulier sur la région Parisienne.

La Figure 28 représente l'extraction à l'échelle mensuelle de la concentration au sol de Black Carbon au niveau de Bordeaux Métropole entre 1980 et 2020. Même si la tendance est moins marquée par rapport à la région Parisienne, les valeurs suivent une légère pente ascendante sur la période.

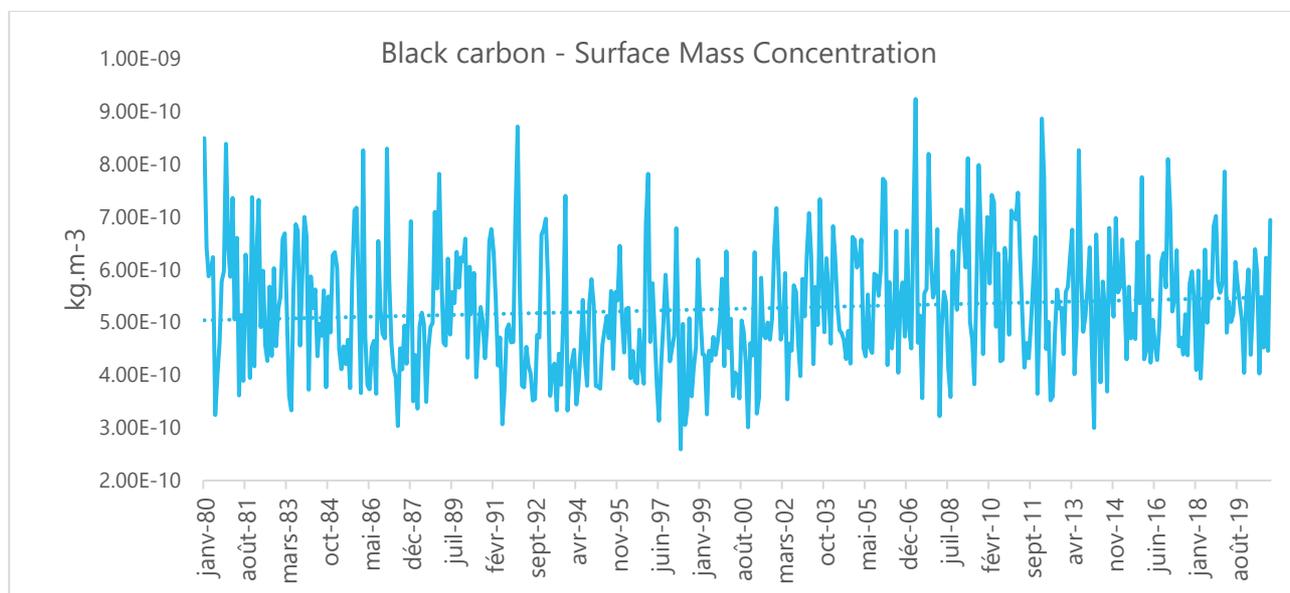


Figure 28 : évolution des concentrations mensuelles de Black Carbon depuis 1990 sur Bordeaux Métropole (MERRA-2)

3.7.5. Impact à l'échelle mondiale des incendies Californiennes de l'été 2020

Durant l'été 2020, de gigantesques incendies ont ravagés la côte ouest des États-Unis durant plusieurs mois. Etant donné l'ampleur des émissions sur la Californie, une partie du panache de particules a été transporté à travers et au-delà du continent Américain.

La carte suivante représente la situation pour tous les aérosols le 11 septembre 2020, alors que le nord de la France était touché par une hausse des concentrations de particules.

Ce type de phénomène illustre la complémentarité de la mesure par satellite, les modèles traditionnel en œuvre sur la France ou l'Europe n'étant pas en capacité de reproduire le panache de particules à cette échelle.

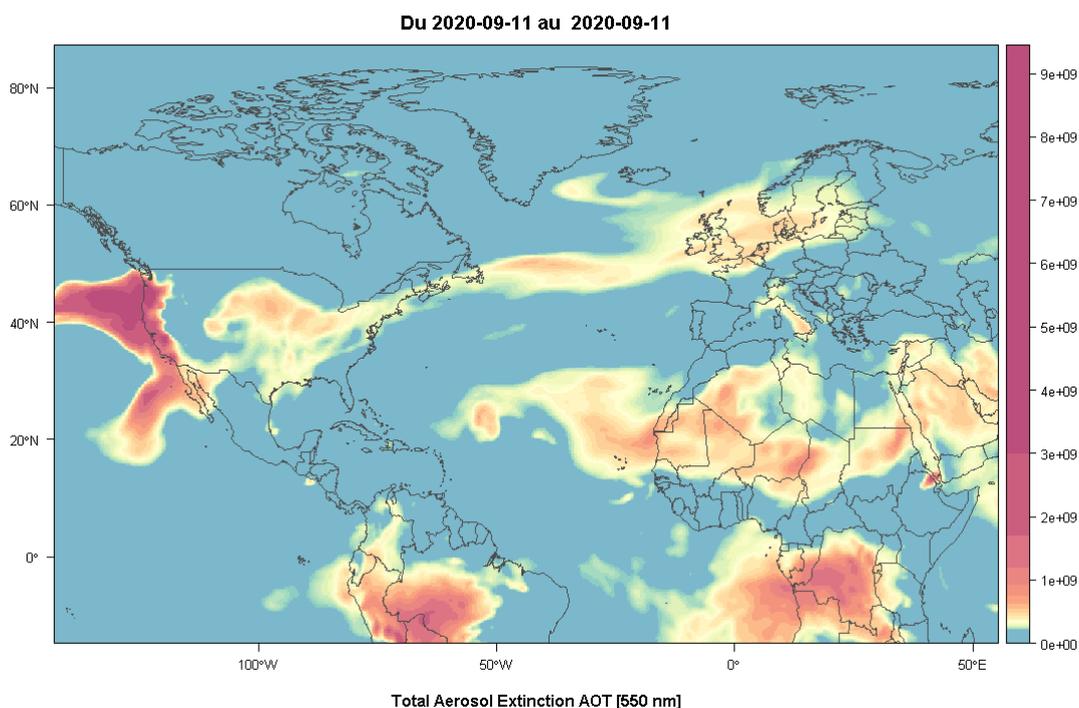


Figure 29 : Aérosols - AOT 550 le 11/09/2020 (source : MERRA2)

3.8. La modélisation inverse des émissions

Il est possible à partir des données de concentration mesurées d'estimer les émissions qu'il aurait fallu pour obtenir des valeurs simulées identiques. Ces méthodes ont été initialement développées pour les modélisations globales et des espèces peu réactives (CO_2 , CH_4 , CO) : la concentration étant alors linéairement liée à son émission (L. Menut et al., 2016).

Des travaux ont été menés sur l'ammoniac de IASI¹, permettant de revoir les émissions agricoles en Europe (Fortems-Cheiney et al., 2016).

Les 2 exemples suivants sont issus des évaluations de MERRA2.

MERRA intègre des données de divers systèmes satellites dans des modèles numériques pour produire des informations spatiales et temporelles de synthèse sur des variables climatiques difficilement directement observables.

Les données de MERRA couvrent la période allant de 1979 à aujourd'hui.

Le champ d'application de MERRA est très large (climat, ressource en eau, agriculture, ...) et comporte un volet qualité de l'air. Les informations issues de MERRA représentent quotidiennement des centaines de téraoctets. Les données de MERRA sont produites par le service NASA's Global Modeling and Assimilation Office (GMAO). Il s'agit aussi bien de données rétrospectives analysées que de données de prévision.

Les exemples portent sur les émissions anthropogéniques de SO_2 et de Black Carbon Anthropogénique (janvier à septembre 2020) et de Black Carbon issu de la combustion de biomasse (février à mars 2020).

¹ Interféromètre atmosphérique de sondage dans l'infrarouge (IASI sur le satellite MetOp), CNES, EUMETSAT

3.8.1. Emissions anthropogéniques de dioxyde de soufre (SO₂)

Sur le territoire national, les émissions les plus élevées en 2020 sont situées sur l'agglomération Parisienne, sur Clermont-Ferrand, au niveau de Marseille et à la frontière du Luxembourg. Les émissions sur le territoire de la Nouvelle Aquitaine sont plus faibles que sur les territoires cités précédemment. A noter que la faible résolution géographique des mesures satellites ne permet pas à l'heure actuelle de voir l'impact des zones industrielles qui peuvent potentiellement être émettrice de quantités plus élevées de SO₂.

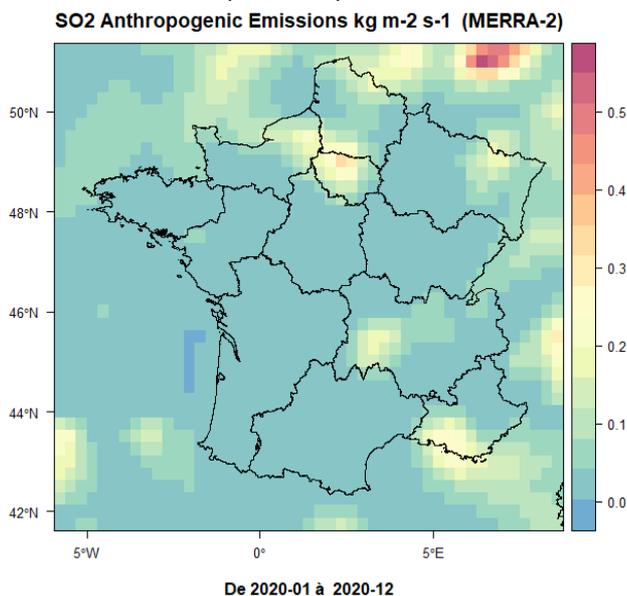
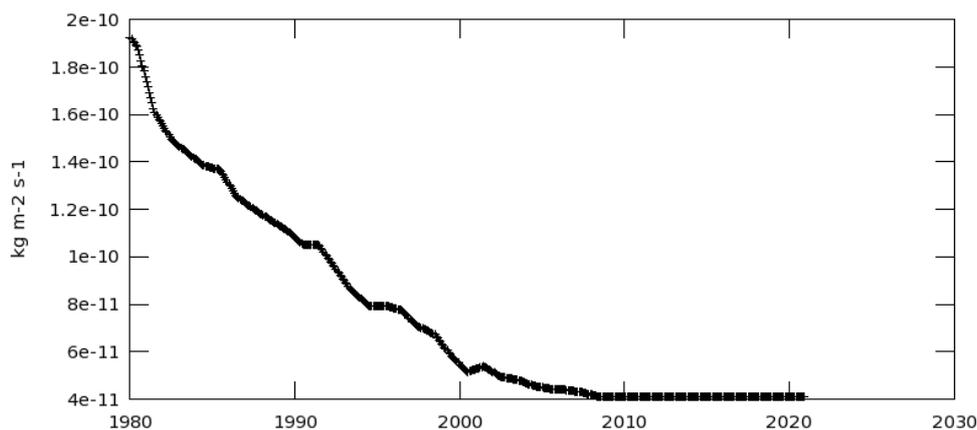


Figure 30 : MERRA-2 émissions anthropogéniques de SO₂ de janvier à décembre 2020

Le graphique ci-dessous représente l'évolution des émissions Anthropogéniques moyennées sur la métropole Bordelaise depuis les années 1980. La baisse des émissions est très importante durant les années 1980 – 2010, résultats observables également au niveau des mesures du réseau Atmo, où les valeurs en zone urbaine sont aujourd'hui proches des limites basses de mesures des appareils.

Time Series, Area-Averaged of SO2 Anthropogenic Emissions_ENSEMBLE_monthly 0.5 x 0.625 deg. [MERRA-2 Model M2TMNXADG v5.12.4] kg m-2 s-1 over 1980-01-01 00:30Z - 2021-01-01 00:29Z, Region 0.9448W, 44.5236N, 0.0879W, 45.3365N



- The user-selected region was defined by 0.9448W, 44.5236N, 0.0879W, 45.3365N. The data grid also limits the analyzable region to the this point: 0.625W, 45N. This analyzable region indicates the spatial limits of the subsetted granules that went into making this visualization result.

Figure 31 : MERRA -2 : évolution des émissions de SO₂ anthropogéniques depuis 1980 sur Bordeaux.

3.8.2. Emissions de Black carbone issues de la combustion de biomasse

La carte ci-dessous représente les émissions de l'année 2020 estimées par le système MERRA. La région Nouvelle Aquitaine, à travers les pratiques d'écobuage sur les Pyrénées Atlantiques, est une zone majeure d'émissions en France.

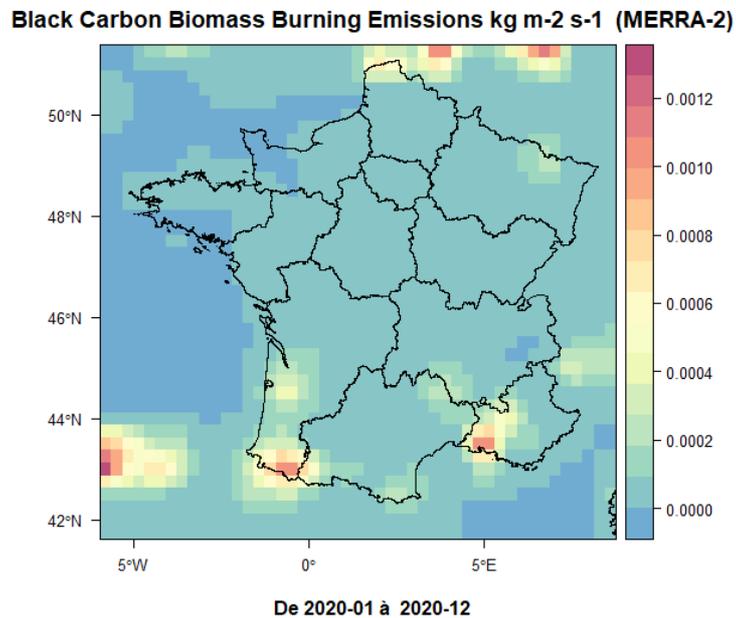


Figure 32 : MERRA-2 émissions de Black Carbon liées à la combustion de biomasse de janvier à décembre 2020

Selon les données MERRA, l'agglomération de Bordeaux, où la place du bois pour le chauffage des logements est particulièrement importante, est également une zone d'émission élevée du territoire métropolitain, plus élevée que la région parisienne.

4. Exploitation des données satellites dans le cadre de la surveillance régionale de la qualité de l'air

Production des bilans annuels à l'échelle régionale ou plus locale

Il existe aujourd'hui via les différents instruments de mesure des satellites gérés par la NASA et L'ESA un volume très important de données de qualité de l'air disponibles à diverses résolutions géographiques et temporelles. Un travail de synthèse, d'interprétation et de produit de bilan graphique et cartographique va permettre d'exploiter ces données et d'en tirer tous les enseignements sur le comportement des polluants sur la région, les déplacements de masse d'air et l'influence des conditions météorologiques.

Détection, études et suivi dans le temps des sources d'émissions régionales

Que ce soit à travers l'étude des cartographies de concentrations, ou via des données plus élaborées de modélisation des émissions, il est possible d'isoler certaines sources ou groupes de sources : zones industrielles pour les particules, activités agricoles pour le méthane ou l'ammoniac, axes routiers pour le NO₂, etc. Etant donné la résolution spatiale actuelle des données satellites, seules les sources majeures sont concernées, mais il devient possible de suivre leur impact dans le temps et leur contribution à la pollution locale.

Suivi non biaisé de l'évolution dans le temps des concentrations sur l'ensemble du territoire

Il existe un historique très important sur ce type de mesure, variable selon le programme ou l'instrument concerné (1980 pour MERRA, 2004 pour OMI ou 2018 pour TROPOMI). Il présente l'avantage d'être homogène sur la durée de vie de l'instrument et de permettre une évaluation objective sur le long terme, avec des comparaisons possibles entre territoires.

Aide à l'interprétation des épisodes d'alerte à postériori

La fréquence de mise à disposition de la donnée n'est actuellement pas suffisante pour permettre un suivi en temps réel des concentrations de polluants en cas d'épisodes d'alerte. Il est en revanche possible après quelques jours de traiter la donnée de mesure par satellite pour faire un bilan de l'origine et de l'ampleur de l'épisode, que ce soit pour l'Ozone ou pour les particules.

Etude de l'impact des phénomènes de grandes échelles.

La couverture mondiale des données satellites permet d'étudier des phénomènes d'ampleur internationale qui peuvent impacter la région, comme les panaches de particules provenant de l'est de l'Europe ou encore les épisodes de poussières sahariennes.

Etudes des événements particuliers

Les feux de végétation sont un bon exemple d'évènements importants de pollution atmosphérique d'origine naturelle et pour lesquels il est difficile de réaliser des mesures in-situ ou aéroportées : le satellite apporte alors une information précieuse.

Etude de la composition des particules pour la détermination des sources

A travers notamment le programme MERRA2 de la, une multitude de données sont disponibles sur la composition des particules, permettant en tous points du territoire du territoire néo aquitaine de quantifier la contribution des sources anthropiques et biogéniques et de connaître la nature des aérosols. L'historique pour ces données est supérieur à 30 ans.

Amélioration des inventaires d'émissions

Les cartes de concentrations ou des données élaborées de modélisation inverse des émissions peut permettre d'identifier des sources non ou mal prises en compte dans les inventaires, d'aider à la spatialisation des émetteurs, et à l'amélioration des profils temporels.

Au-delà de la mesure des polluants par satellites, il existe également des données de télédétection destinées à fournir des informations sur l'occupation des sols ou l'évolution d'un couvert végétal, données d'entrée nécessaires aux inventaires.

Amélioration des modèles régionaux

L'amélioration des modèles régionaux est à mettre en lien avec l'amélioration des données de l'inventaire et des profils temporels, mais aussi avec la possibilité des traitements statistiques spatiales et temporels avec de l'assimilation de données.

5. Conclusions

Les données satellites sont une information aujourd'hui disponible et complémentaire des moyens de surveillance à disposition des AASQA. La donnée de mesure de la qualité de l'air par satellite est de plus en plus utilisée, par exemple par des épidémiologistes qui y voient une donnée multi-polluants, homogène temporellement et spatialement, parfois disponible sur un historique de plusieurs dizaines d'années.

La donnée brute des mesures par satellite concerne une colonne d'air et non une concentration au sol, elle est exprimée en absorption, nombre de molécules par cm² ou en moles par mole d'air. Il ne s'agit donc pas d'une grandeur directement comparable aux données de mesures telles que celles prises en compte dans la réglementation actuelle.

Mais cette donnée peut servir de base à des modèles qui vont produire une donnée élaborée, potentiellement exprimée en µg/m³ au niveau sol.

La résolution géographique des données brutes est aujourd'hui, au mieux avec Sentinel5p, d'environ 5 km, mais est souvent supérieure à 10 km, ce qui, pour des polluants à impact local comme le NO₂, limite le type d'exploitation. Là encore le croisement et l'utilisation de plusieurs mesures sur plusieurs satellites et d'algorithmes spécifiques permettent de produire une donnée à la résolution géographique beaucoup plus fine (kilométrique pour MAIAC, 25 m pour le satellite privé GHGSat).

Que les données soient brutes, élaborées, produites par la NASA ou par l'ESA, il apparaît le besoin pour les utiliser dans le cadre de la surveillance de mieux maîtriser et comprendre les conditions de leur production, les modèles utilisés et hypothèses associées, ainsi que les limites de leur exploitation.

Des limites paraissent aujourd'hui évidentes comme la difficulté de réaliser des mesures à travers la couche nuageuse, sur des surfaces enneigées, ou le fait qu'à l'heure actuelle, la donnée ne soit produite qu'à partir d'un ou deux passages par jour du satellite. Cette dernière limite sera en partie levée lors de la mise en orbite géostationnaire au-dessus de l'Europe de la mission Sentinel4, prévue en 2023.

Table des figures

Figure 1 : Les transports de polluants dans les différentes couches de l'atmosphère (Source : https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/climatologie-climat-couche-ozone-746/page/6/)	6
Figure 2 : les différentes couches de l'atmosphère (https://meteo45.com)	7
Figure 3 : Profils verticaux des principaux constituants et gaz traces de l'atmosphère [DE CLERCQ, IASB]	8
Figure 4 : profils verticaux de poussières du Sahara vue par le satellite Calipso - © NASA	10
Figure 5 : moyenne annuelle 2019 de la colonne troposphérique NO ₂ – Sentinel5p.....	13
Figure 6 : concentrations mensuelles de la colonne troposphérique NO ₂ -2019- Sentinel 5p.....	14
Figure 7 : NO ₂ - colonne troposphérique en mole.cm ⁻² . Données Sentinel5p sur la période du 17 mars au 14 avril 2019 à gauche et 2020 à droite.	15
Figure 8 : évolution en % des concentrations NO ₂ mesurées sur la région Nouvelle-Aquitaine entre les périodes du 17 mars au 14 avril 2019 et du 17 mars au 14 avril 2020.	15
Figure 9 : Concentrations moyennes annuelles sur la colonne troposphérique- NO ₂ 2005 et 2019, OMI-AURA, NASA. (cartes produites avec GIOVANNI).....	16
Figure 10 : Evolution en % des concentrations de NO ₂ en région Nouvelle-Aquitaine entre 2005 et 2019 (OMI-AURA).....	17
Figure 11 : évolution des concentrations mensuelles de la colonne troposphérique sur Bordeaux mesurées par AURA/OMI.....	17
Figure 12 : Concentrations moyennes mensuelles d'ammoniac mesurées par IASI en 2019 sur la région Nouvelle-Aquitaine.....	18
Figure 13 : concentrations moyenne mensuelle d'ammoniac en avril 2020 (données IASI).....	19
Figure 14 Profil vertical d'ozone au-dessus de Bordeaux (moyenne des mois de juillet et novembre 2020) (Données : daytime-ascending, AIRS/TERRA)	20
Figure 15 ozone à 3km (mole.mole ⁻¹) pour la journée du 23 juin 2020. IASI + GOME2	21
Figure 16 : Méthane - Mixing – ratio -TROPOMI/Sentinel 5p – moyenne 2019 sur le territoire français. Le trait gris délimite les départements de la région Nouvelle-Aquitaine	21
Figure 17 : Méthane - Mixing – ratio -TROPOMI/Sentinel 5p – moyenne 2019 sur la région Nouvelle Aquitaine et occupation du sol sur la Région Nouvelle-aquitaine (source CLC 2012).....	22
Figure 18 : évolution des concentrations mensuelles de méthane au niveau de La Rochelle depuis 2002 altitude 1000 hPa– source AIRS, NASA.....	22
Figure 19 : AIRS - Evolution des concentrations troposphériques mensuelles de CO ₂ sur 3 agglomérations de 2010 à 2017	23
Figure 20: moyenne mensuelle 2020 des échanges nets de CO ₂ par les écosystèmes	24
Figure 21 : Moyenne mensuelle de monoxyde de carbone (Daytime/Ascending, AIRS-only) à 925 hPa [AIRS AIRS3STM v006 de janvier 2003 à décembre 2020 sur l'aire : 1.9995W, 42.9112N, 0.813W, 44.0538.....	25
Figure 22 : Valeur moyenne pour l'AOD 055 du 01/03/2019 au 31/05/2019.....	26
Figure 24 : Valeur moyenne pour l'AOD 055 du 01/03/2019 au 31/05/2019 - Zoom sur la zone Lacq (entre Orthez et Pau) et Biarritz	26
Figure 25 : MERRA2 (NASA), OC au sol des 15 et 16/02/2019.....	27
Figure 25 : Concentrations moyenne de PM10 estimée par PREVAIR (à gauche) et valeurs MERRA (à droite) au niveau du sol pour la journée du 10/02/2020	28
Figure 26 : Concentrations moyenne de PM10 estimée par PREVAIR (à gauche) et valeurs MERRA (à droite) au niveau du sol pour les journées des 21 et 22 octobre 2020	29
Figure 27 : Concentration au sol de Black Carbon sur l'Europe moyennes annuelles pour 1990 (à gauche) et 2019 (à droite). (source des données : MERRA2). (cartes produites avec GIOVANNI)	29
Figure 28 : évolution des concentrations mensuelles de Black Carbon depuis 1990 sur Bordeaux Métropole (MERRA-2).....	30
Figure 29 : Aérosols - AOT 550 le 11/09/2020 (source : MERRA2).....	31
Figure 30 : MERRA-2 émissions anthropogéniques de SO ₂ de janvier à décembre 2020	32

Figure 31 : MERRA -2 : évolution des émissions de SO2 anthropogéniques depuis 1980 sur Bordeaux.....	32
Figure 32 : MERRA-2 émissions de Black Carbon liées à la combustion de biomasse de janvier à décembre 2020	33

BIBLIOGRAPHIE

[L.Menut, 2016] Apport de l'observation satellite à l'analyse et à la prévision de la qualité de l'air L.Menut (1), J.L Attié (2,7), M.Beekmann (3), B.Bessagnet (4), C.Clerbaux (5), J.Cuesta (3), G.Dufour (3), G.Forêt (3), L.El Amraoui (2), M.Mallet (2), F.Meleux (4), P.Ricaud (2), D.Tanré (6), S.Turquety (1). (1) Laboratoire de Météorologie Dynamique, Ecole Polytechnique, Univ. P.M.Curie, CNRS, Palaiseau (2) CNRM, Météo-France et CNRS, UMR 3589, Toulouse (3) Laboratoire Inter-Universitaire des Systèmes Atmosphériques, Université Paris Est Créteil et Université Paris Diderot, Créteil. (4) INERIS, Verneuil-en-Halatte. (5) Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales, Univ. P.M.Curie, CNRS, Paris. (6) Laboratoire d'Optique Atmosphérique, Université Lille 1-CNRS, Villeneuve-d'Ascq. (7) Université de Toulouse, Laboratoire d'Aérodynamique, CNRS UMR 5560, Toulouse, France

[J.P.Veefkind,2011] 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, J.P.Veefkind et. Al., <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.027>.

[JACQUETTE , 2014] Elsa JACQUETTE, Elisa BALDIT et l'équipe projet IASI CNES « Le sondeur infrarouge IASI », Photoniques 73, 2014 , <https://www.photoniques.com/articles/photon/pdf/2014/05/photon201473p26.pdf>

[DE CLERCQ, IASB] Implémentation du système global pour la mesure de la composition atmosphérique : concepts et méthodes pour une analyse intégrée des données satellitaires, Coralie DE CLERCQ, 2008-2009, INSTITUT D'AERONOMIE SPATIALE DE Belgique (<http://bictel.ulg.ac.be/ETD-db/collection/available/ULgetd-06112009-111926/unrestricted/>)

[Acker, 2007] J. G. Acker and G. Leptoukh, "Online Analysis Enhances Use of NASA Earth Science Data", Eos, Trans. AGU, Vol. 88, No. 2 (9 January 2007), pages 14 and 17.

[Peiro,2018] Assimilation des observations satellitaires de l'interféromètre atmosphérique de sondage infrarouge (IASI) dans un modèle de chimie-transport pour des réanalyses d'ozone à l'échelle globale, Hélène Peiro, Université Paul Sabatier – Toulouse III, 2018..

A part of the analyses and visualizations used in this study was produced with the Giovanni online data system, developed and maintained by the NASA GES DISC.



RETROUVEZ TOUTES
NOS **PUBLICATIONS** SUR :
www.atmo-nouvelleaquitaine.org

Contacts

contact@atmo-na.org
Tél. : 09 84 200 100

Pôle Bordeaux (siège Social) - ZA Chemin Long
13 allée James Watt - 33 692 Mérignac Cedex

Pôle La Rochelle (adresse postale-facturation)
ZI Périgny/La Rochelle - 12 rue Augustin Fresnel
17 180 Périgny

Pôle Limoges
Parc Ester Technopole - 35 rue Soyouz
87 068 Limoges Cedex

