

La télédétection spatiale

**Les données satellitaires comme outil complémentaire
de surveillance au sol de la qualité de l'air**

2021



Diffusion : Décembre 2021

Siège social :
3 allée des Sorbiers 69500 BRON
Tel. 09 72 26 48 90
contact@atmo-aura.fr



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 (2021) **La télédétection spatiale : Les données satellitaires comme outil complémentaire de surveillance au sol de la qualité de l'air.**

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



Financement

Cette étude d'amélioration de connaissances a été rendue possible grâce à l'aide financière particulière des membres suivants :

Région 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

Le déploiement de satellites en orbite propose une vision différente, détaillée et quasi-complète des phénomènes planétaires liés au changement climatique et à la pollution atmosphérique. Le français Thomas PESQUET déclarait récemment « c'est grâce aux satellites comme ceux du programme européen Copernicus que l'on a une vision du changement climatique ». L'accès aux données des satellites du programme Copernicus est libre et gratuite permettant une large diffusion des informations aux citoyens, scientifiques et décideurs politiques dans leurs efforts pour appréhender les enjeux de qualité de l'air et ceux liés au changement climatique.

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes investigue ces nouvelles possibilités, complémentaires aux données mesurées ou modélisées au niveau du sol, pour comprendre comment ces données récoltées à très hautes altitudes peuvent nous aider à améliorer la prévision et l'analyse de la qualité de l'air de notre région.

En partenariat avec la Région, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes a réalisé une étude sur l'évaluation du potentiel d'exploitation opérationnelle de données satellitaires avec pour objectif de voir comment ces données pouvaient venir enrichir l'observatoire régional. Le dioxyde d'azote (NO_2) a été choisi comme cas d'étude. Atmo Auvergne-Rhône-Alpes a été en capacité de réaliser un script de récupération automatique des données et un typage de celles-ci dans un format exploitable par l'observatoire, ayant débouché sur une cartographie régionale du NO_2 . Une analyse critique des données recueillies a permis de mettre en évidence les avantages et les inconvénients liés à l'utilisation de données satellitaires.



Sommaire

1. Introduction.....	7
2. Contexte et objectif	8
3. La télédétection spatiale pour l'observation de l'atmosphère	9
3.1. Les satellites en orbites	9
3.2. Le programme Copernicus.....	10
3.3. Avantages et limites	11
4. Etude de cas: cartographie régionale du dioxyde d'azote sur la base d'une exploitation des données du satellite Sentinel 5P	13
4.1. Le dioxyde d'azote.....	13
4.2. Le satellite Sentinel 5P	14
4.3. Objectif de l'étude	15
4.4. Cartographie satellitaire du dioxyde d'azote à l'échelle régionale	15
4.4.1. Les produits de données du satellite Sentinel 5P.....	15
4.4.2. Analyse critique des données.....	17
4.4.3. Cartographie régionale satellitaire du dioxyde d'azote.....	19
5. Intérêts des données satellitaires pour la région Auvergne-Rhône-Alpes.....	24
5.1. Les acteurs au service des régions	24
5.1.1. Les acteurs privés	24
5.1.2. Les acteurs institutionnels.....	25
5.2. Positionnement.....	26
5.3. Les thématiques d'investigations.....	26
5.3.1. Cadastre d'émission de l'ammoniac.....	27
5.3.2. Cadastre d'émission du méthane.....	27
5.3.3. Modélisation de la qualité de l'air.....	29
5.3.4. Modélisation pollinique	29
5.3.5. Couplage données satellitaires et intelligence artificielle pour produire des cartes de qualité de l'air.....	30
6. Conclusion.....	30
7. Perspectives	30
Bibliographie	32



Illustrations

Figure 1 : Passage orbital imagé du satellite Sentinelle 5P (ESA)	15
Figure 2 : Visualisation du produit NO₂ troposphérique à un niveau de traitement L2.....	16
Figure 3 : Visualisation du produit NO₂ troposphérique à un niveau de traitement L3.....	16
Figure 4 : Visualisation de données traitées dans QGIS sur la région Auvergne-Rhône-Alpes (molécules.cm⁻²)	17
Figure 5 : Concentrations moyennes mensuelles (2019) du dioxyde d'azote en région Auvergne-Rhône-Alpes) issue des données du satellite Sentinelle 5P.....	20
Figure 6 : Concentrations moyennes mensuelles (2019) du dioxyde d'azote issue des données du satellite Sentinelle 5P obtenues dans la littérature [21] en comparaison avec celles obtenues dans la présente étude Atmo Auvergne-Rhône-Alpes (encadrés) : a) Mai 2019 ; b) Juin 2019	20
Figure 7 : Concentration moyenne annuelle (2019) du dioxyde d'azote en région Auvergne-Rhône-Alpes, issue des données du satellite Sentinelle 5P.....	22
Figure 8 : Concentration moyenne annuelle (2019) du dioxyde d'azote en région Auvergne-Rhône-Alpes : a) issue des données du satellite Sentinelle 5P ; b) issue des données au sol d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes. Cercles rouges : zones urbaine, trafic et périurbaines ; cercles bleus : zones rurales	23
Figure 9 : Cartographie a) mondiale, b) nationale, c) régionale, des concentrations de méthane dans l'atmosphère mesurée par le satellite Iris de la société GHGSat [29]	29

1. Introduction

L'Homme modifie la Planète Terre, les grands cycles naturels sont menacés, le changement climatique s'accélère. La question de la responsabilité de l'Homme reste encore ouverte mais une chose est sûre, il en est victime. Ces dernières années, la pollution atmosphérique est devenue une préoccupation mondiale majeure. Selon l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé), près de 90% de la population mondiale respire un air pollué et près de 7 millions de personnes en meurent chaque année dans le monde [1], dont 400 000 décès prématurés dans l'espace économique européen EEA-39 [2]. La pollution de l'air est ainsi considérée comme étant le quatrième facteur de risque pour la santé humaine dans le monde. L'Assemblée Générale des Nations Unies reconnaît, à travers ses 17 objectifs de développement durable, l'impact de la qualité de l'air sur la santé humaine (objectif n°7) [2]. Depuis près de cinquante ans, les Etats, les scientifiques et divers organismes se mobilisent pour observer et comprendre ces changements, et trouver ainsi les moyens d'actions. Les technologies mises en œuvre n'ont cessé d'évoluer, révolutionnant nos connaissances de la planète Terre et soulevant les défis politiques, sanitaires, sociétaux et économique les plus graves auxquels l'Humanité n'ait jamais eu à faire face.

Des mesures de polluants atmosphériques réalisées en divers endroits du globe permettent aujourd'hui d'avoir une vision des sources et puits de pollution de l'air ainsi que des activités anthropiques. Selon certaines organisations internationales, le constat est alarmant avec un coût de l'inaction plus élevé que celui nécessaire pour atténuer ce changement climatique. Des actions sont prises en faveur d'une diminution de la pollution atmosphérique mondiale et les mesures de polluants atmosphériques à l'échelle planétaire restent encore le seul moyen de vérifier l'efficacité de ces actions. La surveillance atmosphérique reste toutefois disparate selon le type de polluant atmosphérique en termes de couverture spatiale et temporelle, ainsi qu'en termes de financements de programmes de mesures. Des progrès technologiques permettent cependant d'améliorer toujours plus cette surveillance atmosphérique.

Depuis quelques années déjà, le déploiement de satellites en orbite propose une vision différente, détaillée et quasi-complète des phénomènes planétaires liés au changement climatique et à la pollution atmosphérique. Sur la scène internationale, un Observatoire Spatial du Climat (SCO) a été mis en place avec pour objectif l'étude du climat en recoupant des données issues des satellites avec celles issues du sol ainsi qu'à des données modélisées [2]. En 2020 et pour les dix prochaines années, l'Europe a voté un budget conséquent, le plus important depuis la création de l'Agence Spatiale Européenne (ESA), pour l'ensemble du secteur spatial européen: près de 14 milliards d'euros, rien que pour la période 2020-2024. L'ESA tente ainsi de combler l'espace pris principalement par la NASA: près de 21 milliards de dollars rien que pour l'année 2020.

A l'échelle nationale, l'Etat français s'est emparé du sujet en mettant en place en 2011 un premier Plan d'Applications Satellitaires visant quatre objectifs dont l'observation globale de la Terre. Ce Plan vise à développer les actions au service des utilisateurs, faciliter l'accès aux images satellitaires, organiser le partage d'expérience et encourager l'innovation [3]. En 2018, un second Plan d'Applications Satellitaires, mobilisant une trentaine d'organismes publics du RST (Réseau Scientifique Technique [4]) et porté par le Ministère de la Transition Écologique et Solidaire et le Ministère de la Cohésion des Territoires et des Relations avec les Collectivités Territoriales, comprend 7 actions thématiques majeures dont : anticiper le niveau de pollution atmosphérique et surveiller les changements climatiques [3].

Avec les progrès technologiques de ces dernières années, la télédétection spatiale apparaît comme un outil incontournable pour répondre aux enjeux climatiques actuels.

2. Contexte et objectif

Depuis 2020, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes s'intéresse à l'exploitation de données satellitaires, essentielles dans le suivi du cycle de vie des espèces atmosphériques aux différentes échelles géographiques. A cet effet, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes a pris divers contacts régionaux et nationaux dans l'objectif de se doter d'une capacité de récolte de données satellitaires environnementales, complémentaires aux données mesurées ou modélisées au niveau du sol. Dans le cadre de ses missions réglementaires de surveillance et d'information de la population sur l'air et le climat, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes dispose de stations de mesures au sol permettant de suivre les concentrations de certains polluants réglementés et non réglementés. Plusieurs techniques complémentaires permettent d'évaluer les concentrations en polluants dans l'atmosphère : les mesures au sol et aéroportées, qui permettent des mesures locales et précises ; les modélisations, idéales pour prévoir et caractériser les phénomènes de transport ; et les mesures satellitaires, qui assurent une mesure globale et répétitive à des échelles spatio-temporelles variables. Une surveillance régulière, ciblée et fine de l'atmosphère à l'aide de données satellitaires permettrait d'apporter des éléments de compréhensions et d'actions pour améliorer la qualité de l'air. L'évolution récente des technologies satellitaires permet d'apporter une somme importante d'informations sur l'observation de l'atmosphère que beaucoup d'acteurs à travers le monde exploitent aujourd'hui. Avec le soutien de la Région, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes s'est emparé de la thématique liée aux données satellitaires en permettant l'acquisition de données nouvelles à l'échelle régionale et proposer un dispositif de surveillance et d'actions d'améliorations de la qualité de l'air enrichit de ces données.

Dans ce contexte, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes a obtenu en 2020 un financement de la Région lui permettant d'engager un projet sur l'année 2021 en lien avec la télédétection satellitaire. Plus précisément, ce projet ambitionnait deux objectifs :

- réaliser un état des lieux sur le potentiel d'utilisation des données satellitaires sur une base bibliographique ;
- réaliser une étude de cas: exploitation opérationnelle des données satellitaires issues du satellite Sentinel-5P pour la production de cartographies du dioxyde d'azote à l'échelle régionale sur l'année 2019.

Dans ce rapport, une première partie propose un tour d'horizon de la télédétection spatiale pour la surveillance de l'atmosphère. Une deuxième partie apporte un éclairage sur le potentiel d'utilisation des données satellitaires, et de savoir notamment si les satellites peuvent être utilisés comme technologies complémentaires et opérationnelles de surveillance atmosphérique. Pour se faire, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes s'est consacrée à la production de cartographies d'un polluant atmosphérique cible, le dioxyde d'azote (NO_2), à l'échelle régionale sur la base d'une collecte opérationnelle de données satellitaires issues du satellite Sentinel-5P. Enfin, une troisième partie explicite l'intérêt, pour la Région Auvergne-Rhône-Alpes, à exploiter les données satellitaires. Des pistes de réflexions envisagées par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes sont proposées.

3. La télédétection spatiale pour l'observation de l'atmosphère

L'accès amélioré à une série croissante de données satellitaires conduit à des applications variées, notamment dans les branches de la science sur le climat et l'environnement. Un très grand nombre de satellites sont actuellement en fonctionnement dont une grande partie dispose d'instruments de mesures permettant l'observation et la surveillance de la planète. Les progrès technologiques permettent aujourd'hui de disposer de données précises à l'échelle régionale, voire à l'échelle des villes. Différentes structures utilisent depuis longtemps les données satellitaires telles que la NASA et l'ESA. Les technologies embarquées sont de plus en plus robustes, fiables et précises, ce qui permet aujourd'hui aux scientifiques de disposer d'un outil supplémentaire et complémentaire pour la surveillance de la qualité de l'air en fournissant des données intégrées en temps réels des concentrations d'un grand nombre de polluants atmosphériques.

3.1. Les satellites en orbites

Les satellites sont un formidable outil offrant des possibilités considérables et ouvrant des perspectives intéressantes dans divers domaines tels que la gestion des ressources, les océans, le changement climatique, la qualité de l'air, les risques naturels, Etc. Ils peuvent par exemple fournir des données de mesures dans des lieux du Globe dépourvus de capteurs, fournir de précieuses informations sur la qualité de l'air pour réaliser des prévisions à l'échelle planétaire, Etc.

Le nombre de satellites orbitant autour de la Terre varie d'une source d'information à l'autre. Depuis le premier satellite lancé par l'Union soviétique en 1957, un peu plus de 8 000 satellites ont été lancés dont 4 000 à 5 000 sont encore en orbite autour de la Terre en 2020. Environ 2 500 satellites étaient encore opérationnels en 2020 dont un peu moins de 40% dédiés à la surveillance de la Terre [5]. Dans les dix prochaines années, le nombre de satellites en orbites autour de la Terre va considérablement augmenter ; le lancement de près de 12 000 satellites, principalement des cubesats, est ainsi prévu par la société SpaceX.

Aujourd'hui, près de cinquante paramètres sont jugés utiles pour l'observation du climat dont la moitié n'est rendue accessible que par le biais des satellites. Le premier satellite européen dédié à l'observation de la Terre a été lancé en 1991 (en 1972 par les Etats-Unis) ; il permettait de collecter des informations sur les océans. Quatre ans plus tard, un second satellite était lancé avec pour mission de mesurer l'ozone. Dix ans plus tard, le satellite Envisat venait pour la première fois apporter des éléments d'informations sur les interactions entre les océans, le sol et l'atmosphère. Peu de temps après, le programme Copernicus était né avec pour objectif l'observation de la Terre, permise par le lancement d'une série de satellites *Sentinelle* et le déploiement de moyens de mesures aéroportés et de bouées autonomes [6]. Les scientifiques ont très vite saisi le potentiel d'exploitation des données satellitaires et le couplage avec les données au sol et celles modélisées.

Les différents instruments à bord des satellites permettent de réaliser des mesures d'espèces gazeuses et d'aérosols en utilisant des techniques diverses et complémentaires. La télédétection atmosphérique étudie l'atmosphère grâce aux diverses interactions pouvant avoir lieu entre un rayonnement et les espèces chimiques présentes dans l'atmosphère. L'information sur la composition chimique de l'atmosphère y est obtenue de manière indirecte; la détermination des concentrations des diverses espèces chimiques présentes dans l'atmosphère et leurs distributions est alors obtenue via une modélisation du transfert radiatif et sur la base d'algorithmes d'inversion

de données. La télédétection peut être active ou passive et concerne un large spectre allant des UV aux ondes radio.

L'observation de la Terre par les satellites peut se faire selon une visée au limbe (observation de l'atmosphère selon une incidence rasante) ou une visée au nadir (observation de l'atmosphère selon la verticale). D'un point de vue géométrique, la visée au limbe présente une traversée dans l'atmosphère plus importante que la visée au nadir. La courbure de la Terre doit être pris en considération dans le cas d'une observation au limbe si bien que l'atmosphère ne peut être considérée comme une superposition de couches planes et parallèles. Une visée au limbe permet par ailleurs une meilleure résolution verticale et une meilleure sensibilité à la détection et à la mesure d'espèces à l'état de trace que ne le permet la visée au nadir. Un certain nombre de satellites sont situés en orbite basse, qui correspond souvent à une orbite polaire héliosynchrone dans le cadre d'une observation de la Terre, ce qui leur permet de passer toujours à la même heure solaire locale au-dessus d'un lieu donné. Ceci est très utile pour comparer les mesures au-dessus d'un même lieu entre elles car on s'affranchit des effets lumineux liés aux différentes positions du soleil. Ce type d'orbite ne permet cependant pas d'avoir un temps de revisite du satellite compatible avec la mesure d'espèces chimiques liées à la qualité de l'air. D'autres satellites sont situés en orbite géostationnaire si bien que le suivi des espèces chimiques peut se faire en temps réel avec un temps d'intégration plus long que ne le permet l'orbite basse.

La combinaison des données de plusieurs satellites permet de fournir des informations plus fiables et plus précises sur les évolutions de la composition de l'atmosphère et du climat.

3.2. Le programme Copernicus

Bien souvent, des modélisations sont réalisées sur la base de mesures réalisées au sol, combinées à des mesures aéroportées et des modèles de dispersions atmosphériques. Les inventaires des sources de pollution ou encore les données météorologiques sont autant de données complémentaires qui permettent d'obtenir des cartes de pollution utiles aux décideurs politiques dans les choix d'orientations stratégiques de leurs politiques et les voix d'améliorations à envisager. Ce socle important de bases scientifiques et technologiques ne suffit pourtant pas toujours ; des inégalités persistent en effet selon les régions, ce qui conduit notamment à des incertitudes sur les résultats. Dans une tentative de répondre à ce constat, des initiatives ont vu le jour à l'échelle planétaire telles que le GEOSS (Global Earth Observation System of Systems) [6], une interface utilisateur basée sur des cartes en ligne qui permet aux utilisateurs de découvrir et d'accéder aux données et aux ressources d'observation de la Terre de différents fournisseurs du monde entier et le programme GMES [7], une déclinaison européenne du programme GEOSS, qui deviendra en juillet 2013 le programme européen Copernicus [8].

Avec un peu moins de 50 satellites appartenant à l'Union Européenne et opérationnels en 2019, le programme spatial, notamment par le biais de sa composante d'observation de la Terre (Copernicus), et de son système de navigation par satellite (Galileo), offre des informations et des données gratuites et ouvertes qui peuvent aider à surveiller l'état de la planète [8]. Financé sur fonds publics, le programme européen Copernicus propose de nombreux services regroupés en six familles : la surveillance de l'atmosphère, la surveillance du milieu marin, la surveillance des terres, le changement climatique, la gestion des urgences, et les services liés à la sécurité. Il répond à de nombreuses questions et enjeux sanitaires, sociétaux et économiques les plus graves auxquels l'Humanité n'aït jamais eu à faire face. Il propose avant tout une information sur l'état de santé de la planète comme aide à la décision. Il est alimenté par une famille de satellites européens, les Sentinelles [6], ainsi que par d'autres infrastructures spatiales telles que EUMETSAT [7] qui fournit des données au service CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service), ce dernier étant exploité par l'ECMWF

(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) [8]. Sur la base d'observations satellitaires et in situ, le programme Copernicus fournit des données en temps quasi réel au niveau mondial, pouvant être utilisées pour des besoins locaux ou régionaux. Les données satellitaires générées dans le cadre de ce programme sont ouvertes et gratuites.

3.3. Avantages et limites

Le nombre important d'instruments de mesures embarqués dans les satellites permet aujourd'hui de suivre un grand nombre de molécules, d'aérosols et de paramètres. Ils sont un formidable outil, offrant dénormes possibilités et ouvrant des perspectives intéressantes dans divers domaines tels que la gestion des ressources, les océans, le changement climatique, la qualité de l'air, les risques naturels, Etc. Les satellites apparaissent ainsi comme un excellent outil de mesures qu'il convient cependant de modérer dans certains cas de figures. En ce sens, l'exploitation des données satellitaires ne peut se faire sans appréhender leurs avantages et limites. Les avantages et les limites sont abordés selon quatre critères principaux, trois étant liés aux données (disponibilité, qualité et accès) et le dernier étant associé aux instruments de mesures.

Avantages

La télédétection par satellite présente un grand nombre d'avantages comparés aux autres systèmes d'observations au sol (stations fixes et mobiles) et dans l'atmosphère (embarqué sur des navires, aéronef) en permettant notamment des observations à une échelle plus vaste que les autres systèmes d'observations. Les observations satellitaires sont répétables et régulières et peuvent être récoltées nimporte quand, ce qui permet de faire des comparaisons d'une période de mesure à une autre. Certains satellites sont pourvus d'un système et d'un algorithme permettant de s'affranchir des perturbations nuageuses ou d'un manque de lumière solaire. Les observations satellitaires ont quelques fois permis d'apporter une lecture et une compréhension sur les origines d'une pollution. Par exemple, l'origine ukrainienne mise en lumière par satellite à la suite de la pollution aux particules fines PM₁₀ en Europe en 2007, ou encore de la tempête de poussières en Asie en 2008 dont l'origine a été attribuée à la Mongolie, ou encore les feux intenses en Indonésie en 2015 ayant trouvés leurs explications dans le phénomène El Niño. Un des autres avantages repose sur le fait que les satellites peuvent être utilisés pour effectuer des mesures de polluants atmosphériques difficilement réalisables autrement. Cela peut être le cas par exemple des feux de végétation où la mesure in-situ ou aéroportée est quasi impossible. Dans certaines situations, il est même possible de comparer des données satellitaires avec des données modélisées, permettant ainsi d'apporter une justification aux modèles. Dans certains cas, les satellites permettent de décorrélérer les contributions anthropique et naturelle d'une pollution ; ceci paraît tout particulièrement intéressant compte tenu de la Directive Européenne de la qualité de l'air 2008/50/CE qui prévoit de déclarer aux autorités européennes la contribution anthropique des émissions atmosphériques, la contribution naturelle devant en être exclue. En matière de pollution, les mesures de composition chimique de l'atmosphère sont utiles pour les inventaires d'émissions. Un des autres gros avantages repose sur une calibration parfaite des instruments de mesures embarqués sur les satellites et leur cohérence dans le temps. Les observations par satellites sont par ailleurs non-intrusives et sans impact sur l'environnement. L'accès aux données est gratuit bien que leurs exploitations nécessitent des compétences particulières si bien que le recourt à des entités spécialisées dans l'exploitation des données satellitaires s'avère parfois incontournable.

Limites

Les limites de la télédétection spatiale sont peu nombreuses mais méritent d'être abordées. Ces limites sont pour certaines liées au fait que l'observation a lieu depuis l'espace tandis que d'autres sont liées aux instruments de mesures eux-mêmes. Un inconvénient, et non des moindres, est celui lié à la résolution spatiale; certains satellites ne permettant en effet pas d'avoir une résolution spatiale comparable avec celle permise au sol (la résolution spatiale est d'autant plus faible que la largeur de fauchée est grande). Alors que les mesures au sol peuvent être d'une grande variabilité temporelle, les observations satellitaires sont répétées selon le temps de revisite du satellite; les données intermédiaires sont donc absentes, conduisant ainsi à un manque de précision dans le suivi temporel des données. Par exemple, pour la prévision, la disponibilité de l'information satellitaire au moment de l'élaboration de la prévision est primordiale dans la prise de décision. En attendant la mise en orbite de satellites géostationnaires d'ici 2023 permettant de générer des données horaires, ce verrou peut en partie être levé en réalisant une étude de tendance par l'apprentissage statistique telle qu'imaginée dans notre présente étude (voir paragraphe 4.4.2). Aussi, les instruments à bord des satellites peuvent avoir des limites de détection/fonctionnement et être sensibles aux conditions météorologiques telle que la couverture nuageuse et le manque de luminosité. Fort heureusement, les progrès technologiques de ces dernières années permettent d'améliorer la qualité des observations depuis l'espace. Toutefois, certaines images satellitaires nécessitent un traitement spécifique avant une utilisation opérationnelle. Par exemple, l'instrument TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) ne prend pas en compte certains effets tels que les transformations chimiques ou encore l'angle solaire au zénith. Alors même que les espèces gazeuses sont suivis avec une grande précision, les données sur les aérosols le sont bien moins ; il est bien souvent difficile de discriminer le type d'aérosol tels que les particules fines PM_{2,5} et PM₁₀. Ce verrou peut en partie être levé en recoupant les données issues de plusieurs satellites. Il est souvent nécessaire de mettre en place des méthodes lourdes ou des outils de télédétection pour exploiter correctement les données satellitaires en évitant les biais, ou pour utiliser/moduler, même sans biais, les données afin qu'elles soient adaptées à nos besoins opérationnels (Ex.: intelligence artificielle). La corrélation entre les mesures réalisées depuis l'espace et celles mesurées depuis le sol peut constituer un frein à l'utilisation de données satellitaires pour observer l'atmosphère au niveau du sol. La fréquence de revisite de certains satellites ne permet par ailleurs pas de fournir des données temporelles corrélable avec la temporalité des données au sol. Enfin, les données étant intégrées dans une colonne, l'intérêt des satellites pour disposer d'informations sur la qualité de l'air peut être limité. Les données satellitaires ne sont ainsi utilisées que de manière complémentaire par rapport à celles mesurées au sol. Certaines images satellitaires nécessitent un traitement spécifique avant leurs utilisations opérationnelles. L'accès aux données est gratuit mais les compétences pour leurs extractions et formatages sont importantes si bien que certaines sociétés privées proposent leurs services ; dans ce cas, le coût de la prestation peut être élevé. Par ailleurs, la politique relative aux données et les accords de licence d'utilisateur final de certains opérateurs de satellites peuvent être très restrictifs et onéreux par rapport à l'utilisation des données résultantes. Certaines données peuvent ne pas être totalement disponibles/gratuites selon le type de satellite et la nature des données souhaitées. Aucune garantie non plus sur la durée de fonctionnement des satellites. En effet, certains satellites ont une durée de fonctionnement de quelques années, d'autres sont prolongés. Ainsi, aucune garantie sur la continuité du service gratuit et disponible des données. Certains satellites ne permettent pas d'avoir une résolution spatiale comparable avec celle permise au sol. La mesure des données satellitaires ne permet pas de s'affranchir de l'albédo du système Terre-atmosphère (couverture nuageuse, neige, aérosols, Etc.).

4. Etude de cas: cartographie régionale du dioxyde d'azote sur la base d'une exploitation des données du satellite Sentinel 5P

4.1. Le dioxyde d'azote

Le dioxyde d'azote (NO_2) est un polluant atmosphérique préoccupant, essentiellement produit par les activités humaines (industrie, transport routier, centrales électriques, combustion de la biomasse). Une exposition importante à ce gaz engendre des troubles sur la santé et contribue à la mortalité dans le monde, près de 70 000 en Europe et 10 000 en France. Le dioxyde d'azote participe dans les processus de chimie atmosphérique en générant une pollution secondaire (ex.: ozone, acide nitrique) ; il est à ce titre considéré comme un bon indicateur de la qualité de l'air dans les zones urbaines et industrialisées. Cependant, certaines études ont montré que les zones polluées par le dioxyde d'azote ne se limitaient pas aux zones urbaines et industrielles, indiquant qu'une modélisation plus fine était nécessaire. Aussi, en dépit des valeurs seuils de dioxyde d'azote fixées par la Directive Européenne 2008/50/EC, celles-ci sont bien trop souvent dépassées dans un grand nombre de régions européennes [9]. Les données fournies par les observatoires au sol installés dans différentes régions du monde ne sont pas suffisantes pour affiner la cartographie du dioxyde d'azote aux différentes échelles géographiques. La télédétection satellitaire apparaît ainsi ici comme un moyen complémentaire de fournir des données de mesures efficaces et fiables.

Le dioxyde d'azote est mesuré par télédétection spatiale depuis 1995. La première expérimentation d'une mesure satellitaire du dioxyde d'azote fut réalisée avec l'instrument GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) embarqué dans le satellite européen ERS-2 (1995-2002). Une cartographie du dioxyde d'azote a ainsi été réalisée mais avec une résolution spatiale de l'instrument relativement basse (320 km x 40 km). Depuis, les instruments de mesures se sont améliorés : son successeur, l'instrument SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CartographHY) embarqué sur le satellite Envisat de l'ESA (2002-2012), a permis de réaliser une cartographie plus fine du dioxyde d'azote grâce à une résolution spatiale nettement améliorée (60 km x 30 km); cette résolution a permis par exemple d'observer les grandes quantités de dioxyde d'azote rejetées dans la troposphère par des navires. Le nombre de publications sur cette thématique est important [10] avec pour sujet principal de tenter de relier ces observations aux sources d'émissions [11] et plus récemment d'étudier l'impact du confinement, lié à la crise sanitaire COVID-19, sur la concentration en NO_2 dans l'atmosphère [12] [13] [8] [14]. Quelques rares études ont comparé les mesures de dioxyde d'azote issues de l'instrument TROPOMI (Sentinelle 5P) à celles issues des stations de mesures au sol (réseau AirParif) [15].

Le satellite Sentinel 5P est bien adapté pour fournir des concentrations de NO_2 sur une colonne, compte tenu du temps de demi-vie relativement faible de ce polluant dans la troposphère. Les mesures troposphériques du NO_2 constituent une base de données intéressantes et indicatives mais

ne peuvent pas être considérés comme suffisantes dans une tentative de les relier de manière fiable aux sources réelles d'émissions. En effet, les mesures effectuées par l'instrument TROPOMI ne prennent pas en compte certains facteurs tels que les conditions météorologiques, les transformations chimiques, la présence de nuage, l'angle solaire au zénith, les phénomènes de transport et de dispersion.

L'instrument TROPOMI permet de fournir des données de dioxyde d'azote à partir de mesures effectuées au nadir. Contrairement à la troposphère, le dioxyde d'azote est uniformément réparti dans la stratosphère. Les niveaux de dioxyde d'azote mesurés au-dessus des zones les plus isolées du Pacifique ont servi à définir une colonne de référence pour le dioxyde d'azote dans la stratosphère. Ces valeurs sont automatiquement soustraites par l'instrument TROPOMI pour fournir directement les mesures de dioxyde d'azote dans la colonne troposphérique.

Dans le cadre de notre étude, le dioxyde d'azote a été choisi en raison de sa problématique décrite plus haut mais également du fait d'une bibliographie abondante sur le sujet nous permettant ainsi une analyse critique des résultats.

4.2. Le satellite Sentinel 5P

Parmi les satellites en orbites dédiés à l'observation de l'atmosphère terrestre, seul un faible nombre d'instruments satellitaires permet d'analyser le dioxyde d'azote, principalement GOME, SCIAMACHY, GOME-2, OMI, OSIRIS, ACE-FTS/MAESTRO, respectivement à bord des satellites ERS-2, Envisat, Metop-A/B, Aura, Odin, SciSat. Certains instruments ne sont plus opérationnels, d'autres encore ont une résolution spatiale trop large pour notre étude. Dans le cadre de notre étude, nous avons donc sélectionné un autre instrument de mesure, TROPOMI qui présente l'avantage d'être encore opérationnel, d'avoir une résolution spatiale appréciable plus fine, compatible avec une étude à l'échelle régionale, et d'être européen.

Dans le cadre du programme Copernicus, l'Agence Spatiale Européenne, en partenariat avec l'Union Européenne, a développé une famille de satellites, dont Sentinel 5P [16], « 5P » pour « précurseur de Sentinel 5 ». Lancé en octobre 2017, il est consacré à la surveillance de notre atmosphère. Il assure la continuité des observations de l'instrument SCIAMACHY du satellite Envisat et sa relève sera prochainement assurée par le lancement des satellites Sentinel 5 et Sentinel 4, ce dernier étant intéressant puisque sera positionné en orbite géostationnaire. Sentinel 5P embarque à son bord l'instrument TROPOMI, un spectromètre permettant de mesurer les concentrations d'aérosols et de nombreux gaz à l'état de traces présents dans l'air que nous respirons et influant par conséquent sur notre santé et le climat de notre planète, tels que : **dioxyde d'azote, dioxyde de soufre, ozone, méthane, monoxyde de carbone, formaldéhyde** [17]. TROPOMI est un spectromètre imageur à réseau passif, à visée nadir, et présentant un échantillonnage spatial pour le dioxyde d'azote de 3,5 km x 7 km. Le volume de données générées est impressionnant : environ 140 Gbits par orbite complète. La durée de vie opérationnelle du satellite Sentinel 5P a été évaluée à 7 ans mais un grand nombre de satellites dépassent allégrement leur durée de vie initiale. Son orbite est de type héliosynchrone quasi polaire avec une altitude de référence d'environ 824 km et une largeur de fauchée de 2600 km. Les mesures réalisées par l'instrument TROPOMI sont des « données de colonne »; les mesures sont donc réalisées sur toute la hauteur de l'atmosphère. Toutefois, certaines données telles que le profil d'ozone ou encore le différentiel convectif des nuages permettent, via un algorithme, de générer directement les densités de gaz sur la colonne troposphérique et stratosphérique, et d'avoir accès au profil vertical des densités. La Figure 1 image le déplacement orbital du satellite Sentinel 5P autour de la Terre.

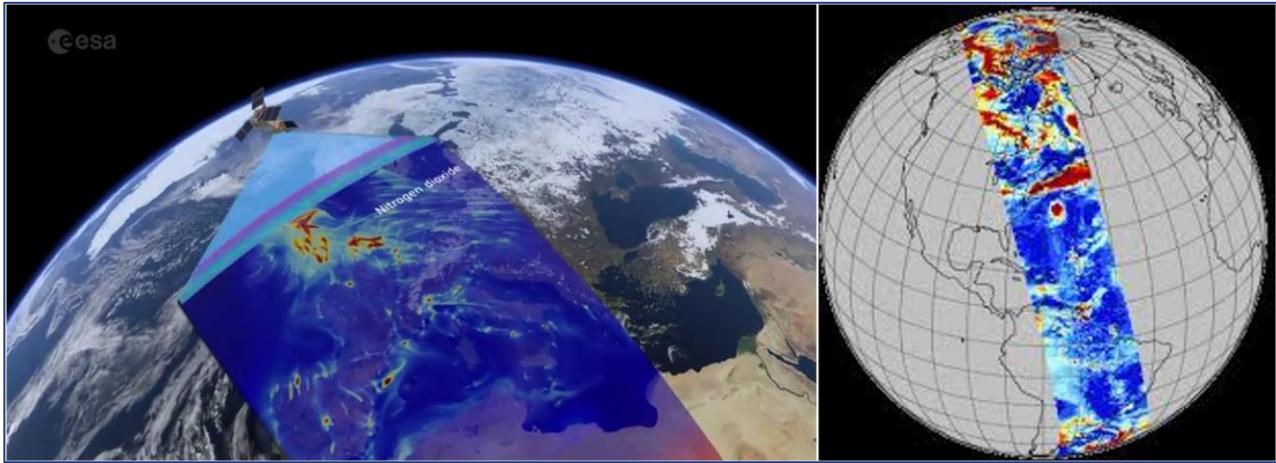


Figure 1 : Passage orbital imagé du satellite Sentinel 5P (ESA)

4.3. Objectif de l'étude

Dans le cadre de cette étude, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes a souhaité évaluer le potentiel d'exploitation des données satellitaires dans le cadre de ses missions réglementaires, notamment de voir comment ces données peuvent venir enrichir l'observatoire. L'exploitation de données du dioxyde d'azote issues du satellite Sentinel 5P constituera une première étude de cas. Le but est de créer une carte satellitaire des concentrations moyennes annuelle du dioxyde d'azote à l'échelle de la région Auvergne-Rhône-Alpes. L'objectif est d'apporter une analyse critique des données satellitaires dans une tentative de les comparer aux données au sol, et de voir si finalement les données satellitaires peuvent être utilisées comme outil complémentaire et opérationnel pour le suivi de la qualité de l'air. Compte tenu d'une année 2020 particulière liée à la crise du COVID-19, l'étude s'est portée sur l'année 2019.

4.4. Cartographie satellitaire du dioxyde d'azote à l'échelle régionale

4.4.1. Les produits de données du satellite Sentinel 5P

Hébergées sur le Copernicus Open Access Hub [18], les données du satellite Sentinel 5P sont accessibles soit par l'interface graphique sur le site, soit par le biais d'une interface de programmation d'où il est possible de faire directement des requêtes. Il existe également une librairie Python, appelée *Sentinelsat* [19] (licence GPLv3), qui permet d'interfacer avec cette interface de programmation via Python.

Dans le cadre de notre étude, un script en Python a été réalisé comprenant un grand nombre d'options de configurations, ce qui permet d'éviter de modifier le code si besoin d'ajouter ou modifier un paramètre. Quatre catégories d'options utilisables incontournables ont été identifiées : le produit (i.e. la nature du polluant), la date de début, la date de fin, et enfin le fichier de zone géographique. Le script de traitement contient également un certain nombre de fonctionnalités. D'abord, seules les données dans le périmètre régional sont utilisées. Ensuite, le système de coordonnées de ces données sont converties en coordonnées longitude/latitude. Enfin, les données sont triées selon leur qualité (voir plus loin).

Le service Copernicus livre des données brutes, dites de niveau L1 [20]. Celles-ci sont ensuite converties en données de niveaux L2 [20], qui se présentent sous forme d'une bande scannée lors d'un passage orbital du satellite (voir Figure 2).

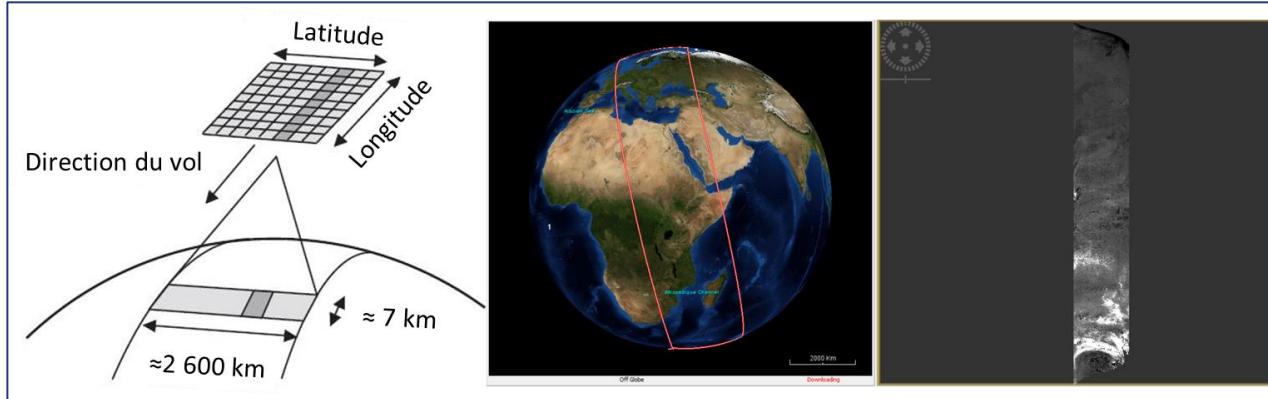


Figure 2 : Visualisation du produit NO₂ troposphérique à un niveau de traitement L2

Ces données sont sous un système de coordonnées selon l'heure du passage du satellite, et la direction de l'orbite. Le script de téléchargement en Python que nous avons mis au point a ensuite permis de convertir ces données en données de niveaux L3 [20], permettant alors de faire d'autres traitements et d'avoir des visualisations. Ces données peuvent ainsi se présenter sous la forme d'un maillage selon la latitude et longitude, au-dessus de la région Auvergne-Rhône-Alpes (voir Figure 3).

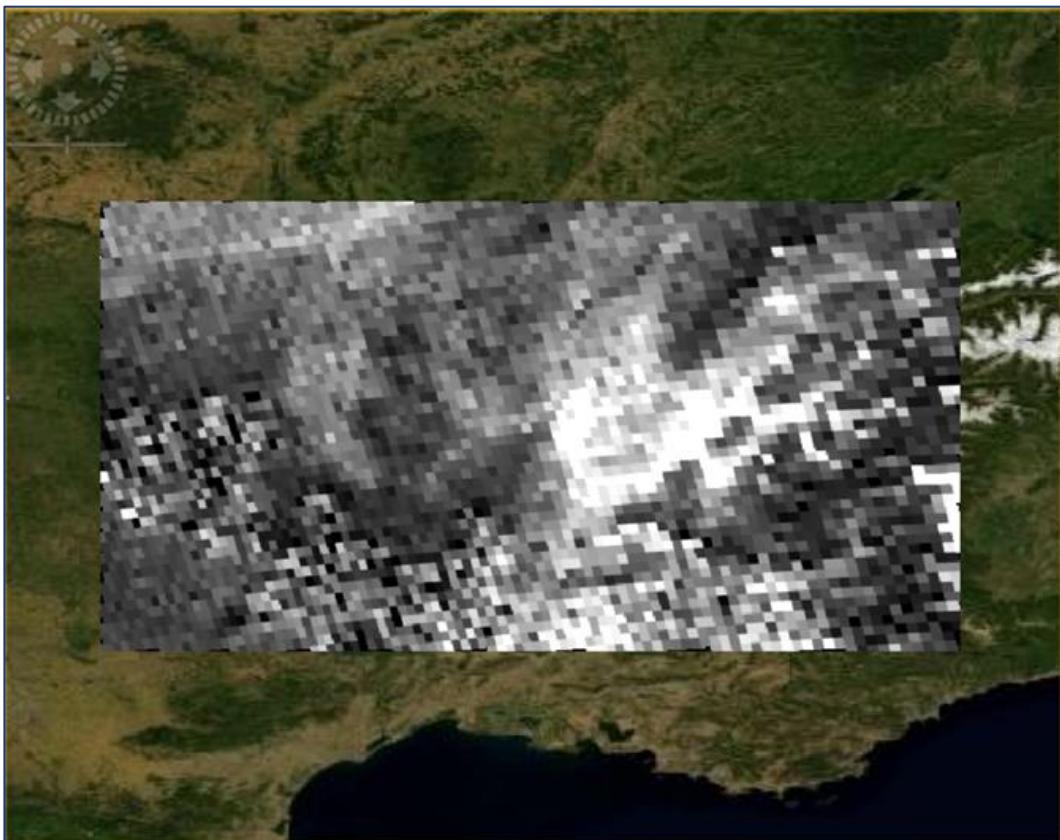


Figure 3 : Visualisation du produit NO₂ troposphérique à un niveau de traitement L3

4.4.2. Analyse critique des données

Dans le cadre de cette étude, des scripts (en Python) ont été générés permettant d'une part la récupération automatique des données et d'autre part de convertir ces données en un format exploitable visant une cartographie régionale du dioxyde d'azote. Une analyse opérationnelle des données satellitaires issues du Copernicus Open Access Hub [18] a été réalisée dans le but notamment de collecter des informations sur la répartition horaire des données satellitaires et sur la couverture régionale permise par ces données et ainsi voir dans quelle mesure ces paramètres influencent la moyenne annuelle du dioxyde d'azote. Cette démarche scientifique permet d'apporter une analyse critique sur la cartographie annuelle du dioxyde d'azote à l'échelle de la région. La démarche méthodologique d'analyse critique est décrite ci-dessous. Elle considère l'indice de qualité, l'échéance des données et leurs échantillonnages.

Indice de qualité

Sur la Figure 2, chaque maille comporte une mesure de dioxyde d'azote, ainsi qu'un indice de qualité. Cet indice de qualité est déterminé par le satellite (couverture nuageuse, reflets du soleil, Etc.) et peut prendre une valeur comprise entre 0 (la mesure n'est pas fiable) et 1 (la mesure est fiable à 100%). Il est donc nécessaire d'établir un filtre de qualité, afin d'éliminer toutes les mesures dont l'indice de qualité est inférieur à une valeur souhaitée. Le script de traitement intègre cette fonctionnalité. Le service Copernicus recommande d'utiliser un filtre de 0,5 ou 0,75. Après traitement, le maillage sera plus ou moins complet selon le filtre de qualité utilisé. Différentes valeurs de filtrage ont été testées afin de voir l'impact sur la couverture moyenne du maillage. Sur l'année 2019, une couverture moyenne d'environ 79% est obtenue avec un filtre de 0,5 contre environ 39% avec un filtre de 0,75. La valeur du filtre est donc un paramètre important à prendre en considération dans la réalisation d'une cartographie du dioxyde d'azote. Dans le cadre de notre étude, nous avons suivi les préconisations du service Copernicus et avons affecté la valeur 0,5 au filtre. Les données ainsi traitées ont été visualisées sous l'outil cartographique QGIS pour la région Auvergne-Rhône-Alpes (Figure 4). Elles peuvent désormais être utilisées pour la réalisation d'une carte de moyenne annuelle par exemple.

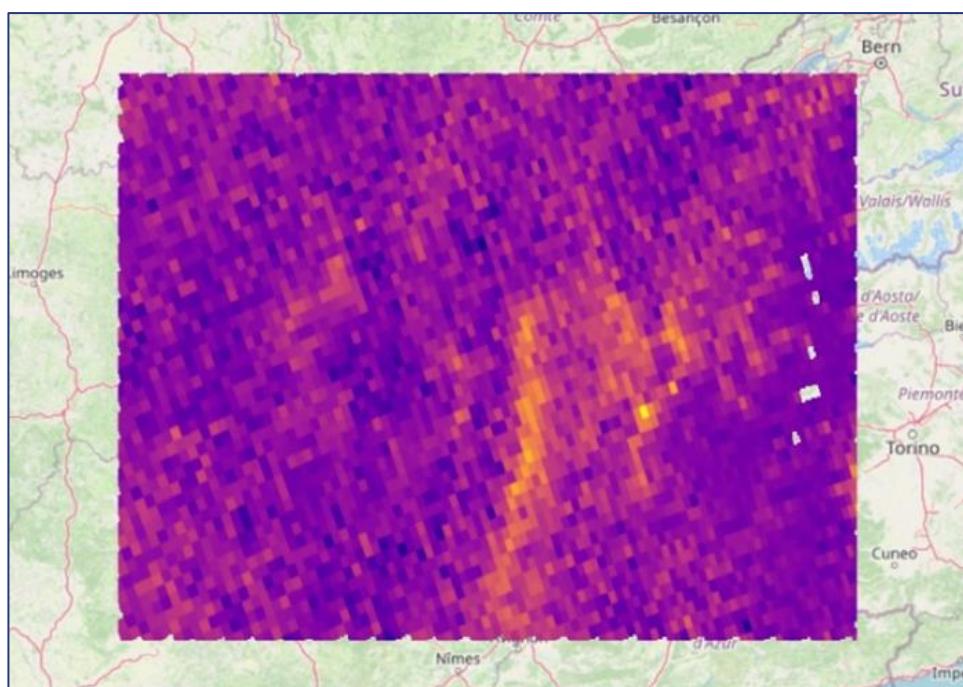


Figure 4 : Visualisation de données traitées dans QGIS sur la région Auvergne-Rhône-Alpes (molécules.cm^{-2})

Echéance des données

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes dispose de stations au sol permettant de mesurer certains polluants atmosphériques, dont le dioxyde d'azote, avec un pas de mesure horaire. Afin de pouvoir comparer la cartographie issue des données satellitaires à celle issue des données au sol, il est nécessaire de mettre en place une méthodologie. A cet effet, nous avons étudié l'échéance des données satellitaires. Il faut une journée entière au satellite Sentinel 5P pour couvrir entièrement la Terre ; son temps de revisite est d'environ 1 fois par jour. Nous avons ainsi décidé de quantifier l'écart entre les valeurs des données satellitaires du dioxyde d'azote obtenue lors d'une journée et leurs valeurs moyennes. Nous avons montré que la grande majorité des mesures prises par le satellite Sentinel 5P se situe entre 10h00 et 14h00. Cela signifie que si l'on observe un polluant qui varie fortement, et dont les variations importantes ne sont pas dans cette plage horaire, les écarts risquent d'être assez conséquents. Pour vérifier ce point, nous avons mis au point un protocole de test. Ce dernier consiste à générer la moyenne de concentration du dioxyde d'azote en 2019 de toutes les mesures issues des stations au sol d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes (échantillonnage complet). Cette moyenne est ensuite comparée à la moyenne de concentration du dioxyde d'azote en 2019 des seules mesures existantes dans l'intervalle correspondant aux échéances satellitaires, c'est-à-dire entre 10h00 et 14h00 (échantillonnage satellite). L'écart entre l'échantillonnage complet et l'échantillonnage satellite a été calculé pour chacune des stations au sol d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, en prenant en compte le nombre total de sites. Tenant compte d'un filtre de qualité de 1, et considérant la totalité des sites, un écart méthodologique d'environ 5% est obtenu (correspondant à environ $1,1 \mu\text{g.m}^{-3}$) entre l'échantillonnage complet et l'échantillonnage satellite. Cet écart doit cependant être reconstruit en prenant cette fois-ci en compte un filtre de qualité de valeur 0,5. Cette valeur indique que les données satellitaires sont valides sur 79% du territoire Auvergne-Rhône-Alpes (voir plus haut). Cela signifie qu'à chaque passage du satellite, il n'y a pas forcément une mesure correspondante pour chaque station, conduisant à considérer qu'il existe un échantillonnage spécifique pour chaque maille (échantillonnage satellite spécifique).

Echantillonnage des données selon le maillage des sites de mesures d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes

Les sites de mesures d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes ont été positionnés sur la maille tenant compte de leur coordonnées longitude/latitude. L'écart méthodologique a ainsi pu être recalculé tenant compte de la localisation de chacune des stations d'une part, et de la valeur du filtre de qualité fixée à 0,5. Le principe de calcul a été intégré au script Python. Tenant compte cette fois-ci d'un filtre de qualité de 0,5, un écart méthodologique d'environ 7,9% est obtenu (correspondant à environ $1,7 \mu\text{g.m}^{-3}$) entre l'échantillonnage complet et l'échantillonnage satellite spécifique. Si l'on compare désormais les valeurs moyennes sur l'année 2019 des échantillonnages (complet, satellite et satellite spécifique), on constate que l'écart méthodologique le plus important est trouvé en prenant en considération l'échantillonnage satellite spécifique (7,9%), c'est-à-dire avec un filtre de qualité de 0,5. Compte tenu des incertitudes de mesures du dioxyde d'azote issues de stations fixes d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes pouvant atteindre 10 à 15%, les écarts méthodologiques doivent pouvoir être relativisés ; ils sont considérés comme acceptables. Si l'on considère chaque site individuellement, les écarts méthodologiques sont très variables d'un site à l'autre.

Echantillonnage des données selon la typologie des sites de mesures d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes

Jusqu'ici, les écarts méthodologiques ont été calculés en considérant les valeurs moyennes de concentration du dioxyde d'azote générées sur l'ensemble des sites de mesures d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes. Or, le dioxyde d'azote est très largement lié au trafic routier. Ainsi, nous avons pris en compte la typologie des sites (trafic, urbain, périurbain, rural) dans le calcul des écarts

méthodologiques. Plus précisément, nous avons séparé les typologies de sites en deux groupes : urbain, trafic et périurbaines d'un côté (groupe A) et rurale de l'autre (groupe B). Concernant le groupe A, l'écart méthodologique le plus important relevé entre l'échantillonnage satellite et l'échantillonnage complet et entre l'échantillonnage satellite spécifique et l'échantillonnage complet est de 8,4%, correspondant à $1,9 \text{ } \mu\text{g.m}^{-3}$, ce qui reste une fois de plus acceptable. Concernant le groupe B, l'écart méthodologique le plus important relevé est de -8,1%, correspondant à $-0,41 \text{ } \mu\text{g.m}^{-3}$, ce qui reste une fois de plus acceptable.

4.4.3. Cartographie régionale satellitaire du dioxyde d'azote

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes assure une surveillance de la qualité de l'air et réalise une modélisation de la qualité de l'air sur l'ensemble de la région à une résolution de 10 mètres afin d'appréhender l'exposition chronique des habitants du territoire. Ces cartographies sont validées par les mesures des stations de référence implantées sur la région : 87 stations fixes et 17 stations mobiles. Le transport routier demeure la principale source d'oxydes d'azote (63 % des émissions régionales en 2019). La Région dispose de territoires variés et présente de fortes disparités d'exposition à la pollution de l'air ; 80 % de la population régionale vit dans des territoires surexposés, les grandes agglomérations.

Cartographies mensuelles du dioxyde d'azote

La Figure 5 montre l'évolution des concentrations moyennes mensuelles du dioxyde d'azote sur l'année 2019 en région Auvergne-Rhône-Alpes, issues de l'exploitation des données du satellite Sentinel 5P. Le dioxyde d'azote est principalement émis par le trafic routier et les activités industrielles, les concentrations les plus importantes étant localisées dans les zones urbaines, et autour des grands axes routiers. Les mesures du dioxyde d'azote effectuée au niveau du sol sur l'année 2019 montrent que, même si le dioxyde d'azote n'est pas le polluant le plus impacté par la saisonnalité, les concentrations ont malgré tout tendance à être en baisse du printemps à l'automne. Ceci est en partie observé avec les données satellitaires (Figure 5). En 2019, les mesures réalisées au niveau du sol présentaient une concentration moyenne mensuelle sur le mois de février supérieure aux années antérieures. Cette particularité est principalement liée à des conditions météorologiques particulièrement favorables à l'accumulation des polluants. Les observations satellitaires montrent également des concentrations importantes sur ce mois-ci. Les mesures effectuées au niveau du sol ont montré une baisse des concentrations du dioxyde d'azote à partir de mai-juin 2019, liée à des conditions météorologiques favorables à la dispersion des polluants ; ceci est également observé avec les données satellitaires (Figure 5). Bien que les données au sol et les données satellitaires ne peuvent être strictement et quantitativement comparées (les unités et les altitudes de mesures ne sont pas comparables), une comparaison qualitative peut néanmoins être réalisée.

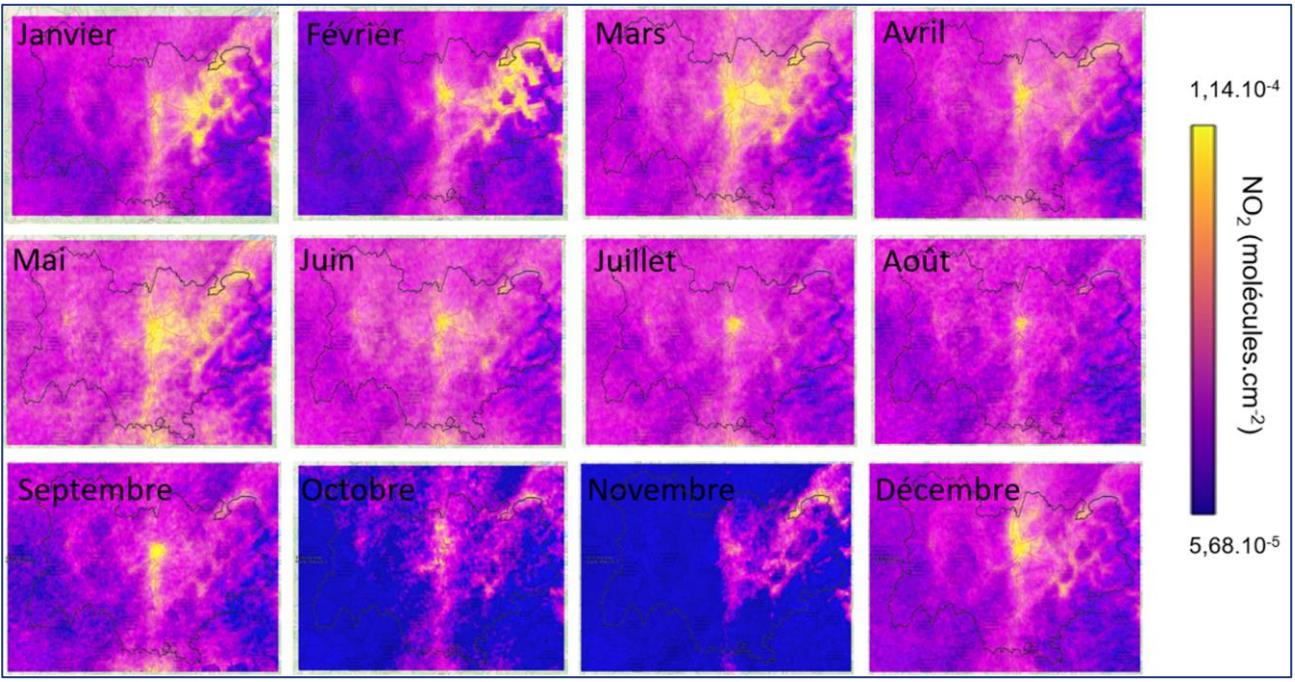


Figure 5 : Concentrations moyennes mensuelles (2019) du dioxyde d'azote en région Auvergne-Rhône-Alpes) issue des données du satellite Sentinel 5P.

En l'état actuel de nos connaissances, il n'y a pas de cartographie satellitaire du dioxyde d'azote sur la région Auvergne-Rhône-Alpes dans la littérature connue. Notre étude constitue donc une première à l'échelle de notre région. Cependant, une étude récente a été menée à l'échelle nationale [21]. Elle a consisté à exploiter les données du satellite Sentinel 5P pour réaliser des cartographies mensuelles et annuelles du dioxyde d'azote à l'échelle de la France entre Mai 2018 et Juin 2019. Un indice de qualité de 0,5 a été considéré par les auteurs. La Figure 6 montre les concentrations du dioxyde d'azote au mois de Mai 2019 (Figure 6a) et Juin 2019 (Figure 6b).

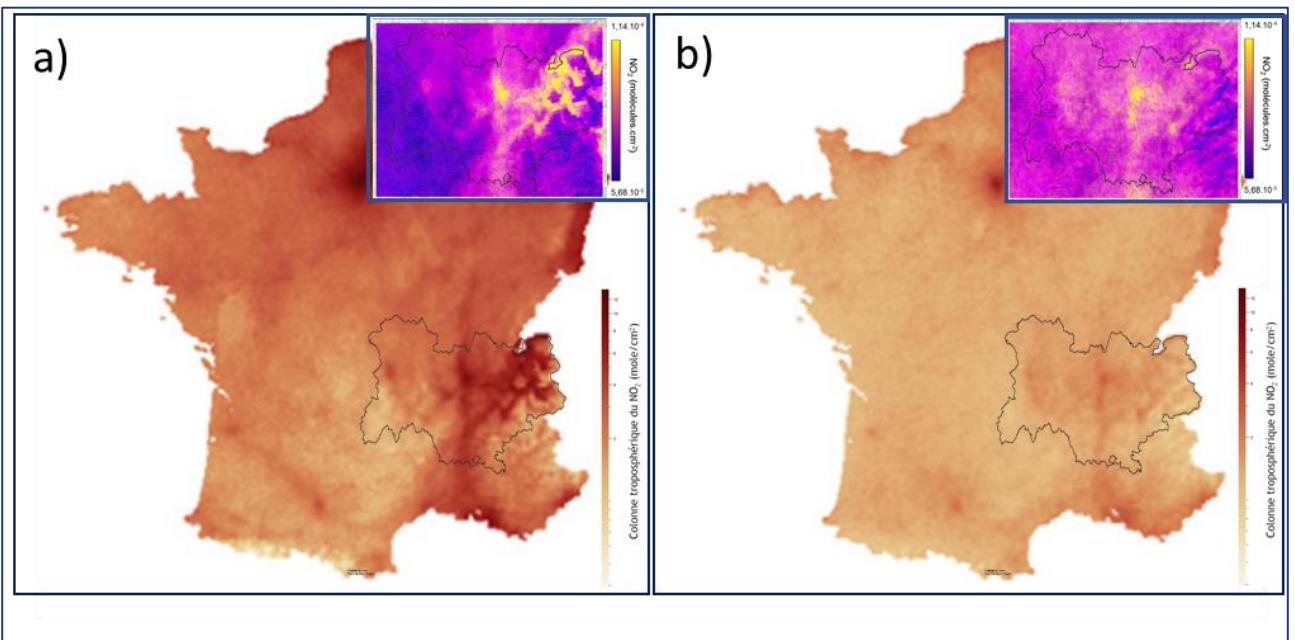


Figure 6 : Concentrations moyennes mensuelles (2019) du dioxyde d'azote issue des données du satellite Sentinel 5P obtenues dans la littérature [21] en comparaison avec celles obtenues dans la présente étude Atmo Auvergne-Rhône-Alpes (encadrés) : a) Mai 2019 ; b) Juin 2019

Cartographie annuelle du dioxyde d'azote

La Figure 7 montre la concentration moyenne annuelle (2019) du dioxyde d'azote en région Auvergne-Rhône-Alpes avec un filtre de qualité de 0,5. La Figure 8a correspond à la Figure 7 sur laquelle il est possible de voir les différences de concentrations en dioxyde d'azote entre les zones urbaines, trafic et périurbaines d'un côté et les zones rurales de l'autre. La méthodologie mise en œuvre (décrise plus haut) permet de moduler les résultats ainsi obtenus et juger ainsi de la pertinence des données satellitaires qui sont considérées comme acceptables au regard des incertitudes des mesures de dioxyde d'azote issues des stations fixes au sol d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes.

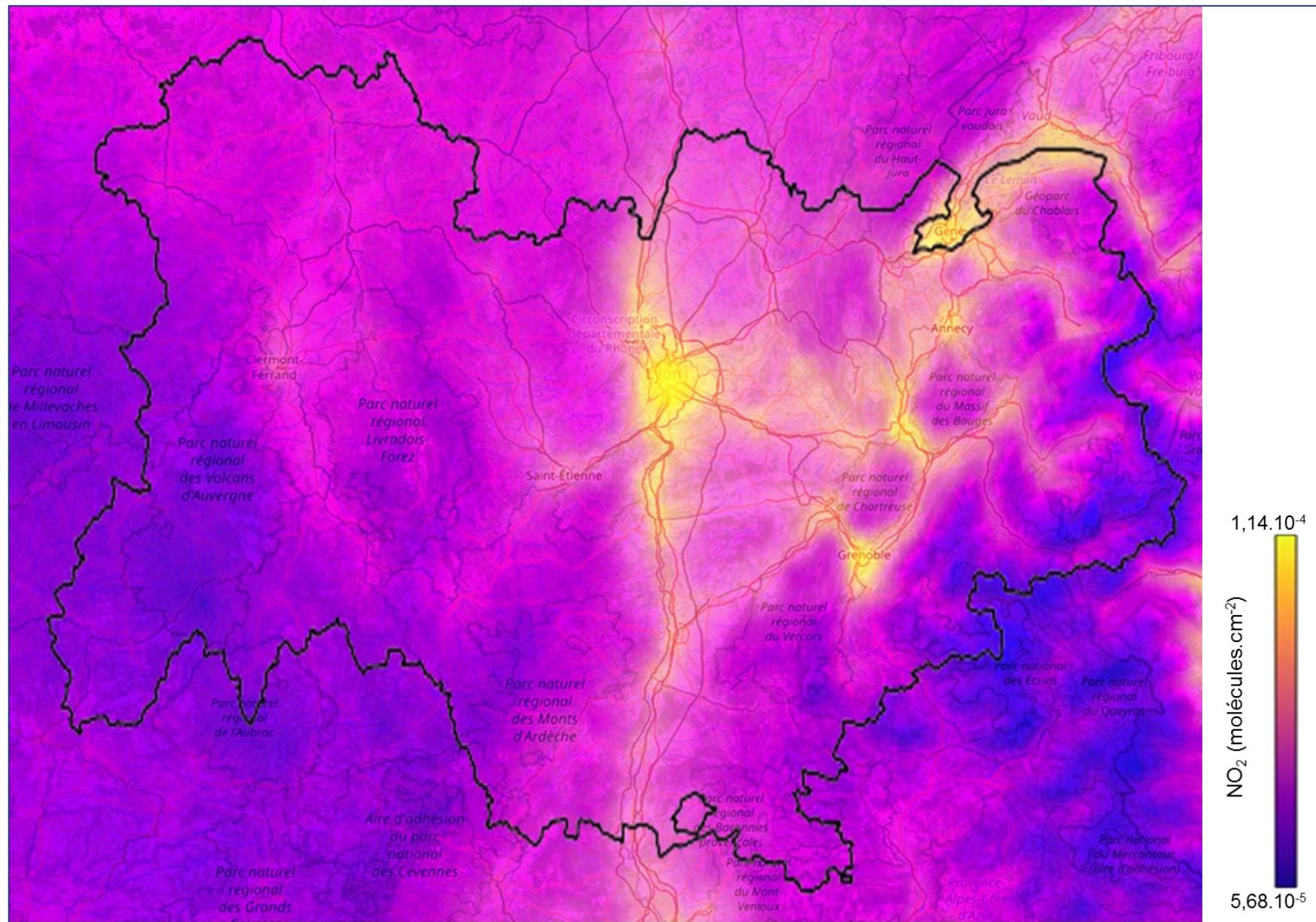


Figure 7 : Concentration moyenne annuelle (2019) du dioxyde d'azote en région Auvergne-Rhône-Alpes, issue des données du satellite Sentinel 5P

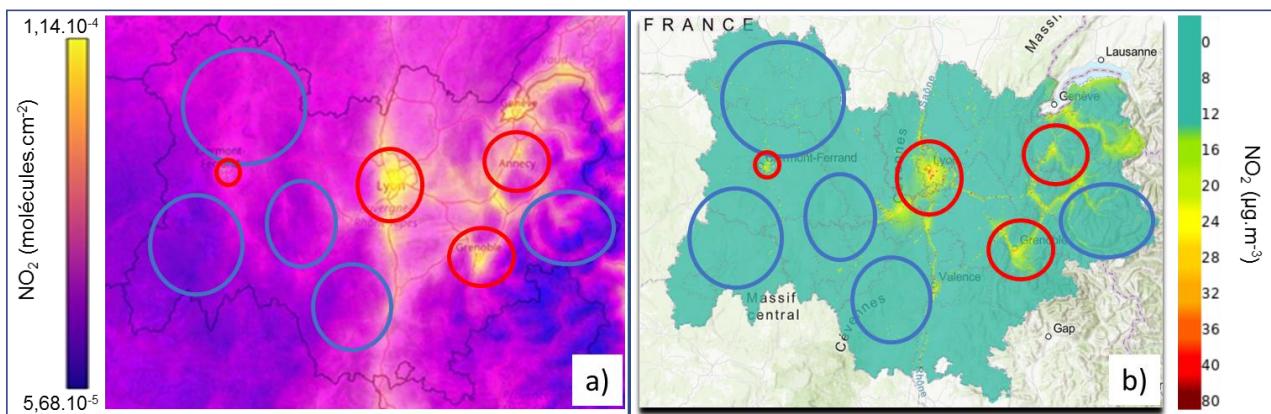


Figure 8 : Concentration moyenne annuelle (2019) du dioxyde d'azote en région Auvergne-Rhône-Alpes : a) issue des données du satellite Sentinel 5P ; b) issue des données au sol d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes. Cercles rouges : zones urbaine, trafic et périurbaines ; cercles bleus : zones rurales

La Figure 8b montre les concentrations moyennes annuelle (2019) du dioxyde d'azote dans l'air ambiant, obtenue par modélisation sur la région Auvergne-Rhône-Alpes. Les données satellitaires produisant des mesures intégrées de NO_2 dans la colonne troposphérique et les données modélisées se situant dans la basse atmosphère au niveau du sol, les deux cartographies (Figure 8a et Figure 8b) ne peuvent être strictement comparées. Cette comparaison est rendue par ailleurs difficile puisque les unités de concentrations sont différentes ($\text{mol}\cdot\text{cm}^{-2}$ vs $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). Cette comparaison est également rendue difficile puisque les légendes de concentrations des cartes modélisées (Figure 8b) sont choisies par rapport aux valeurs limites de concentration de dioxyde d'azote fixées par l'Europe ; ceci ne permet donc pas d'appréhender les nuances pour les comparer aux cartes satellitaires (Figure 8a). Toutefois, ces deux figures montrent de réelles similitudes et peuvent être comparées de manière qualitative. Ces deux figurent montrent que les données satellitaires reflètent assez bien la distribution de concentration modélisée du dioxyde d'azote sur la région Auvergne-Rhône-Alpes, à la fois sur les zones trafic, urbaines, périurbaines d'une part et sur les zones rurales d'autres part. La comparaison est intéressante aux abords des grands axes de circulation et dans les centres-villes des grandes agglomérations, cela étant principalement lié au trafic routier qui génère majoritairement le dioxyde d'azote. Il est toutefois possible de corrélérer davantage les mesures satellitaires aux mesures modélisées en tenant compte de la hauteur de la troposphère, les modèles de chimie-transport et du profil de concentrations du dioxyde d'azote ; ceci restera très certainement un élément à investiguer. La cartographie du dioxyde d'azote à l'échelle de la Région est qualitativement comparable à celle issue de données modélisées. Le lancement prochain du satellite Sentinel 4, qui sera positionné en orbite géostationnaire, permettra de fournir des données à des échelles de temps comparables avec celles issues des stations fixes au sol d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes. Ceci permettra de s'affranchir de la problématique liée à l'échéance des données (voir plus haut). A ce stade-ci d'investigation, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes a été en capacité de prendre en main la thématique télédétection spatiale, d'en mesurer les avantages et identifier les limites, réaliser une exploitation opérationnelle et automatique des données d'un polluant cible, le dioxyde d'azote, sur la région Auvergne-Rhône-Alpes. Les observations qui en découlent indiquent que les données satellitaires peuvent être utilisées avec un intérêt certain pour la région Auvergne-Rhône-Alpes.

5. Intérêts des données satellitaires pour la région Auvergne-Rhône-Alpes

Il est important de savoir si les données satellitaires peuvent avoir une dimension régionale au regard des problématiques régionales sur les polluants explorés (pollen, ambroisie, gaz à effet de serre, Etc.) avec pour objectif principal de voir dans quelle mesure les satellites permettraient de confirmer et compléter les observations au sol à l'échelle régionale.

5.1. Les acteurs au service des régions

Certains acteurs proposent des services de valeur lorsque d'autres se focalisent davantage sur la vente des données ou sur des services d'infrastructures. Un certain nombre de régions françaises ont identifié les satellites comme outil incontournable au regard de leurs problématiques propres. Cependant, elles sont face à un dilemme : exploiter les données satellitaires libres et gratuites mais nécessitant de mobiliser des ressources en interne ayant des compétences techniques particulières, ou bien faire une prestation auprès de sociétés privées, ce qui engendre un coût non négligeable.

5.1.1. Les acteurs privés

En dépit des efforts mis en œuvre par le programme Copernicus pour aider les régions à utiliser les données satellitaires, leurs exploitations restent encore trop techniques. Un nombre toujours plus croissant de sociétés privées entre dans l'ère du « Satellite as a Service » (SaaS). Elles ont très vite compris le besoin des régions, communes et villes en leur proposant des solutions ciblées à des besoins identifiés. Ces sociétés deviennent des moteurs importants de l'innovation dans le secteur spatial. Par exemple, la société TRE Altamira (filiale du groupe CLS, elle-même filiale du CNES) propose à des villes de détecter les mouvements du sol à partir d'images radar. Le Grand Paris a fait appel aux services de cette société pour suivre les mouvements du sol dans le cadre de travaux souterrains et éviter les risques d'effondrements. La ville de Dax utilise également les compétences de cette société pour surveiller les mouvements du sol en raison de l'exploitation de galeries de sel sous la ville. La société CLS fournit également des services satellitaires basés notamment sur la localisation et la collecte de données environnementales [22]. La Start-Up Kermap propose aux collectivités une aide à l'interprétation des images satellitaires basée sur une technologie de reconnaissance automatique d'objets (intelligence artificielle). Des villes comme Rennes ou encore Toulouse ont fait appel à cette Start-Up pour récolter des informations éclairées sur l'aménagement urbain, le taux de végétalisation, les îlots de chaleur, Etc. Bien d'autres sociétés françaises se sont positionnées dans le secteur spatial : les filiales ACRI-ST et ARGAN du groupe ACRI, spécialisées en traitement des données satellitaires, notamment atmosphériques, et en surveillance et prévision de l'environnement, proposent à des organismes publics, des régions, Etc. des prestations allant de l'aide à l'analyse à l'aide à la décision.

5.1.2. Les acteurs institutionnels

Le programme Copernicus propose ses services pour un large éventail d'utilisateurs (citoyens, organismes de recherches, décideurs politiques, Etc.). Aujourd'hui, les régions européennes comptent d'ailleurs parmi les principaux utilisateurs et acheteurs d'applications, de produits et de services spatiaux, à travers notamment les deux principaux programmes Copernicus et Galileo. Il existe également des acteurs proposant des services dédiés quasi exclusivement aux régions. Ainsi, pour des questions relatives à l'utilisation de données satellitaires à l'échelle régionale, certaines régions sont représentées par l'association NEREUS (Network of European Regions Using Space Technologies) [23]. Crée en 2007, elle est un réseau unique représentant les intérêts des régions européennes. Elle favorise les discussions politiques, les coopérations et partenariats interrégionaux, et apporte des informations sur les avantages offerts par la télédétection spatiale à travers des cas concrets d'utilisation de données satellitaires et sur les innovations de demain. En partenariat avec l'ESA et la Commission européenne, 99 utilisations des données satellitaires issues de Copernicus ont fait l'objet d'une publication européenne en 2018 [24]. L'ESA propose également de nombreuses plateformes thématiques pour étudier la Terre à partir de données satellitaires potentiellement intéressantes pour les régions (régions urbaines, zones côtières, forêts, risques, sécurité alimentaire, Etc.). Mobilisé autour du Plan d'Applications Satellitaire [3], le RST (Réseau Scientifique Technique), formé par une trentaine d'organismes publics) [4] ayant développés des compétences en matière de traitement de données satellitaires, apporte une aide pour l'élaboration, la mise en œuvre et l'évaluation des politiques publiques de l'aménagement des territoires et du développement durable. Parmi ces organismes publics se trouvent des acteurs français incontournables tels que l'INERIS, le CNES, le CNRS, le CEREMA ou encore Météo-France. Inscrite sur la feuille de route nationale des infrastructures de recherche française et dédiée aux données d'observation de la Terre, DATA TERRA, à travers sa composante AERIS, permet aux utilisateurs un accès libre à des données satellitaires [25]. En proposant des activités de gestion de données et d'expertise scientifique en atmosphère, cette infrastructure de recherche vient en appui des politiques publiques, notamment. Enfin, des chaires se sont mises en place dans les différentes régions françaises. En région, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes a, en 2018, soutenu la création d'un institut d'intelligence artificielle (MIAI) porté par l'Université Grenoble Alpes. Une des chaires de l'institut orientée sur l'environnement « Télédétection multi-échelle, multimodale et multi-temporelle » a pour objectif général de mettre en œuvre des méthodes avancées de traitement de l'information pour traiter des sources d'information hétérogènes et massives, intégrant des techniques d'apprentissage.

Ce sujet est en connexion avec les besoins régionaux d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, qui ambitionne plus précisément d'utiliser les outils d'intelligence artificielle pour exploiter les données satellitaires en vue d'une surveillance de la qualité de l'air. Atmo Auvergne-Rhône-Alpes est également en contact avec le laboratoire LISTIC de l'Université Savoie Mont Blanc, spécialisé en intelligence artificielle et avec qui des collaborations peuvent être envisagées. Récemment, l'Etat français a souhaité faire émerger des centres spatiaux universitaires, berceau des innovations spatiales, pour appuyer les agences spatiales et les utilisateurs. La Région Auvergne-Rhône-Alpes figure parmi les quelques régions bénéficiant de ce type d'acteurs sur le territoire national. C'est le cas notamment en région Auvergne-Rhône-Alpes avec le Centre spatial universitaire de Grenoble (CSUG), inauguré en 2015 [26]. Le CSUG affiche l'ambition de devenir un acteur central dans le développement de l'instrumentation spatiale miniaturisée (nano-satellites/cubesats) en France et en Europe, et renforce ainsi le secteur spatial en région Auvergne-Rhône-Alpes.

5.2. Positionnement

Depuis de nombreuses années, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes mesure et étudie la pollution atmosphérique au niveau de l'air ambiant. Il dispose d'un réseau de surveillance chargé de la production, la bancarisation et la dissémination de données de référence sur la qualité de l'air, venant enrichir l'observatoire régional de la qualité de l'air. Chaque année, l'observatoire développe un peu plus ses méthodes, modernise ses techniques de mesure et d'expertise de la qualité de l'air tout en favorisant les innovations. Ainsi, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes prend en compte les enjeux émergents de la pollution atmosphérique et les nouvelles technologies en mettant en place des partenariats dans le cadre d'expérimentations, d'innovations et de programmes régionaux, nationaux et européens. En 2020, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes s'est intéressé à la télédétection spatiale comme technologie prometteuse pour l'observation de l'atmosphère terrestre. Les évolutions technologiques des instruments de mesures embarqués dans des satellites permettent aujourd'hui de fournir une description détaillée de l'atmosphère terrestre permettant aux citoyens, scientifiques et décideurs politiques d'appréhender les enjeux de qualité de l'air et ceux liés au changement climatique.

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes a souhaité, avec le soutien de la région, investiguer le potentiel d'exploitation opérationnelle des données satellitaires avec pour objectif de voir comment ces données pouvaient venir compléter, voir améliorer les données mesurées ou modélisées au niveau du sol (ex. : vérifier et ajuster les cartographies réglementaires, voire les cadastres d'émissions de polluants et gaz à effet de serre). Dans cette stratégie d'innovation à visée opérationnelle, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes a ciblé les principales thématiques d'intérêt, pour la région Auvergne-Rhône-Alpes, à exploiter les données satellitaires. Chacune des thématiques, classées selon les métiers d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes (cadastre d'émissions, modélisation, et cartographie), a fait l'objet d'une analyse critique en termes de forces et faiblesses tenant compte notamment des avantages et limites liés à l'exploitation opérationnelle des données satellitaires (voir paragraphe 3.3).

5.3. Les thématiques d'investigations

Avec les progrès technologiques de ces dernières années, la télédétection spatiale est aujourd'hui utilisée dans de nombreuses applications. Un nombre important d'applications, en particuliers sur le volet observation de l'atmosphère, et de cas concrets d'études sont décrits dans la littérature. En France, des acteurs proposent des services gratuits ou payants à des décideurs politiques, scientifiques, ou autres utilisateurs en adaptant leur stratégie dans un marché spatial qui continue d'évoluer. Une des particularités de la télédétection spatiale est qu'elle peut être exploitée sur une thématique précise et à des échelles spatio-temporelles, en lien avec les préoccupations des utilisateurs. Parmi les thématiques utiles aux régions françaises, il y a par exemple : la caractérisation fine des formes végétales, la modélisation/cartographie des îlots de chaleur urbains, la gestion du risque inondation et des feux, le suivi du déséquilibre électrique issu du photovoltaïque, la cartographie des traits de côte, l'identification du potentiel géothermique, le changement climatique, l'aménagement des territoires, Etc. L'observation de l'atmosphère terrestre est une composante importante des programmes spatiaux européens si bien qu'un nombre important de polluants atmosphériques et de paramètres peuvent désormais être obtenus de manière quantitative à des échelles spatio-temporelles appréciables et des données allant de la colonne totale au profil de concentrations. Alors que les mesures au sol fournissent des données sur des zones localisées, les mesures satellitaires permettent une plus large couverture spatiale, notamment dans des zones isolées et très peu couvertes par des réseaux de mesures au sol. Il y a là un intérêt évident pour Atmo

Auvergne-Rhône-Alpes à utiliser les données satellitaires comme outil complémentaire aux données au sol, notamment sur les thématiques liées à ses missions : améliorer les inventaires d'émissions, améliorer nos connaissances des processus physico-chimiques aux différentes échelles géographiques en les comparant aux simulations des modèles, améliorer la prévision et le suivi des pics de pollution par une assimilation dans les modèles dédiés.

5.3.1. Cadastre d'émission de l'ammoniac

La région Auvergne-Rhône-Alpes dispose de 87 stations fixes et 17 stations mobiles permettant d'analyser un certain nombre de polluants. Les données cartographiques sont à ce jour obtenues par modélisation. Les données satellitaires peuvent ainsi être exploitées pour obtenir des données plus homogènes à l'échelle régionale. C'est particulièrement intéressant pour le polluant ammoniac (NH_3). L'ammoniac est un polluant problématique, émis principalement par le secteur agricole (engrais, épandage, élevage), et qui contribue à la formation de particules ($\text{PM}_{2,5}$ le plus souvent), à l'acidification, à l'eutrophisation, au changement climatique. La commission Européenne fixe à cet effet des valeurs seuils d'ammoniac ainsi qu'une stratégie de réduction de ces émissions. La région Auvergne-Rhône-Alpes s'intéresse de près à ces problématiques d'émissions d'ammoniac. Ce polluant fait d'ailleurs l'objet de campagnes de mesures par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes depuis de nombreuses années. Toutefois, l'estimation des émissions d'ammoniac est problématique car elles ne sont pas complètes, avec des données manquantes sur la région, et ne reflètent ainsi pas la réalité. Il convient donc d'avoir une estimation des émissions d'ammoniac la plus réaliste possible, spatialement et temporellement, ceci afin d'orienter les stratégies d'actions en faveur de leur réduction. Une récente étude a justement mis en lumière cette problématique en réalisant pour la première fois une carte mondiale des émissions d'ammoniac grâce à l'exploitation de données satellitaires (instrument IASI embarqué dans le satellite Metop) sur la période 2008-2016 [27]. Cette cartographie satellitaire a permis de mettre en évidence un nombre important de sources d'émissions, dont une partie était jusqu'alors inconnue. Cette étude a également mis en évidence l'écart, souvent très important, entre les émissions d'ammoniac obtenues sur la base de la réalisation d'un inventaire et celles obtenues par images satellitaires : les cadastres d'émissions sous-estimaient les émissions de ce polluant. Cette étude, comme d'autres, montre ainsi clairement l'intérêt d'exploiter des données satellitaires en lien avec une problématique majeur de qualité de l'air et de santé publique. Des campagnes de mesures réalisées par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes ont déjà permis d'apporter des informations mais une couverture complète à l'échelle de la région n'a jamais été faite. Il est donc nécessaire de revoir les inventaires d'ammoniac en tenant compte de l'évolution temporelle rapide de ces sources et de sa répartition spatiale. La télédétection spatiale apparaît ainsi ici adaptée pour améliorer le cadastre d'émissions de l'ammoniac à l'échelle régionale.

La région Auvergne-Rhône-Alpes étant fortement impliquée dans le développement de la filière méthanisation, évaluer les émissions d'ammoniac au niveau des sources d'activités permettraient par ailleurs de fournir des données complémentaires à la filière et d'enrichir le cadastre des émissions d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes.

5.3.2. Cadastre d'émission du méthane

Le méthane est un gaz à effet de serre qui contribue au réchauffement climatique. C'est aussi un des polluants précurseurs de l'ozone, polluant estival en constante augmentation dans notre région. En partenariat avec le Conseil Régional, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes réalise depuis quelques années des campagnes de mesures en air ambiant du méthane dans le but d'apporter un premier éclairage sur les enjeux de qualité de l'air associés notamment à la filière méthanisation. En effet, la Région Auvergne-Rhône-Alpes est pleinement engagée en faveur d'un développement vertueux de la filière

méthanisation, contribuant ainsi à l'atteinte des objectifs de plusieurs politiques environnementales. Cette filière génère cependant de nombreux questionnements, notamment celui relatif aux émissions atmosphériques générées par les différents processus et procédés mis en jeu au sein d'une unité de méthanisation. La littérature et les études menées par différentes institutions telles que l'ADEME montre un faible niveau de connaissance sur la quantification des émissions de polluants atmosphériques liées aux installations de méthanisation. A ce jour, les calculs d'émissions et les méthodes de référence actuelles au niveau national ne prennent pas suffisamment en compte les émissions polluantes liées à l'ensemble du processus de méthanisation. Il apparaît ainsi important, au regard des enjeux de développement régionaux, de s'intéresser à ce sujet en intégrant les fuites de méthane liées à la filière méthanisation dans les inventaires spatialisés des émissions atmosphériques en région Auvergne-Rhône-Alpes. Atmo Auvergne-Rhône-Alpes est pionnière dans cette démarche en réalisant des études exploratrices et préliminaires dans l'attente de préconisations nationales qui viendront harmoniser les méthodes de calcul [27]. Jusqu'ici, ces études étaient basées sur des campagnes de mesures au sol effectuées avec des analyseurs en continu disposés dans des stations mobiles. Cependant, le nombre de données récoltées est limité avec une répartition spatio-temporelle encore beaucoup trop faible. Compte tenu des premières avancées d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes sur la thématique télédétection spatiale, et compte tenu des priorités régionales en faveur d'une réduction des émissions de polluants atmosphériques, il est jugé utile d'exploiter les données satellitaires pour estimer les concentrations de méthane à l'échelle régionale. Ceci n'a jamais été réalisé et une cartographie satellitaire du méthane à l'échelle régionale serait une première. Elle permettrait, tout comme pour l'ammoniac, d'améliorer le cadastre des émissions de méthane et de compléter ce cadastre avec les données d'émissions issues de la méthanisation, filière portée par la Région. Très peu de travaux ont été effectués sur cette thématique. Les concentrations de méthane peuvent être obtenues grâce aux mesures effectuées par l'instrument TROPOMI embarqué dans le satellite Sentinel 5P. Contrairement au dioxyde d'azote pour lequel la résolution spatiale de l'instrument était de 3,5 km x 7 km, celle relative au méthane est de 7 km x 7 km, donc moindre. En 2020, une collaboration entre l'Institut néerlandais de recherche spatiale (SRON) et la société privée canadienne GHGSat a permis de détecter des lieux d'émissions de méthane avec une résolution inégalée à ce jour, de l'ordre de 25 mètres. La détection de méthane est permise par le satellite Sentinel 5P tandis que sa quantification l'est par le satellite CLAIRE, puis IRIS de la société GHGSat [28]. Cette quantification permet de corrélérer la présence de méthane aux abords d'installations industrielles, l'objectif étant de proposer des services à des clients désireux de réduire leur empreinte carbone. GHGSat est la seule société privée permettant une surveillance de gaz à effet de serre, dont le méthane, émis par des installations industrielles. Des émissions de méthane ont ainsi pu être mesurées au-dessus de mines de charbon, de puits de pétrole, d'installations de stockage de déchets, Etc. Les données collectées par la société GHGSat sont payantes et confidentielles. Toutefois, elle a souhaité rendre public l'une des cartes les plus précises, à l'échelle du globe, de concentration atmosphérique de méthane [29]. La Figure 9 montre les concentrations moyennes de méthane mesurées par le satellite IRIS de la société GHGSat sur le mois de septembre 2020 (29 août 2019 – 03 octobre 2020) aux différentes échelles géographiques (monde, France et région Auvergne-Rhône-Alpes) ; un masque de la région Auvergne-Rhône-Alpes a été appliqué pour visualiser le périmètre régional.

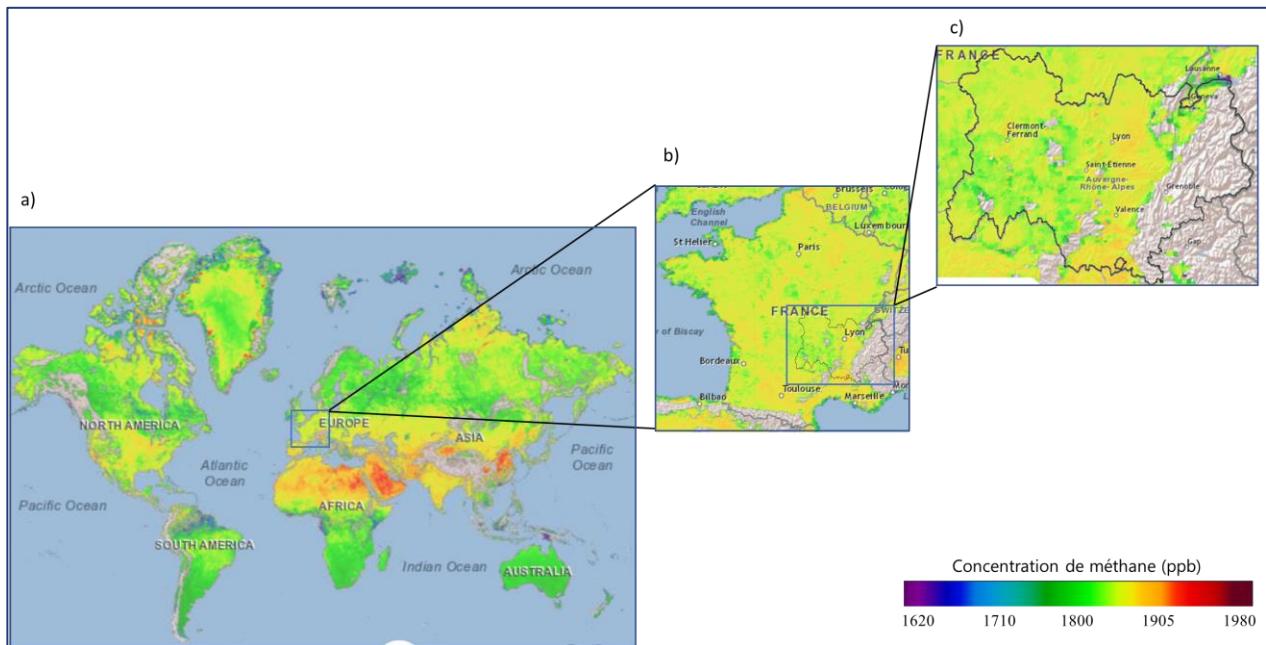


Figure 9 : Cartographie a) mondiale, b) nationale, c) régionale, des concentrations de méthane dans l'atmosphère mesurée par le satellite Iris de la société GHGSat [29]

Cette carte interactive est gratuite mais ne propose pas la résolution fine permise par le satellite IRIS de la société GHGSat, celle-ci étant destinée aux clients prescripteurs. La société GHGSat continue ses collaborations avec d'autres acteurs tels que TotalEnergies. La presse mondiale indique que le marché du « méthane satellitaire » va bientôt connaître des avancées majeures, notamment avec des satellites de résolutions encore plus fines qui seront lancés par des concurrents tels que Bluefield Technologies [30] ou encore Environmental Defence Fund [31].

5.3.3. Modélisation de la qualité de l'air

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes considère qu'il y a un intérêt réel à exploiter les données satellitaires pour la prévision de la qualité de l'air car elles permettent d'étudier la tendance et l'évolution par exemple des épisodes de poussières à l'échelle globale. Il peut également être envisagé d'exploiter les données satellitaires pour mieux optimiser et caler les conditions limites et initiales en temps réel (amélioration des modèles). Les données satellitaires peuvent également fournir des informations précieuses, telles que les profils verticaux, pour valider les résultats des modèles régionaux aux différentes couches atmosphériques ; cela peut optimiser les performances des modèles dans les basses couches. L'ozone et les oxydes d'azotes pourront être considérés comme cas d'études. Aussi, les données satellitaires peuvent être utilisées pour prévoir l'évolution du climat. En effet, les observations spatiales seront un atout pour optimiser les données d'entrées des modèles (données météorologiques/champs d'écoulement). Cela peut être assuré par plusieurs techniques innovantes (big data, intelligence artificielle, Etc.), l'idée étant ici d'optimiser les résultats issus de la modélisation. Enfin, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes considère que les données satellitaires permettraient de corriger les biais du modèle régional Chimère. Certains organismes tels que l'INERIS travaillent déjà activement sur cette thématique [32] [33].

5.3.4. Modélisation pollinique

La modélisation pollinique est un axe d'études pour Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, qui considère que les données satellitaires sont d'un intérêt opérationnel. A ce jour, la détection de l'ambroisie est principalement réalisée de deux façons : une observation de terrain (méthode aérienne de recueil

des données) et un comptage pollinique (méthode terrestre dite de fluxage des pollens du sol). Avec les progrès technologiques de ces quinze dernières années, une troisième méthode, basée sur la télédétection spatiale, est possible ; elle a fait par ailleurs l'objet de publications [34] [35] [36] [37] [38]. Le principe repose sur l'identification de la longueur d'onde de la couleur de l'ambroisie ; ceci permet ensuite son identification par télédétection satellitaire. Ce mapping satellitaire de l'ambroisie doit ensuite pouvoir être comparé à l'une des deux principales méthodes de détection. Cependant, l'acquisition d'images satellites reste onéreuse. Des sociétés privées se sont emparées de ce créneau en offrant des services variés et très fins. Aussi, il convient pour Atmo Auvergne-Rhône-Alpes de se doter de moyens d'investigation ; ce serait alors une première pour Atmo-Auvergne-Rhône-Alpes et plus généralement pour les AASQA.

5.3.5. Couplage données satellitaires et intelligence artificielle pour produire des cartes de qualité de l'air

Il est envisageable d'exploiter les données satellites pour produire des cartes de qualité de l'air au sol en développant un algorithme. Ce dernier permettrait d'interpréter les images satellites et assimiler les champs de concentrations au sol. Il est possible d'utiliser l'intelligence artificielle pour développer l'algorithme basé sur un historique (lien mesures au sol – images satellites). L'exploitation d'images de poussières et/ou ozone pourraient constituer des cas d'applications.

6. Conclusion

Dans le cadre de cette étude, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes a évalué le potentiel d'exploitation opérationnelle de données satellites avec pour objectif de voir comment ces données peuvent venir enrichir l'observatoire régional. Le cas d'étude s'est porté sur le dioxyde d'azote et a permis de montrer qu'il était possible de passer d'une information brute à une information environnementale et opérationnelle de qualité de l'air. Au niveau national, c'est toute une filière qui se met en place. Les progrès technologiques permettent désormais à différents acteurs, publics ou privés, de proposer à des utilisateurs un large éventail de services, gratuits ou payants. L'engagement des Etats dans le secteur spatial devient un enjeu stratégique avec une réelle coopération à l'échelle européenne. La France prévoit une dotation conséquente dans ce secteur avec un volet incontournable dédié à l'observation de l'atmosphère. La littérature sur ce sujet, jadis timide, devient un gisement d'informations avec des cas concrets d'applications. La télédétection spatiale pour l'observation de l'atmosphère présente de nombreux avantages mais il subsiste encore des limites à son exploitation pour répondre aux enjeux de qualité de l'air au regard des missions confiées par la Région à Atmo Auvergne-Rhône-Alpes.

7. Perspectives

De nombreuses pistes de réflexions sont à l'étude pour approfondir davantage nos connaissances sur la télédétection spatiale avec pour axe prioritaire d'exploiter les données satellites comme outil complémentaire des données au sol afin de répondre aux exigences opérationnelles et aux besoins d'innovations des missions d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes.

Dans la présente étude, les données au sol du dioxyde d'azote sont exprimées en $\mu\text{g.m}^{-3}$ et concernent les premiers mètres au-dessus du sol. En revanche, les données satellitaires sont exprimées en molécules. cm^{-2} et concernent la colonne troposphérique. Une comparaison quantitative des données au sol et satellitaires n'est donc pas réaliste. Il faudrait pour cela pouvoir obtenir les valeurs satellitaires des concentrations du dioxyde d'azote dans une sous-couche de cette colonne troposphérique, c'est-à-dire la partie basse de la colonne troposphérique correspondant à celle du niveau du sol. Une des méthodologies qu'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes envisage est d'exploiter les données modélisées du dioxyde d'azote, aux heures du passage du satellite, pour en extraire la répartition du dioxyde d'azote en fonction de l'altitude, pour tous les points au-dessus de la région Auvergne-Rhône-Alpes. Cette répartition pourra ensuite être appliquée sur les données satellitaires afin de retrouver les concentrations du dioxyde d'azote en $\mu\text{g.m}^{-3}$ dans cette sous-couche troposphérique. En complément des données de surveillance au sol, les données satellitaires peuvent également être exploitées pour améliorer la modélisation de la qualité de l'air, les prévisions ou les cartographies. Pour cela, elles pourront être utilisées pour évaluer les modèles de chimie-transport tels que CHIMERE et être assimilées dans les calculs. D'autres pistes de réflexions sont envisagées et sont décrites dans le paragraphe 5.3.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] WHO, 2015. [En ligne]. Available: <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/fr/>.
- [2] «Air quality in Europe,» 2020.
- [3] «Applisat,» 2018. [En ligne]. Available: <https://www.applisat.fr/plan-applications-satellitaires-2018>.
- [4] «Réseau Scientifique Technique,» [En ligne]. Available: <http://www.rst.developpement-durable.gouv.fr/>.
- [5] «Bureau des affaires spatiales de l'ONU,» [En ligne]. Available: <https://www.unov.org/unov/fr/unoosa.html>.
- [6] e. a. J.P. Veefkind, «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 Sens. Environ.*, vol. 120, pp. 70-83, 2012.
- [7] «EUMETSAT,» [En ligne]. Available: <https://www.eumetsat.int/>.
- [8] «ECMWF/CAMS, 2020-1: Flawed estimates of the effects of lockdown measures on air quality derived from satellite observations, Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) News,» Mars 2020. [En ligne].
- [9] 2020. [En ligne]. Available: <https://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>.
- [10] A. R. J.-P. B. A. Hilboll, «Long-term changes of tropospheric NO₂ over megacities derive from multiple satellite instruments,» *Atmos Chem Phys.*, vol. 6913:41, p. 45, 2013.
- [11] D. G. e. al., «High-resolution mapping of nitrogen dioxide with TROPOMI: first results and validation over the Canadian oil sands,» *Geophys Res Lett.*, vol. 46, p. 1049-60, 2019.
- [12] M. Bauwens et al., «Impact of Coronavirus Outbreak on NO₂ Pollution Assessed Using TROPOMI and OMI Observations,» *Geophysical Research Letters*, 2020.
- [13] M. Vîrghileanu et al., «Nitrogen Dioxide (NO₂) Pollution Monitoring with Sentinel-5P Satellite Imagery over Europe during the Coronavirus Pandemic Outbreak,» *Remote Sens.*, 2020.
- [14] [En ligne]. Available: <https://www.ineris.fr/fr/ineris/actualites/confinement-qualite-air-pollution-dioxyde-azote-baisse-plus-grandess villes>.
- [15] P. Prunet et al. , «Analysis of the NO₂ tropospheric product from S5P TROPOMI for monitoring pollution at city scale,» *City and Environment Interactions*, vol. 8, p. 100051, 2020.
- [16] [En ligne]. Available: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p>.
- [17] J. V. e. al., «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 Sens Environ.*, vol. 120, pp. 70-83, 2012.
- [18] «Open Access Hub Copernicus,» [En ligne]. Available: <https://scihub.copernicus.eu/>.
- [19] «Librairie SentinelSat,» [En ligne]. Available: <https://github.com/sentinelsat/sentinelsat>.
- [20] «Données de niveaux,» [En ligne]. Available: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p/data-products>.
- [21] H. OMRANI et al., «Spatio-temporal data on the air pollutant nitrogen dioxide derived from Sentinel satellite for France,» vol. 28, p. 105089, 2020.

- [22 «CLS,» [En ligne]. Available: <https://www.cls.fr/le-groupe/>.
]
- [23 NEREUS. [En ligne]. Available: <https://www.nereus-regions.eu/>.
]
- [24 Copernicus4regions, «The ever growing use of Copernicus across Europe's regions : a selection of 99 user stories by local and regional authorities,» 2018.
- [25 «DATA TERRA,» [En ligne]. Available: <https://www.data-terra.org/>.
]
- [26 «Centre Spatial Universitaire de Grenoble,» [En ligne]. Available: <https://www.csug.fr/>.
]
- [27 A. Auvergne-Rhône-Alpes, «Eléments d'estimation de l'impact de la méthanisation sur la qualité de l'air en Auvergne-Rhône-Alpes,» 2019.
- [28 «GHGSat,» [En ligne]. Available: <https://www.ghgsat.com/en/who-we-are/>.
]
- [29 «GHGSat - Pulse,» [En ligne]. Available: <https://pulse.ghgsat.com/>.
]
- [30 «Bluefield Technologies,» [En ligne]. Available: <https://bluefield.co/press/>.
]
- [31 «Environmental defence Fund,» [En ligne]. Available: <https://www.edf.org/climate/how-methanesat-is-different>.
- [32 A. U. L. R. Frédéric Meleux, «Modélisation et surveillance de la qualité de l'air : de nouvelles données d'observation pour l'amélioration des modèles.,» Rapport Scientifique INERIS, 2009.
- [33 INERIS, «Contrat d'objectifs et de performances, 2021-2025».
]
- [34 L. W. LASS et al., *A review of remote sensing of invasive weeds and example of the early detection of spotted knapweed (*Centaurea maculosa*) and babysbreath (*Gypsophila paniculata*) with a hyperspectral sensor*, Cambridge University Press, 2017.
- [35 T. Stohlgren et al., «Species Forecasting System: A Decision Support Tool for the U.S. Geological Survey: FY 2005 Benchmarking Report v.1.6,» NASA, 2005.
- [36 S. ALLEAUME et al., «Capacités et limites de la télédétection pour cartographier les habitats naturels,» IRSTEA, 2013.
- [37 Y. AUDA et al., «Détection des plantes envahissantes par télédétection : un cas d'étude, l'ambroisie en région Rhône-Alpes, France,» *International Journal of Remote Sensing*, vol. 29, pp. 1109-1124, 2008.
- [38 R. DEVADAS et al., «Dynamic ecological observations from satellites inform aerobiology of allergenic grass pollen,» *Science of The Total Environment*, vol. 633, pp. 441-451, 2018.
- [39 «Space Climate Observatory,» [En ligne]. Available: <https://www.spaceclimateobservatory.org/fr/about-sco>.
- [40 U. Nations, «Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development,» 2015.
]
- [41 [En ligne]. Available: <https://earthobservations.org/geoss.php>.
]
- [42 [En ligne]. Available:
] https://www.esa.int/About_Us/Ministerial_Council_2012/Global_Monitoring_for_Environment_and_Security_GMES.
- [43 [En ligne]. Available: <https://atmosphere.copernicus.eu/>.
]
- [44 [En ligne]. Available: <https://www.copernicus.eu/fr/propos-de-copernicus/infrastructure/dcouvrez-nos-satellites>.

- [45] [En ligne]. Available: <https://www.sentinel-hub.com/>.
-]
- [46] M. Van Damme et al., «Industrial and agricultural ammonia point sources exposed.,» *NAture*, 2018.
-]
- [47] «Plateforme thématique ESA,» [En ligne]. Available: <https://www.plateforme-esa.fr/plateforme-esa-missions-et-organisation>.