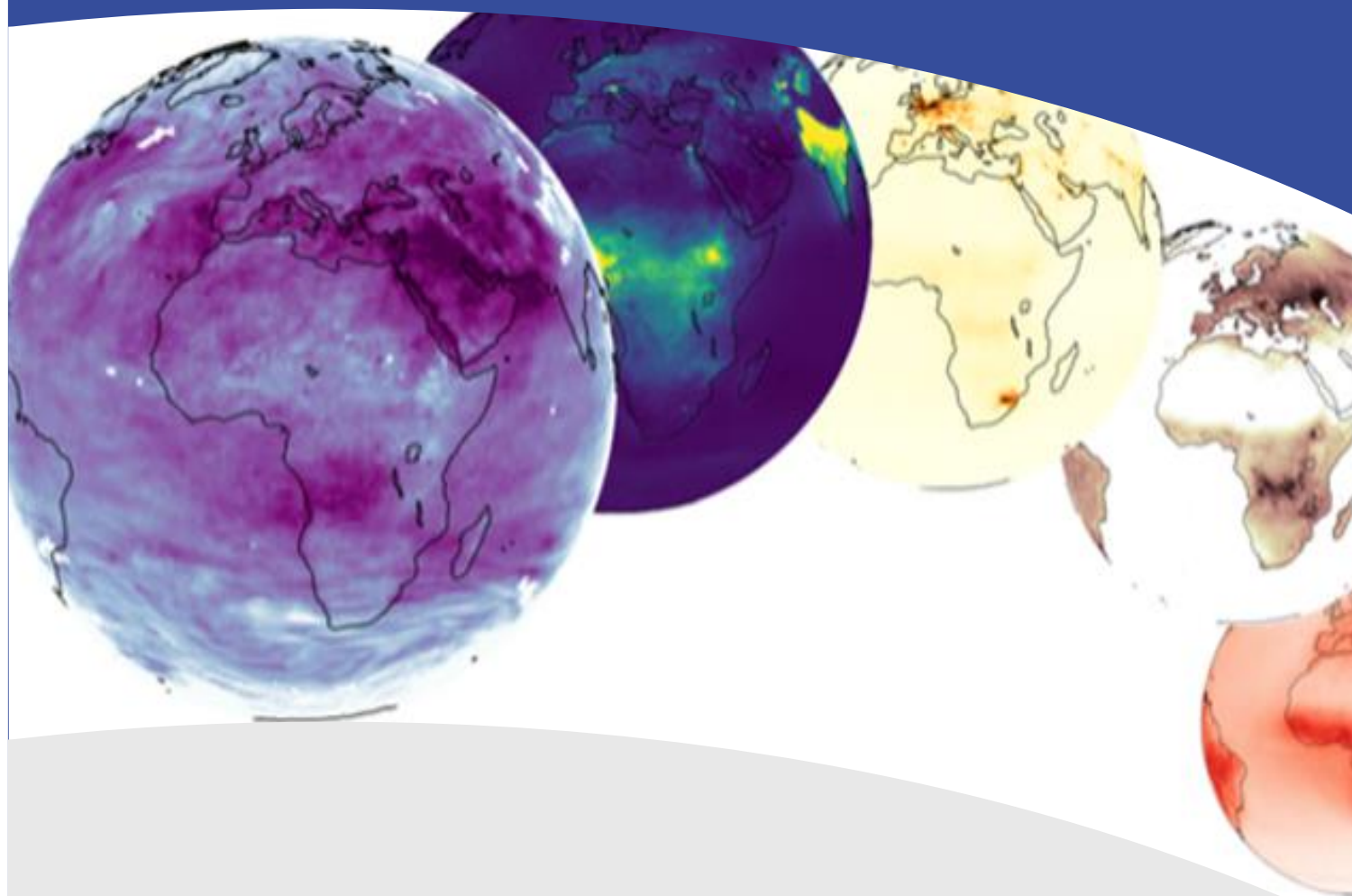


Emissions des feux de forêt

Apport des données satellitaires dans l'estimation et la modélisation des émissions de feux de forêt

2025



Diffusion : 2025

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 (2024) **Emissions des feux de forêt : Apport des données satellitaires dans l'estimation et la modélisation des feux de forêt.**

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

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

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

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

Remerciements

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes remercie Solène Turquety et Laurent Menut de l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) pour la mise à disposition du modèle APIFLAMEv2 permettant le calcul des émissions de gaz traces et d'aérosols provenant de la combustion de biomasse. Atmo Auvergne-Rhône-Alpes remercie l'IPSL-CMC pour la fourniture des données et le centre de données ESPRI/IPSL pour son aide à l'accès des données : <https://doi.org/10.14768/20190913001.1> (dernier accès le 17/06/2025).

Les données satellites de surfaces brûlées combinées Terra et Aqua MCD64A1 (MODIS) sont accessibles sur la plateforme NASA Earthdata (après Login sur la plateforme) : <https://e4ftl01.cr.usgs.gov/MOTA/MCD64A1.061/> (dernier accès le 17/06/2025).

Les données journalières d'anomalies thermiques produites par les satellites Terra MOD14A1 et Aqua MYD14A1 (MODIS) sont accessibles sur la plateforme NASA Earthdata (après Login sur la plateforme) : <https://e4ftl01.cr.usgs.gov/MOLT/MOD14A1.061/> (pour Terra) et <https://e4ftl01.cr.usgs.gov/MOLA/MYD14A1.061/> (pour Aqua) (dernier accès le 17/06/2025).

Les données annuelles de type de couverture terrestre combinées Terra et Aqua MCD12Q1 (MODIS) sont accessibles sur la plateforme NASA Earthdata (après Login sur la plateforme) : <https://e4ftl01.cr.usgs.gov/MOTA/MCD12Q1.061/> (dernier accès le 17/06/2025).

Les données annuelles Vegetation Continuous Fields MOD44B (MODIS) sont accessibles sur la plateforme NASA Earthdata (après Login sur la plateforme) : <https://e4ftl01.cr.usgs.gov/MOLT/MOD44B.061/> (dernier accès le 17/06/2025).

Les données de Fire Radiative Power – Pixel sont disponibles sur la plateforme du LSA SAF : <https://lsa-saf.eumetsat.int/en/data/products/fire-products/> (dernier accès le 17/06/2025).

Financement

Cette étude a été rendue possible grâce au cofinancement de la Région Auvergne-Rhône-Alpes et Atmo Auvergne-Rhône-Alpes :



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

Résumé

Les capteurs satellites permettent d'exploiter la composition chimique de l'atmosphère et les caractéristiques du sol ou de la végétation. Depuis 2021, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes (Atmo AuRA) utilise ces données pour compléter son expertise basée sur les mesures au sol et la modélisation des polluants de l'air. Après s'être focalisée sur l'estimation du dioxyde d'azote (NO_2), de l'ammoniac (NH_3), du méthane (CH_4) et de l'ozone (O_3), l'association concentre en 2024 ses travaux sur la détection des feux de forêts et l'évaluation des émissions de polluants associées. L'objectif est d'améliorer la surveillance de la pollution de l'air dans la région Auvergne-Rhône-Alpes (AuRA) en prenant en compte l'impact de ces événements.

Dans le contexte de changement climatique, les événements extrêmes comme les incendies deviennent plus fréquents. Selon la base de données EFFIS du programme Copernicus, le nombre de feux de forêt en France recensé sur la période 2019-2022 est multiplié par 10 par rapport à la période 2006-2018. La surface brûlée est multipliée par un facteur de 7 sur les mêmes périodes. L'année 2022 a été particulièrement remarquable en France avec 291 départs de feux pour une surface brûlée proche de 70000 ha dont environ 30000 ha sont attribués aux grands incendies en région Nouvelle-Aquitaine. La région AuRA a été particulièrement exposée cette année avec 6 incendies recensés ayant parcourus une superficie supérieure à 100 ha.

Ces incendies contribuent à injecter de grandes quantités de substances chimiques nocives pour la santé et l'environnement en suspension dans l'atmosphère comme le dioxyde de carbone (CO_2) ou les particules fines comme les $\text{PM}_{2.5}$ ou PM_{10} . Ces émissions sont ensuite transportées, et déposées sur de longues distances et peuvent ainsi affecter des populations éloignées des sources d'émissions.

Dans cette étude, la prise en compte des émissions de feux de forêt est basée sur l'intégration d'APIFLAME, un module d'estimation des émissions des feux de forêt, au modèle de Chimie-Dispersion CHIMERE. APIFLAME prend en compte les données issues des capteurs satellites MODIS ou SEVIRI qui détectent les sources de chaleur attribuées aux incendies ou encore les données de couverture végétale comme le Corine Land Cover (CLC) ou les données issues du capteur MODIS. Plusieurs tests sont présentés pour comparer la contribution de ces données sur la modélisation des émissions de polluants sur la région AuRA.

Les tests effectués dans cette étude montrent que les émissions de polluants issues des incendies détectés par satellite dépendent du type de données de végétation. Il est également observé que les feux de forêt sont responsables d'une forte augmentation en particules fines à proximité des sources. De plus, la prise en compte des feux de forêt montre également une altération non négligeable de la qualité de l'air sur des centaines de kilomètres autour des sources émettrices. L'intégration d'APIFLAME permet ainsi de mieux caractériser ces impacts et ouvre la voie à l'utilisation opérationnelle par Atmo AuRA pour la prévision et la cartographie des épisodes de feux. À court terme, le module peut être mobilisé pour l'analyse rétrospective des événements marquants et, sous certaines conditions, pour améliorer les prévisions opérationnelles avec les données satellites SEVIRI.

Sommaire

1. Contexte et introduction	9
1.1. Contexte	9
1.2. Objectifs	10
2. APIFLAME : fonctionnement général	12
2.1. Les données d'entrées	13
2.1.1. Les anomalies thermiques	13
2.1.2. Les surfaces brûlées	13
2.1.3. Les types de végétation et d'occupation du sol.....	13
2.1.4. La densité de biomasse et consommation de carburant	13
2.1.5. Facteurs d'émissions	14
2.2. Traitement et fonctionnement du module.....	14
3. Choix de l'étude de cas	15
3.1. Contexte général du choix	15
3.2. Analyse des masses d'air	16
3.3. Réseau de mesure et observations.....	17
4. Modélisation des incendies avec APIFLAME	20
4.1. Configuration de la modélisation de référence.....	20
4.2. Intégration du module APIFLAME dans la chaîne de modélisation	21
4.3. Configuration des tests de sensibilité	22
5. Résultats.....	24
5.1. Cas de référence	24
5.2. Test n°1 : mise en place du module APIFLAME	24
5.3. Test n°2 : changement de données de végétation de MODIS à CLC	26
5.4. Test n°3 : intégration des données SEVIRI	27
6. Discussion	30
7. Conclusion et perspectives	33

Illustrations

Figure 1 - Statistiques annuelles de la surface brûlée (en hectares en rouge) par les incendies et du nombre d'incendies (en bleu) en France de 2006 à 2025 (EFFIS : https://forest-fire.emergency.copernicus.eu/apps/effis.statistics/estimates , accessible le 17/06/2025).	9
Figure 2 - Nombre de feux de forêt et surfaces parcourues par les feux (2000 à 2024) en Auvergne Rhône Alpes (BDIFF : https://bdiff.agriculture.gouv.fr/ , accessible le 17/06/2025).	10
Figure 3 - Représentation schématique du module APIFLAME (Turquety et al., 2014).	12
Figure 4 - Capture d'écran du site Worldview le 07/08/2022. Les capteurs MODIS à bord des satellites Terra et Aqua sont utilisés pour faire ressortir les anomalies thermiques au sol (points rouges). La réflectance du sol est issue du capteur VIIRS du satellite NOAA-20.	16
Figure 5 - Trajectoires des masses d'air simulées par le modèle HYSPLIT le 07/05/2022. Le modèle de dispersion est forcé par le modèle de météorologique GFS.	17
Figure 6 - Localisation des stations fixes (triangles bleus) et micro-capteurs (points rouges) de mesures des PM2.5 du réseau d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes sur l'agglomération grenobloise. L'étoile noire représente la localisation de l'incendie de Voreppe.	18
Figure 7 - Concentrations en PM2.5 mesurées sur la journée du 08/08/2022 par les micro-capteurs de l'agglomération grenobloise.	19
Figure 8 - Schéma fonctionnel des modules et modèles liés au modèle CHIMERE.	20
Figure 9 - Configuration des domaines emboîtés de calcul WRF et CHIMERE.	21
Figure 10 - Schéma fonctionnel de l'intégration du module APIFLAME lié au modèle CHIMERE.	22
Figure 11 - Evolution horaire des valeurs de concentration en PM2.5 ($\mu\text{g.m}^{-3}$) à la station des Frênes (Grenoble). La courbe bleue correspond aux mesures et la courbe orange à la simulation Reference_sans_APIFLAME. Les barres verticales représentent le début et la fin de l'incendie de Voreppe.	24
Figure 12 - Localisation des émissions de polluants liées aux incendies entre le 1 ^{er} et le 21 août 2022 identifiées par APIFLAME à partir des données MODIS de détection de feux. Les valeurs représentent de la somme des émissions sur toutes les altitudes et sur toute la période est représentée en molécules.cm ⁻² .s ⁻¹	25
Figure 13 - Evolution horaire des valeurs de concentration en PM2.5 ($\mu\text{g.m}^{-3}$) à la station des Frênes (Grenoble). La courbe bleue correspond aux mesures, la courbe orange à la simulation Reference_sans_APIFLAME et la courbe verte à la simulation Test_APIFLAME_fire_MODIS_veg_MODIS. Les barres verticales représentent le début et la fin de l'incendie de Voreppe.	25
Figure 14 - Différence de concentrations en PM2.5 entre la simulation Test_APIFLAME_fire_MODIS_veg_CLC et la simulation Reference_sans_APIFLAME le 07/08/2022 à 12:00 UTC au niveau de la surface.	26
Figure 15 - Evolution horaire des valeurs de concentration en PM2.5 ($\mu\text{g.m}^{-3}$) à la station des Frênes (Grenoble). La courbe bleue correspond aux mesures, la courbe orange à la simulation Reference_sans_APIFLAME et la courbe verte à la simulation Test_APIFLAME_fire_MODIS_veg_CLC. Les barres verticales représentent le début et la fin de l'incendie de Voreppe.	27
Figure 16 - Différence de concentrations en PM2.5 entre la simulation Test_APIFLAME_fire_SEVIRI_veg_CLC et la simulation Reference_sans_APIFLAME le 07/08/2022 à 12:00 UTC au niveau de la surface.	28
Figure 17 - Evolution horaire des valeurs de concentration en PM2.5 ($\mu\text{g.m}^{-3}$) à la station des Frênes (Grenoble). La courbe bleue correspond aux mesures, la courbe orange à la simulation	

Reference_sans_APIFLAME et la courbe verte à la simulation Test_APIFLAME_fire_SEVIRI_veg_CLC. Les barres verticales représentent le début et la fin de l'incendie de Voreppe.....	29
Figure 18 - Evolution horaire des émissions totales de polluants à la source de l'incendie, toutes altitudes confondues. La simulation Test_APIFLAME_fire_MODIS_veg_MODIS est représentée en vert, la simulation Test_APIFLAME_fire_MODIS_veg_CLC en orange et Test_APIFLAME_fire_SEVIRI_veg_CLC en bleu.	30
Figure 19 - Différence de concentrations en PM2.5 entre la simulation CHIMERE-APIFLAME modifiée avec l'utilisation des données de détection des anomalies thermiques SEVIRI et avec la végétation CLC et la simulation de référence sans APIFLAME le 14/08/2022 à 05:00 UTC au niveau de la surface. L'étoile blanche représente l'incendie de Massegros.	31
Figure 20 - Evolution horaire des valeurs de concentration en PM2.5 ($\mu\text{g.m}^{-3}$) à la station de Rageade (Cantal). La courbe bleue correspond aux mesures, la courbe orange à la simulation Test_APIFLAME_fire_MODIS_veg_CLC et la courbe verte à la simulation Test_APIFLAME_fire_SEVIRI_veg_CLC. Les barres verticales représentent le début et la fin de l'incendie de Massegros Causses Gorges.	32
Figure 21 - Evolution horaire des valeurs moyennes de concentration en PM2.5 ($\mu\text{g.m}^{-3}$) aux micro-capteurs de Varcès, Seyssinet et Noyarey. La courbe bleue correspond aux mesures, la courbe orange à la simulation Reference_sans_APIFLAME et la courbe verte à la simulation Test_APIFLAME_fire_MODIS_veg_MODIS. Les barres verticales représentent le début et la fin de l'incendie de Voreppe.....	35
Figure 22 - Evolution horaire des valeurs moyennes de concentration en PM2.5 ($\mu\text{g.m}^{-3}$) aux micro-capteurs de Varcès, Seyssinet et Noyarey. La courbe bleue correspond aux mesures, la courbe orange à la simulation Reference_sans_APIFLAME et la courbe verte à la simulation Test_APIFLAME_fire_MODIS_veg_CLC. Les barres verticales représentent le début et la fin de l'incendie de Voreppe.....	35
Figure 23 - Evolution horaire des valeurs moyennes de concentration en PM2.5 ($\mu\text{g.m}^{-3}$) aux micro-capteurs de Varcès, Seyssinet et Noyarey. La courbe bleue correspond aux mesures, la courbe orange à la simulation Reference_sans_APIFLAME et la courbe verte à la simulation Test_APIFLAME_fire_SEVIRI_veg_CLC. Les barres verticales représentent le début et la fin de l'incendie de Voreppe.....	36

1. Contexte et introduction

1.1. Contexte

Ces dernières années, les incendies de végétation se sont intensifiés en France, tant en fréquence qu'en superficie brûlée. Selon le Système européen d'information sur les feux de forêt (EFFIS¹), le nombre de feux a été multiplié par 10 entre 2006–2018 et 2019–2022, tandis que les surfaces brûlées ont été multipliées par 7. L'année 2022 constitue un point culminant avec 290 feux recensés et plus de 66 000 hectares brûlés, soit la plus grande superficie annuelle depuis 2006 (figure 1).

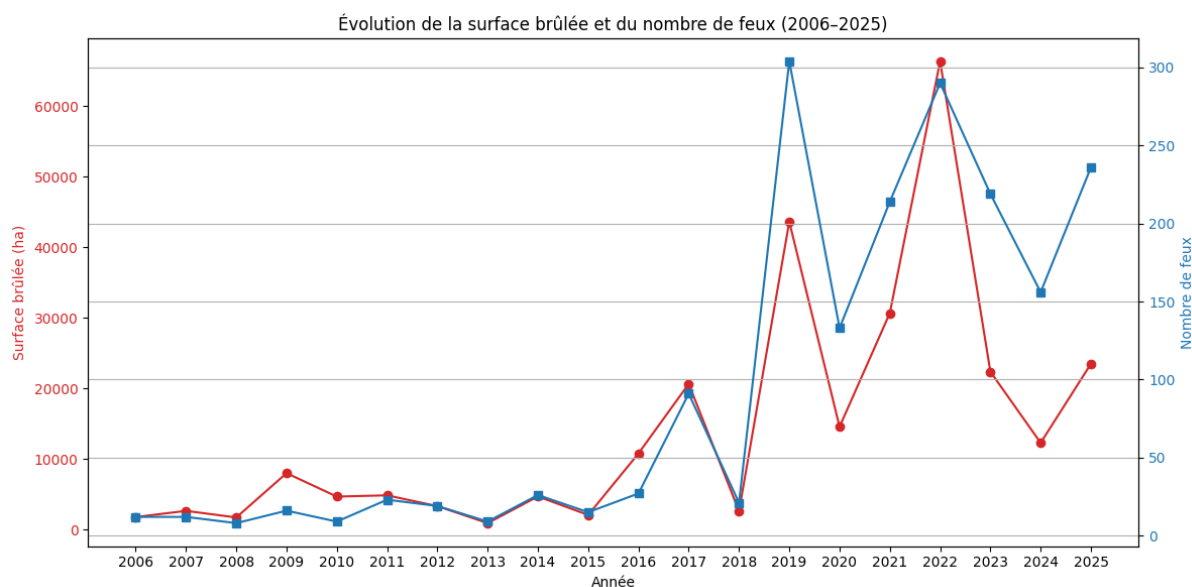


Figure 1 - Statistiques annuelles de la surface brûlée (en hectares en rouge) par les incendies et du nombre d'incendies (en bleu) en France de 2006 à 2025 (EFFIS : <https://forest-fire.emergency.copernicus.eu/apps/effis.statistics/estimates>, accessible le 17/06/2025).

La Base de Données sur les Incendies de Forêts en France (BDIFF²) recense les incendies par communes depuis 2006. Selon l'Agence Régionale de la Biodiversité Nouvelle-Aquitaine (ARB³), les incendies dans la région Auvergne-Rhône-Alpes (AuRA) sont responsables de près de la moitié des surfaces brûlées en France sur l'année 2022 (31 310 hectares). De plus, il est estimé que 90 % de la superficie brûlée en Nouvelle-Aquitaine est due aux incendies sur les seules communes de Landiras, la Teste-de-Buch, Saumos et Arès. Sur la région AuRA, environ 200 incendies de végétation se déclenchent en moyenne sur par an (figure 2).

Au-delà des dégâts environnementaux et matériels, les feux de forêt constituent une source importante d'émissions atmosphériques. Ils émettent des aérosols (PM10, PM2.5) ainsi que des gaz comme le monoxyde de carbone (CO) et le dioxyde de carbone (CO₂), qui affectent la qualité de l'air sur de longues distances. Ces substances, présentes dans les fumées sont à l'origine d'impacts importants sur la santé, notamment des effets néfastes sur les systèmes cardiovasculaires et respiratoires (Osswald et al., 2023). L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) fournit des directives sur la qualité de l'air en situation d'incendie afin de protéger la population (OMS, 1999).

¹ <https://forest-fire.emergency.copernicus.eu/apps/effis.statistics/>

² <https://bdiff.agriculture.gouv.fr/>

³ https://www.biodiversite-nouvelle-aquitaine.fr/wp-content/uploads/2023/07/Indicateur_2023_Surface-incendie_VF.pdf

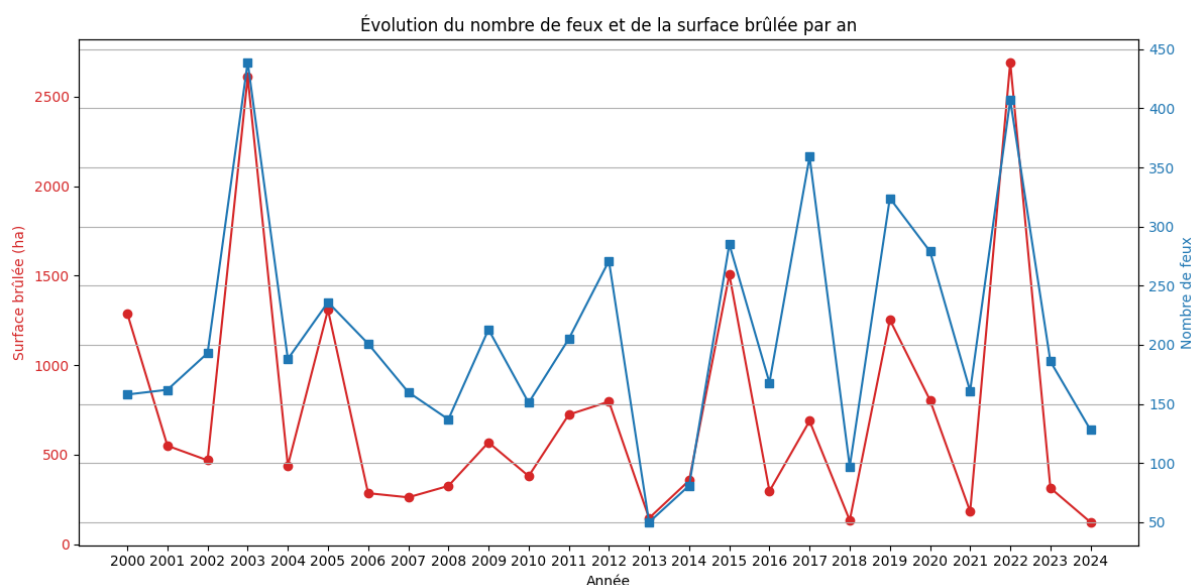


Figure 2 - Nombre de feux de forêt et surfaces parcourues par les feux (2000 à 2024) en Auvergne Rhône Alpes (BDIFF : <https://bdiff.agriculture.gouv.fr/>, accessible le 17/06/2025).

Les émissions des incendies sont brèves à l'échelle annuelle mais intenses à l'échelle journalière et jouent un rôle majeur dans la variabilité intra-annuelle de la composition atmosphérique de fond (Monks et al., 2012). En effet, les incendies libèrent dans l'atmosphère ces gaz à effet de serre qui participent au réchauffement climatique. Ce réchauffement, en retour, favorise la survenue de nouveaux incendies en augmentant la température, en réduisant l'humidité et en asséchant les sols.

Dans ce contexte, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes (**Atmo AuRA**) cherche à mieux intégrer l'impact des feux de forêt dans ses outils de prévision et de cartographie de la qualité de l'air, en s'appuyant notamment sur les données satellites.

1.2. Objectifs

L'objectif principal de cette étude est de mettre en place un module "feux de forêt" dans les outils de modélisation atmosphérique d'Atmo AuRA, afin d'améliorer les prévisions et l'analyse des épisodes de pollution liés aux incendies. Ce module s'appuie notamment sur des données satellitaires pour estimer les quantités d'émissions et localiser les feux de végétation. Dans ce cadre, l'étude poursuit les objectifs suivants :

- Quantifier les émissions atmosphériques issues des incendies de végétation, à l'échelle régionale, en utilisant des observations satellitaires ;
- Intégrer ces émissions dans un modèle de chimie-transport (CHIMERE) pour simuler leur impact sur la composition de l'atmosphère ;
- Renforcer les outils de prévision et de cartographie d'Atmo AuRA en tenant compte de cette source d'émissions, aujourd'hui croissante dans un contexte de changement climatique.

Pour ce faire, plusieurs modules d'estimation des émissions liées aux feux sont disponibles dans la littérature. Chacun repose sur des approches différentes, en particulier sur l'utilisation de la surface brûlée (AB) ou de la puissance radiative des incendies (FRP), un indicateur direct de l'intensité des incendies.

Parmi les modules existants, on peut citer : FINN (Wiedinmyer et al., 2011 ; 2023), GFED (van der Werf et al., 2017 ; Chen et al., 2023), GFAS (Kaiser et al., 2012), FEER (Ichoku & Ellison, 2014) et APIFLAME (Turquety et al., 2014 ; Turquety et al., 2020), développé pour la modélisation régionale en Europe.

Dans cette étude, le module APIFLAME a été retenu, car il combine des données satellites (MODIS, SEVIRI) avec des cartes de végétation et des inventaires de biomasse, pour produire des émissions compatibles avec les modèles régionaux comme CHIMERE. Cette approche s'inscrit dans les efforts d'Atmo AuRA visant à mieux intégrer les données satellitaires et les connaissances sur l'usage des sols dans la modélisation atmosphérique régionale.

Afin d'atteindre ces objectifs, l'étude s'organise autour de plusieurs étapes clés : après avoir présenté le contexte et les objectifs, elle décrit le fonctionnement général du module APIFLAME ainsi que les données d'entrée mobilisées. Un cas d'étude représentatif est ensuite sélectionné dans la région AuRA. Le module est intégré dans la chaîne de modélisation CHIMERE, avec une configuration de référence et des tests de sensibilité permettant d'évaluer l'influence de différents paramètres. Les résultats obtenus sont analysés et comparés, avant d'ouvrir sur une discussion des limites et perspectives, en lien avec l'amélioration des outils de prévision régionaux.

2. APIFLAME : fonctionnement général

Atmo AuRA exploite le modèle de chimie-transport atmosphérique CHIMERE (Menut et al., 2013 ; Mailler et al., 2016) dans le cadre de ses missions de surveillance et de prévision de la qualité de l'air. Ce modèle, développé par des laboratoires français (INERIS, LMD et LISA), est utilisé quotidiennement par Atmo AuRA pour simuler la composition de l'atmosphère sur le territoire régional. Il permet de représenter les niveaux de polluants majeurs (PM_{2.5}, PM₁₀, CO, O₃...), d'évaluer l'impact des différentes sources d'émissions (trafic, résidentiel, agriculture, etc.) et d'anticiper les épisodes de pollution. L'ajout d'un module dédié à l'estimation des émissions de polluants des feux de forêt, comme APIFLAME, s'inscrit dans la continuité de cet usage. Cette action vise à enrichir le modèle avec une source d'émissions encore peu représentée mais significative à l'échelle régionale.

Le module APIFLAME (Turquety et al., 2014 ; Turquety et al., 2020) est un modèle d'estimation des émissions de polluants issus des feux de forêt basé sur l'utilisation des observations satellitaires. Ce module peut être employé avec le modèle de chimie et transport atmosphérique CHIMERE mais aussi avec d'autres modèles. Pour calculer des émissions liées aux incendies, APIFLAME a besoin de données d'entrées (figure 3) telles que :

- Les anomalies thermiques (FRP),
- Les surfaces brûlées (AB),
- Les types de végétation et d'occupation des sols,
- La densité de biomasse,
- Les facteurs d'émissions (quantité moyenne d'un polluant émise par unité de masse de matière brûlée).

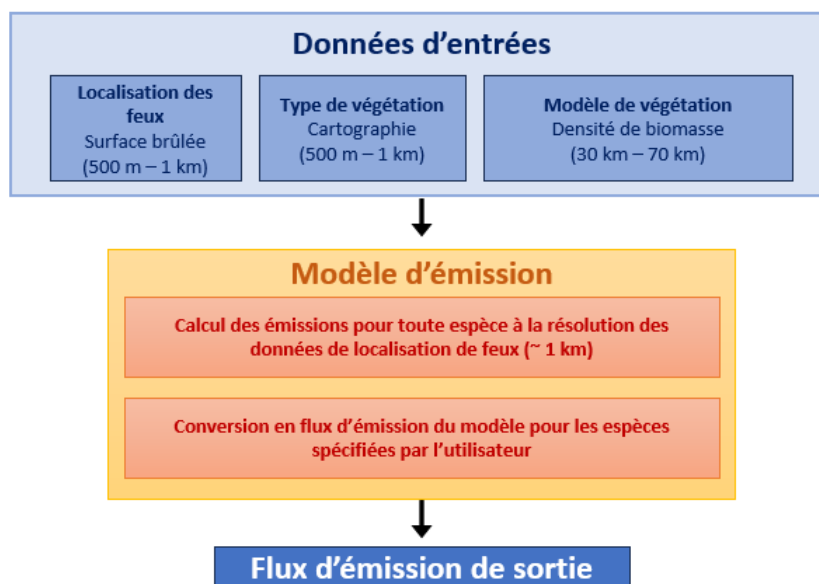


Figure 3 - Représentation schématique du module APIFLAME (Turquety et al., 2014).

Les incendies sont détectés à partir des coordonnées géographiques des anomalies thermiques observées par des capteurs satellitaires comme MODIS ou SEVIRI. Un traitement préalable permet de filtrer ces anomalies afin d'écarter les sources de chaleur non liées aux feux de végétation, comme les torchères industrielles, certaines activités anthropiques ou encore des sources naturelles récurrentes comme les volcans. Pour les points restants, la puissance radiative du feu (FRP) est utilisée comme indicateur de

l'intensité de l'incendie. Si cette valeur dépasse un seuil critique, le point est considéré comme un feu actif.

Le type de couverture végétale présent sur la zone est ensuite déterminé à partir de cartes de végétation, fournies par la base de données Corine Land Cover (CLC) ou même le capteur satellite MODIS. Cela permet également d'évaluer la biomasse disponible. A partir de ces données d'anomalies thermiques, type de végétation et de biomasse, le module estime la biomasse consommée par l'incendie.

Ensuite les émissions de polluants sont calculées en appliquant de facteurs d'émissions spécifiques à chaque type de végétation, pour une liste d'espèces chimiques. Enfin, les émissions calculées sont réparties spatialement sur la grille du modèle (par interpolation) et enregistrées sous forme de fichiers d'entrée compatibles avec le modèle CHIMERE, avec un fichier dédié pour chaque espèce émise.

2.1. Les données d'entrées

2.1.1. Les anomalies thermiques

Les anomalies thermiques utilisées par APIFLAME proviennent de la base de données satellite MOD14, dérivée des observations infrarouges du capteur MODIS à bord des satellites Terra et Aqua (données accessibles : https://lpdaac.usgs.gov/product_search/, dernier accès le 17/06/2025). Ce produit fournit quotidiennement, avec une résolution de 1 km x 1 km, la localisation des points chauds et une estimation de la puissance radiative des feux (Giglio et al., 2006).

2.1.2. Les surfaces brûlées

L'estimation de la surface brûlée repose sur la détection des modifications de réflectance associées aux changements d'état de la végétation après un incendie. La base de données satellite MCD64A1 (Giglio et al., 2010) fournit mensuellement l'aire brûlée ainsi que les dates de début et de fin de l'évènement. Ce produit n'est pas disponible en temps réel.

2.1.3. Les types de végétation et d'occupation du sol

APIFLAME peut s'appuyer sur différentes sources pour caractériser le type de végétation dans les zones incendiées :

- La base données CORINE Land Cover (CLC) donne une classification homogène de l'occupation des sols à l'échelle européenne, retraitée à partir des observations satellites. Elle couvre 44 classes (forêts, zones agricoles, milieux urbains...) avec une résolution de 250 m x 250 m.
- La base de données satellite MCD12Q1 offre des classes de couverture du sol à 500 m x 500 m de résolution spatiale à l'échelle mondiale.
- La base de données MOD44B fournit une représentation des fractions de couverture (pourcentage d'arbres, de végétation non arborée et sol nu) à une résolution de 250 m x 250 m à l'échelle mondiale.

2.1.4. La densité de biomasse et consommation de carburant

APIFLAME s'appuie sur le modèle ORCHIDEE (Maignan et al., 2011), qui simule les échanges surface-atmosphère, le cycle du carbone continental et la dynamique végétale, pour fournir des données de biomasse selon les types de végétation (PFT) fournis précédemment. Ces données permettent d'estimer la fraction de biomasse disponible à la combustion, en tenant compte des structures de carbone (litières, bois, feuilles...) et du stress hydrique de la végétation. La quantité de biomasse consommé lors d'un incendie dépend de la surface brûlée, de la biomasse disponible et de la fraction de combustible. La consommation de combustible fournie par van Leeuwen et al. (2014) est utilisée et

fait partie des bases de données archivées dans le code source d'APIFLAME.

2.1.5. Facteurs d'émissions

Les facteurs d'émissions utilisés dans APIFLAME proviennent principalement des travaux de Akagi et al. (2011), avec des mises à jour issues de Yokelson et al. (2013) intégrées dans la version 2 du module. Ces facteurs traduisent la quantité moyenne de chaque polluant émis par unité de masse de biomasse brûlée. Dans APIFLAME, ils sont attribués en fonction du type de végétation et de la catégorie d'incendie identifiée et représentent une valeur moyenne intégrant les différentes phases de combustion. Les facteurs d'émissions utilisés sont détaillés dans les annexes des travaux de Turquety et al. (2020).

2.2. Traitement et fonctionnement du module

APIFLAME traite les différentes données d'entrées pour calculer des émissions de polluants liées aux incendies. Parmi ces traitements, il existe plusieurs traitements spécifiques des anomalies thermiques issue des données satellites.

- Les données satellites d'anomalies thermiques ayant un indice de qualité > 8 sont retenues (Turquety et al., 2020).
- Un filtre est appliqué pour la détection des anomalies thermiques en fonction du type d'occupation du sol où une fausse détection est déclenchée si le sol est peu végétalisé ou urbain. En effet, APIFLAME ne prend pas en compte les incendies localisés dans les zones urbaines (bâtiments, infrastructures artificielles...).
- Une fausse détection est considérée si la fraction urbaine est plus grande que 20 %.
- Une fausse détection est activée si le feu est localisé à moins de 1 km d'un site industriel répertorié dans la base de données European Pollutant Release Register.
- Une fausse détection est présumée si l'analyse statistique sur le produit des feux actifs de MODIS (à la résolution de 10 km) sur les 10 années qui ont précédé l'étude de Turquety et al. (2014) montre une fréquence irréaliste des incendies tout au long de l'année (brûlant à partir de 40% des jours).

Après traitement des données pour éliminer les fausses détections et s'assurer de la bonne qualité des données. Les émissions E_i pour une espèce chimique i sont calculées de la manière suivante (détails dans les travaux de Turquety et al. (2020)) ainsi :

$$E_i = A \sum_{v=1}^{veg\ types} f_v F_v \epsilon_{v,i} \quad (1)$$

Où :

- A : aire de la surface brûlée (m^2),
- f_v : fraction de surface pour un type de végétation,
- F_v : biomasse consommée pour ce même type de végétation,
- $\epsilon_{v,i}$: facteur d'émission pour une végétation v .

Le type de végétation est attribué pour chaque feu avant d'être regrillé sur une autre maille spécifiée permettant de faire des calculs à haute résolution qui maintiennent la variabilité des ensembles de données de végétation et de feux. Ces émissions seront ensuite converties en fichiers netcdf dans l'objectif de devenir les données d'entrées du modèle CHIMERE.

3. Choix de l'étude de cas

3.1. Contexte général du choix

Le choix d'un cas d'étude pour tester le module APIFLAME dans la région Auvergne-Rhône-Alpes repose sur la nécessité d'identifier représentatif, à la fois en termes d'ampleur et de durée d'activité de l'incendie. Les critères de sélection incluent :

- L'étendue et la durée déterminées à partir de l'analyse de l'historique des incendies sur la région à partir de la base de données BDIFF ;
- La visibilité des données satellites de l'anomalies thermiques sur la période considérée. Les données MODIS sont visibles à partir de l'interface Worldview de la NASA (<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>, dernier accès le 17/06/2025);
- La présence de mesure de la qualité de l'air sur le terrain, permettant de confronter les simulations aux observations. Ce critère sera confronté par une analyse du transport du panache de fumée avec le modèle ;
- L'intérêt régional, notamment lorsque l'épisode a eu un impact sur la population ou les écosystèmes.

Ces critères visent à garantir que le cas retenu soit à la fois scientifiquement exploitable et représentatif des enjeux en région Auvergne-Rhône-Alpes liés aux incendies de végétation.

L'analyse de l'historique des incendies sur la région a permis d'identifier les incendies les plus intenses (avec une zone brûlée ayant une superficie plus grande que 100 hectares). Ils sont présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1 – Liste des incendies les plus intenses relevés dans la région Auvergne-Rhône-Alpes sur les 5 dernières années.

Lieux	Date de début – date de fin – durée	Superficie brûlée (ha)	Visibilité depuis l'espace
Lussas – Ardèche	27/07/2022 – 27/02/2022 – (1 jour)	1120	Oui
Romeyer – Drôme	05/08/2022 – 15/08/2022 – (10 jours)	333	Oui
Montguers – Drôme	26/08/2020 – 30/08/2020 – (4 jours)	289	Oui
Lagorce – Ardèche	10/08/2022 – 11/08/2022 – (2 jours)	252	Oui
Lanas – Ardèche	13/07/2019 – 14/07/2019 – (2 jours)	193	Oui
Voreppe – Isère	05/08/2022 – 15/08/2022 – (10 jours)	105	Oui

Cette analyse met en évidence six incendies d'au moins 100 hectares survenus entre 2019 et 2024. Parmi ces feux de forêts, cinq d'entre eux se sont produits dans les départements de l'Ardèche et de la Drôme. Cependant, la couverture limitée du réseau de stations de mesure au sol dans ces zones ne permet pas d'évaluer correctement l'impact de ces événements sur la qualité de l'air au niveau local. L'incendie de Voreppe (38 - Isère) se distingue par sa proximité avec la ville de Grenoble. De plus, son intensité (105

hectares brûlés), sa durée (du 05/08/2022 au 15/08/2025) et sa visibilité par le capteur satellite MODIS le 07/08/2022 (figure 4) en font un événement significatif.

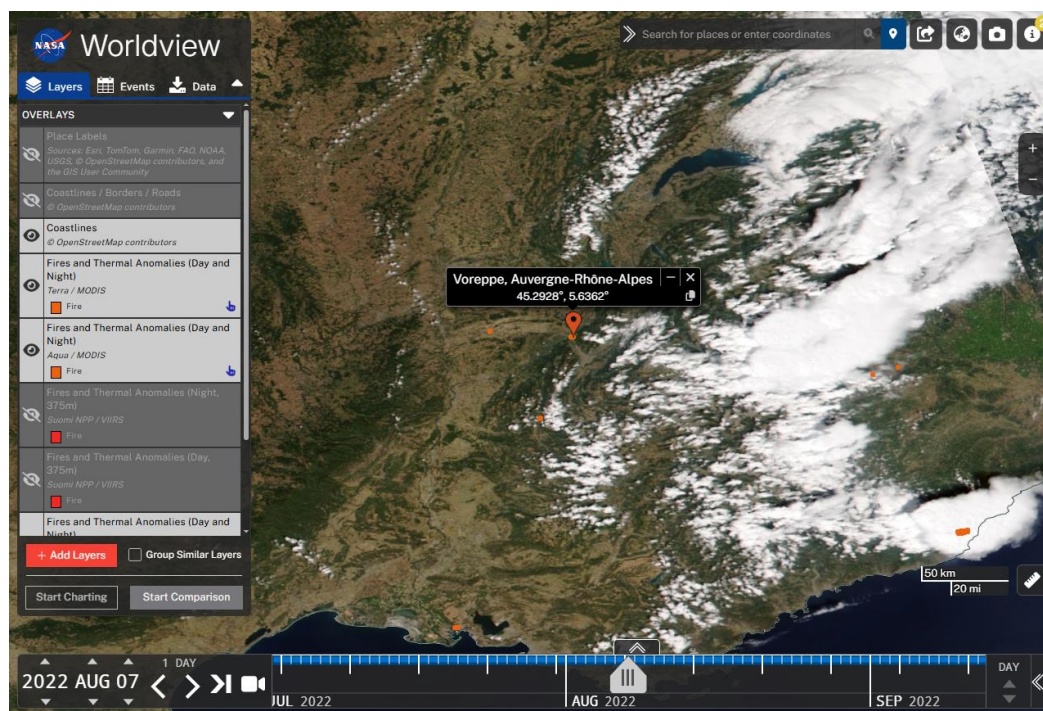


Figure 4 - Capture d'écran du site Worldview le 07/08/2022. Les capteurs MODIS à bord des satellites Terra et Aqua sont utilisés pour faire ressortir les anomalies thermiques au sol (points rouges). La réflectance du sol est issue du capteur VIIRS du satellite NOAA-20.

Cet incendie s'est déclaré entre les communes de Voreppe et de La Buisse en Isère, proche de l'agglomération grenobloise. Les habitants de l'agglomération de Gap (département des Hautes-Alpes) ont senti l'odeur de brûlé à plus de 100 km de l'incendie (https://actu.fr/auvergne-rhone-alpes/voreppe_38565/incendie-pres-de-grenoble-une-odeur-de-brule-sentie-a-plus-de-100-km-de-voreppe_52999501.html, accessible le 17/06/2025). De plus, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes a déployé un grand nombre de stations de mesure de la qualité de l'air à Grenoble (3 stations fixes et 30 micro-capteurs) optimisant nos chances d'observations de l'évènement.

3.2. Analyse des masses d'air

Pour évaluer l'impact potentiel de l'incendie de Voreppe sur la qualité de l'air en région Auvergne-Rhône-Alpes, une simulation a été réalisée avec le modèle HYSPLIT (Stein et al., 2015) (Figure 5).

NOAA HYSPLIT MODEL
Forward trajectories starting at 0000 UTC 07 Aug 22
GFSQ Meteorological Data

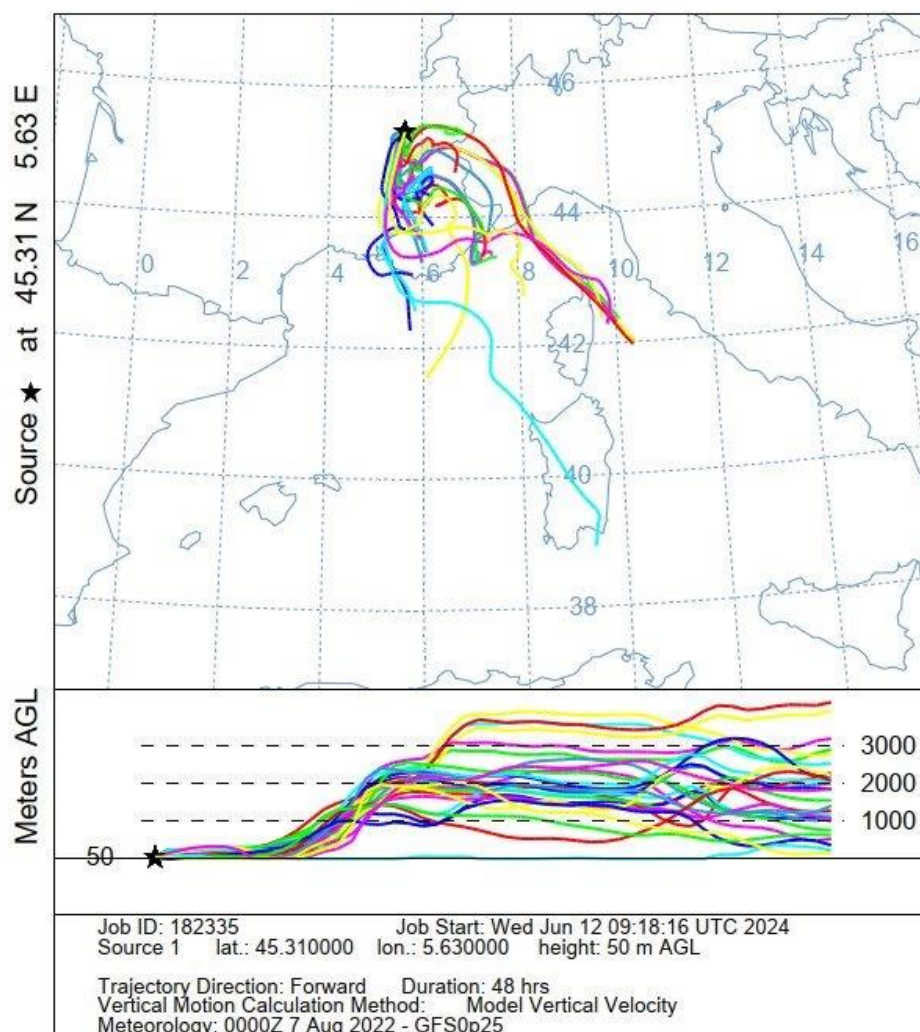


Figure 5 - Trajectoires des masses d'air simulées par le modèle HYSPLIT le 07/05/2022. Le modèle de dispersion est forcé par le modèle de météorologique GFS.

Les trajectoires calculées indiquent que le panache de fumée s'est principalement dirigé vers le sud et le sud-est au cours de l'événement. Ces simulations reposent sur les données météorologiques du modèle GFS, avec une résolution spatiale de $0,25^\circ$ ($\sim 25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$).

À cette échelle, l'influence du relief sur la dispersion reste difficile à représenter de manière précise. Or, la topographie locale joue un rôle déterminant : la proximité immédiate des massifs de la Chartreuse et du Vercors, situés autour de la zone de départ de feu, a probablement modifié le comportement du panache, en canalisant et en déviant les masses d'air. Cette interaction entre la dynamique atmosphérique et l'orographie est un élément essentiel à considérer pour interpréter les résultats de HYSPLIT et évaluer l'impact réel au sol.

3.3. Réseau de mesure et observations

Le réseau de mesure d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes comprend des stations fixes et micro-capteurs répartis sur l'ensemble du territoire régional. Ces stations sont équipées pour surveiller différents polluants atmosphériques (particules fines PM10 et PM2.5, NO_x , O_3 ...). Sur l'agglomération grenobloise, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes a déployé 3 stations fixes et 30 micro-capteurs, optimisant

nos chances d'observations de l'évènement. Ces stations sont implantées dans des environnements variés (urbain, périurbain, rural) afin de représenter au mieux la diversité des expositions. Toutefois, dans le cas d'un incendie localisé comme celui de Voreppe, la couverture reste limitée à l'agglomération grenobloise principalement (Figure 6). Nous étudions les émissions de PM_{2.5} par la suite dans cette étude.

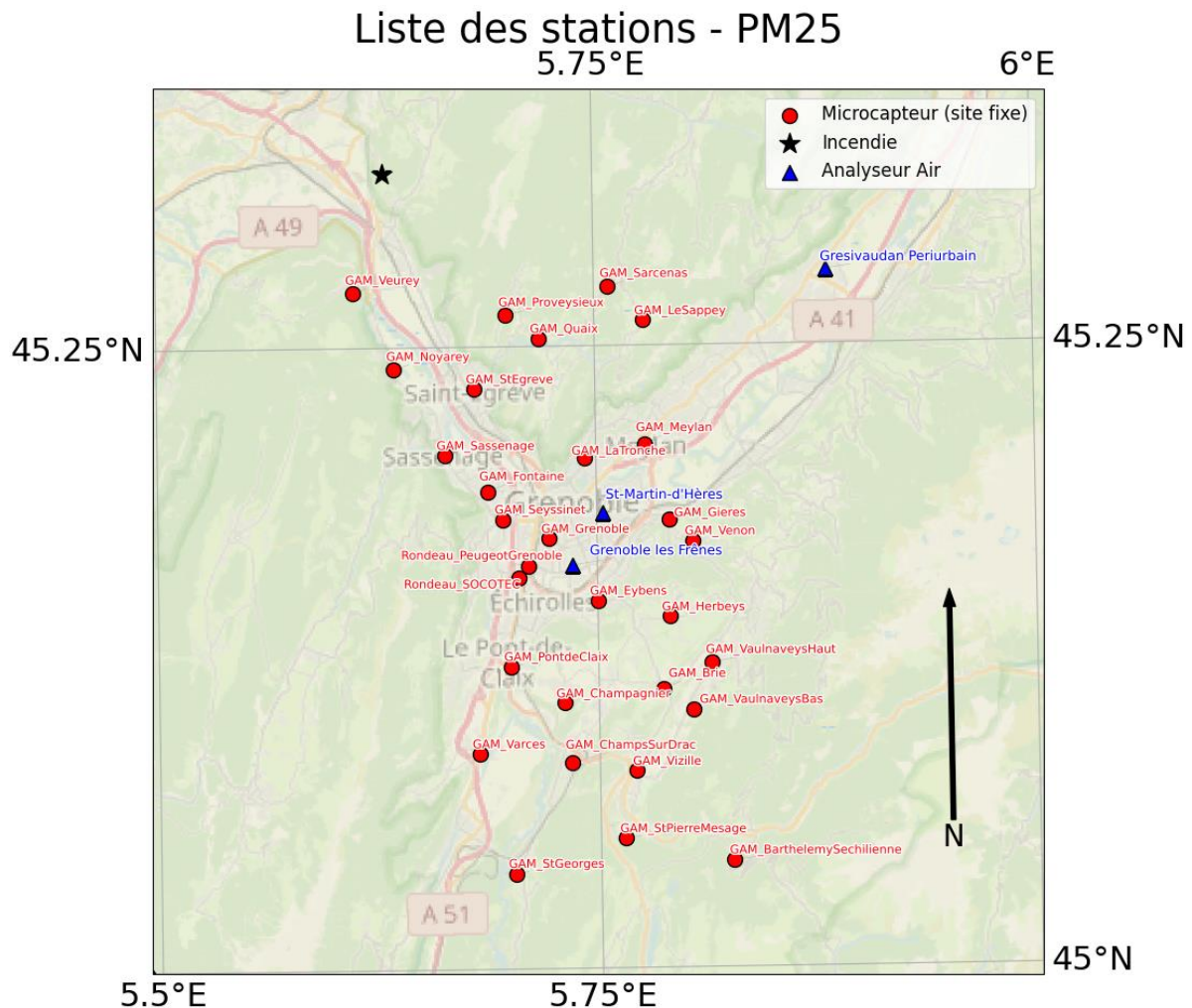


Figure 6 - Localisation des stations fixes (triangles bleus) et micro-capteurs (points rouges) de mesures des PM_{2.5} du réseau d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes sur l'agglomération grenobloise. L'étoile noire représente la localisation de l'incendie de Voreppe.

Le réseau de mesure se situe principalement au Sud de l'incendie. Ce réseau de mesures a permis de détecter la présence de particules fines sur la journée du 08/08/2022 (Figure 7).

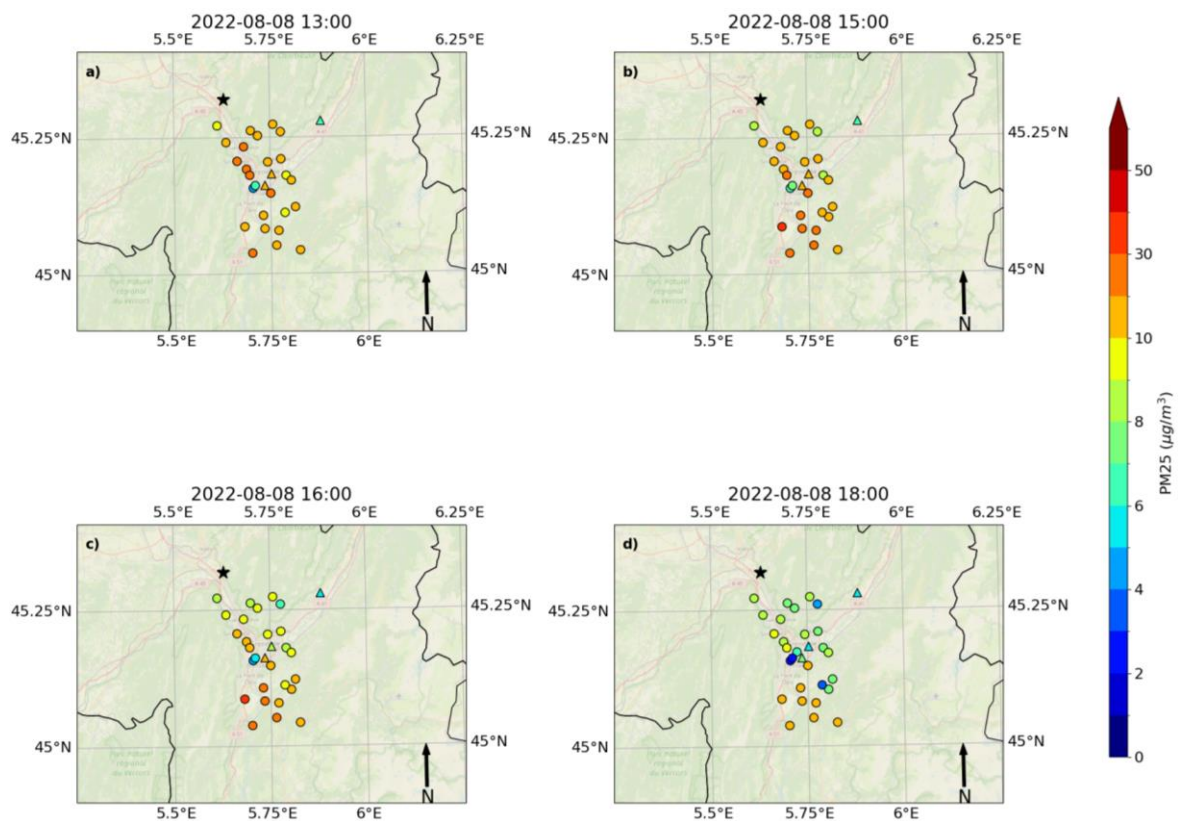


Figure 7 - Concentrations en PM2.5 mesurées sur la journée du 08/08/2022 par les micro-capteurs de l'agglomération grenobloise.

Les cartographies permettent de suivre l'évolution du panache de fumée issu de l'incendie. Les valeurs aux stations révèlent une augmentation de la concentration des particules fines (PM2.5 et PM10), issue des étapes de combustion. Si une part de ces émissions est attribuable à l'activité anthropique quotidiennes durant la journée, la hausse soudaine et locale des valeurs ($\sim 30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) vers 15h et 16h sont liées à l'incendie. De plus, nous pouvons observer le déplacement du panache issu de l'incendie de Voreppe :

- Vers 13h, Les micro-capteurs situés à proximité immédiate de l'incendie (Nord-Est de Grenoble) enregistrent d'abord une augmentation ($\sim 30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) des concentrations en PM2.5 ;
- Ensuite, vers 15h et 16h, cette hausse est détectée par les capteurs en périphérie Ouest de la ville ;
- Finalement, à 18h, les plus fortes valeurs se situent en périphérie Sud, illustrant le passage progressif du panache du Nord-Ouest vers le Sud de l'agglomération.

L'incendie de Voreppe a ainsi été retenu comme étude de cas, car il répond aux critères de sélection définis précédemment et s'appuie sur des observations disponibles permettant d'évaluer son impact.

4. Modélisation des incendies avec APIFLAME

4.1. Configuration de la modélisation de référence

Afin de simuler le transport et la transformation des polluants atmosphériques, le modèle CHIMERE utilise plusieurs données d'entrée : conditions météorologiques, émissions naturelles, émissions anthropiques et conditions initiales (Figure 8).

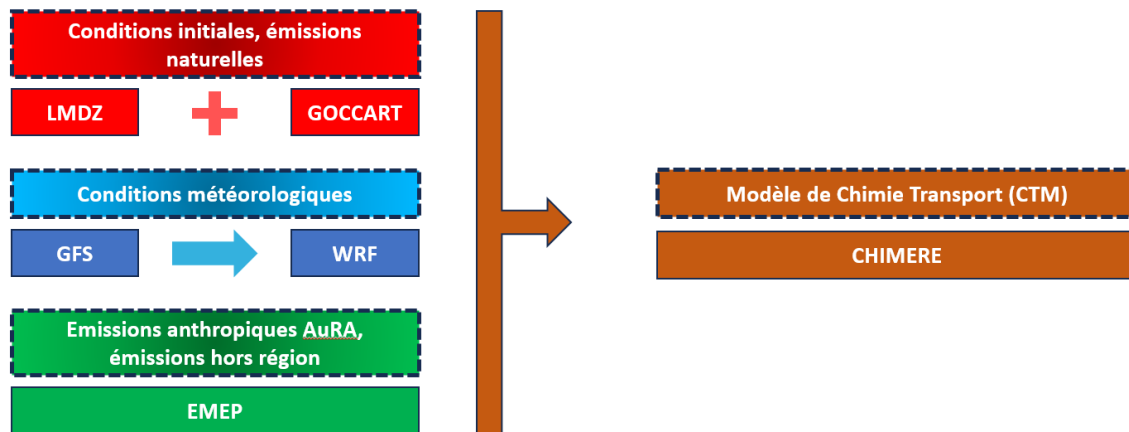


Figure 8 - Schéma fonctionnel des modules et modèles liés au modèle CHIMERE.

Le modèle WRF v4.4 est utilisé pour initialiser la météorologie sur les 3 domaines (Europe, France et Auvergne-Rhône-Alpes). Les modèles LMDZ et GOCCART sont utilisés pour les émissions naturelles et conditions initiales. L'inventaire des émissions de polluants d'ATMO AURA est utilisé pour les émissions anthropiques. La version CHIMERE utilisée est la version v2020r3 et utilise 3 domaines géographiques pour la représentation des données d'émissions (Figure 9) : un domaine large d01 (qui recouvre l'Europe avec une résolution de 27 km), un premier domaine imbriqué d02 (qui recouvre la France avec une résolution de 9 km) et un dernier domaine imbriqué d03, centré et recouvrant la région Auvergne-Rhône-Alpes avec une résolution de 3 km.

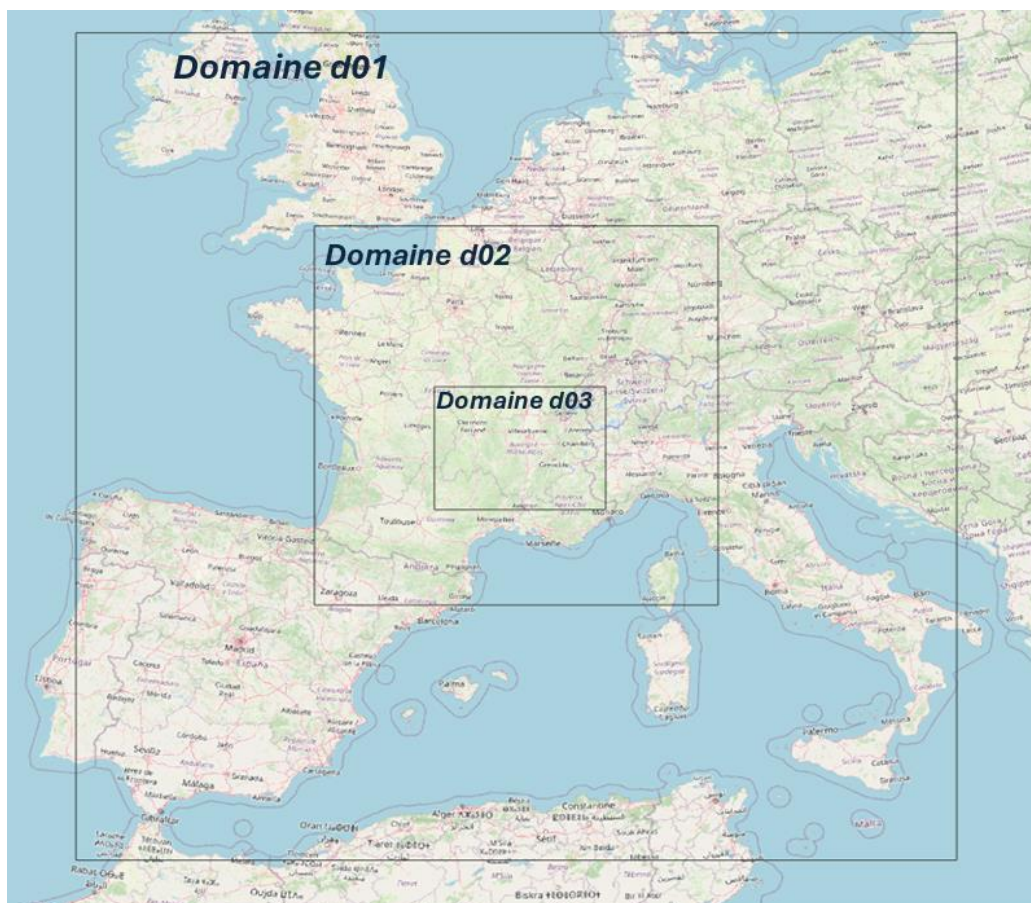


Figure 9 - Configuration des domaines emboîtés de calcul WRF et CHIMERE.

Le domaine continental d01 permet d'insérer les conditions météorologiques, les transports de polluants ou poussières à grande échelle et conditions aux limites pour le domaine d02. Ce domaine d01 est également essentiel pour initialiser la chimie pour les plus petits domaines. Le domaine national d02 permet de fournir les conditions aux limites du domaine d03 et les transports de polluants entre les régions. L'intégration des inventaires d'émissions aux échelles nationales peut se faire dans le domaine d02. Le domaine régional d03 est adapté pour la modélisation à fine échelle. Ce domaine est utilisé pour analyser précisément les concentrations de polluants.

4.2. Intégration du module APIFLAME dans la chaîne de modélisation

L'intégration du module APIFLAME dans CHIMERE permet d'ajouter explicitement les incendies comme sources ponctuelles et diffuses d'émissions de polluants, en compléments des inventaires déjà utilisés (Figure 10).

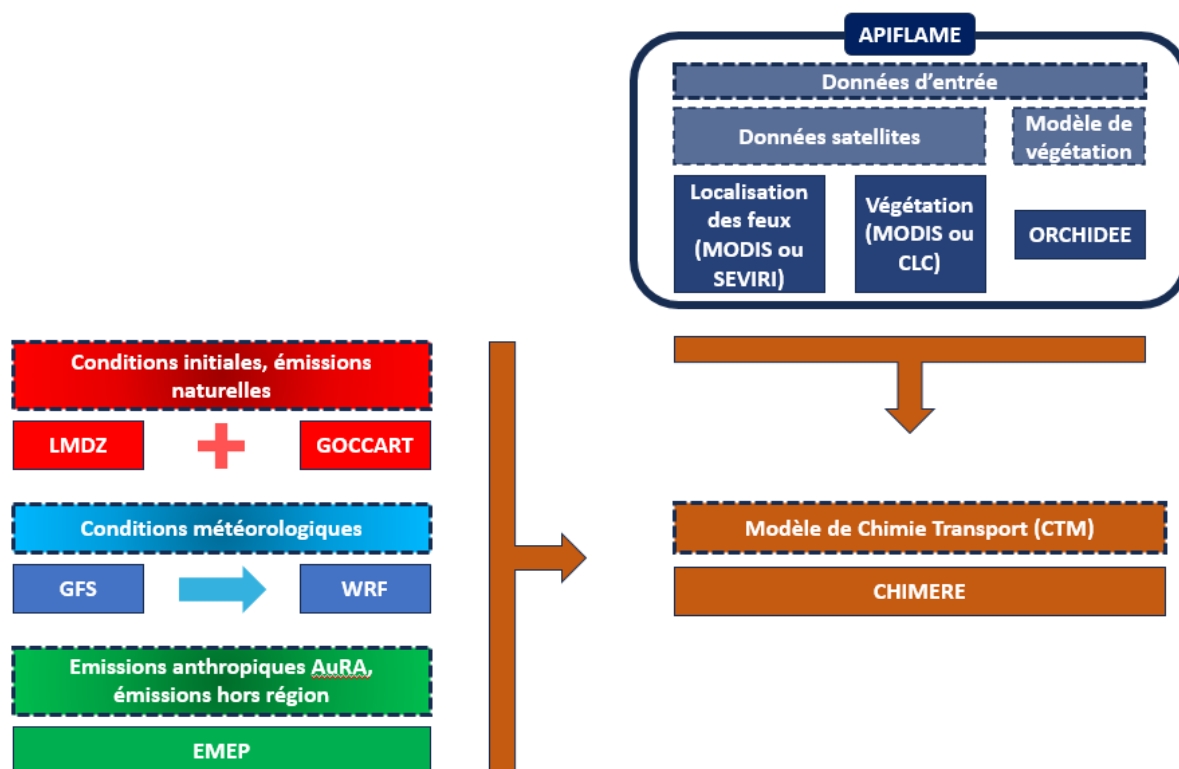


Figure 10 - Schéma fonctionnel de l'intégration du module APIFLAME lié au modèle CHIMERE.

APIFLAME calcule les émissions horaires de plusieurs familles de polluants selon la localisation et l'intensité des feux. Les résultats sont stockés dans des fichiers mensuels, au format attendu par CHIMERE, avec une répartition spatiale et temporelle cohérente avec la résolution de chaque domaine.

Dans la chaîne de modélisation, ces fichiers d'émissions issues d'APIFLAME sont intégrés au même stade que les inventaires d'émissions classiques. Ils alimentent directement le modèle CHIMERE, qui prend ensuite en compte le transport, la dispersion et la transformation chimique de ces émissions dans l'atmosphère.

4.3. Configuration des tests de sensibilité

Pour estimer la sensibilité du module APIFLAME plusieurs tests de sensibilités ont été réalisés. L'analyse commence par une simulation CHIMERE de référence (par la suite nommée Reference_sans_APIFLAME), réalisée sans l'intégration d'APIFLAME, afin de disposer d'un point de comparaison. Trois simulations complémentaires (« tests »), décrites dans le tableau 2, ont ensuite été menées pour analyser l'influence de certains paramètres et vérifier la pertinence du cas d'étude.

Tableau 2 - Résumé des simulations effectuées.

Tests	Données satellites FRP	Données satellites type de végétation	Seuil de détection des incendies à partir des anomalies thermiques (MW)
Test n°1	MODIS	MODIS	50
Test n°2	MODIS	CLC	10
Test n°3	SEVIRI	CLC	10

Cette simulation de référence sert également de point de comparaison avec les simulations tests. En effet, en comparant leurs résultats aux cartes de modélisations issues des simulations tests ainsi que les

valeurs issues des stations de mesure et des micro-capteurs.

Les tests ont été élaborés progressivement selon la logique suivante :

- **Cas test n°1** : évaluer la capacité du module APIFLAME, en configuration standard (utilisant les données satellite de feux MODIS et de végétation MODIS), à détecter l'incendie de Voreppe. Cette simulation se nomme Test_APIFLAME_fire_MODIS_veg_MODIS par la suite ;
- **Cas test n°2** : analyse l'impact d'un changement de base de données d'occupation des sols et type de végétation (de la base de données MODIS à CLC). La simulation utilisant la base de données CLC prend le nom Test_APIFLAME_fire_MODIS_veg_CLC ;
- **Cas test n°3** : tester la sensibilité d'APIFLAME à la localisation des feux, en remplaçant les données satellites MODIS par la base de données SEVIRI comme source d'information. La simulation utilisant la base de données de feux SEVIRI prend le nom Test_APIFLAME_fire_SEVIRI_veg_CLC.

Pour chacun de ces cas, des cartes de différences de concentrations de particules ont été produites en soustrayant, pour chaque pixel à chaque heure, les résultats des simulations tests avec celui de la simulation de référence. Cette méthode permet d'isoler la part spécifique des incendies dans les concentrations simulées.

5. Résultats

5.1. Cas de référence

L'initialisation des conditions météorologiques et des conditions naturelles et anthropiques sont prises en amont de la simulation. La comparaison entre les valeurs de concentrations en PM2.5 mesurées et modélisées est représentée sur la figure 11.

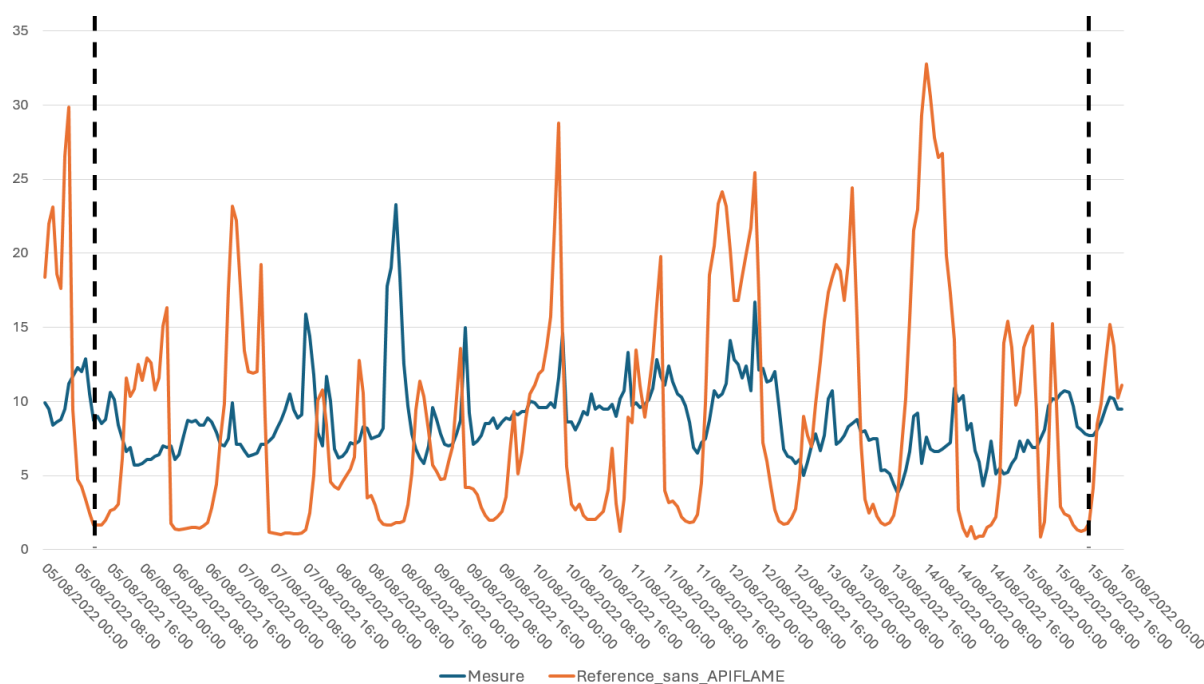


Figure 11 – Evolution horaire des valeurs de concentration en PM2.5 ($\mu\text{g.m}^{-3}$) à la station des Frênes (Grenoble). La courbe bleue correspond aux mesures et la courbe orange à la simulation Reference_sans_APIFLAME. Les barres verticales représentent le début et la fin de l'incendie de Voreppe.

Les évolutions temporelles des concentrations en PM2.5 montrent un écart entre les observations données par les mesures et les estimations de la simulation CHIMERE. Les mesures à la station des Frênes montrent que les concentrations sont stables entre 5 et 15 $\mu\text{g.m}^{-3}$ tout au long de l'épisode. Un faible pic (23 $\mu\text{g.m}^{-3}$) est observé par les mesures à la station en milieu de journée le 08 août 2022, correspondant à la période du panache de fumée. Pour référence, ces taux sont en-dessous de la valeur limite annuelle à ne pas dépasser, fixée à 25 $\mu\text{g.m}^{-3}$.

La simulation Reference_sans_APIFLAME montre une variation quotidienne des concentrations en PM2.5 avec une amplitude plus grande (de 3 $\mu\text{g.m}^{-3}$ à 30 $\mu\text{g.m}^{-3}$). Le modèle CHIMERE a tendance à surestimer les concentrations de ce polluant la journée et, à l'inverse, sous-estimer les valeurs les nuits.

5.2. Test n°1 : mise en place du module APIFLAME

L'incendie de Voreppe est mesuré par MODIS avec un FRP de 38 MW. Afin d'activer la détection et le calcul des émissions par APIFLAME, le seuil du FRP a été modifié en passant de 50 MW à 10 MW. Après avoir effectué ce changement, APIFLAME localise plusieurs incendies (figure 12).

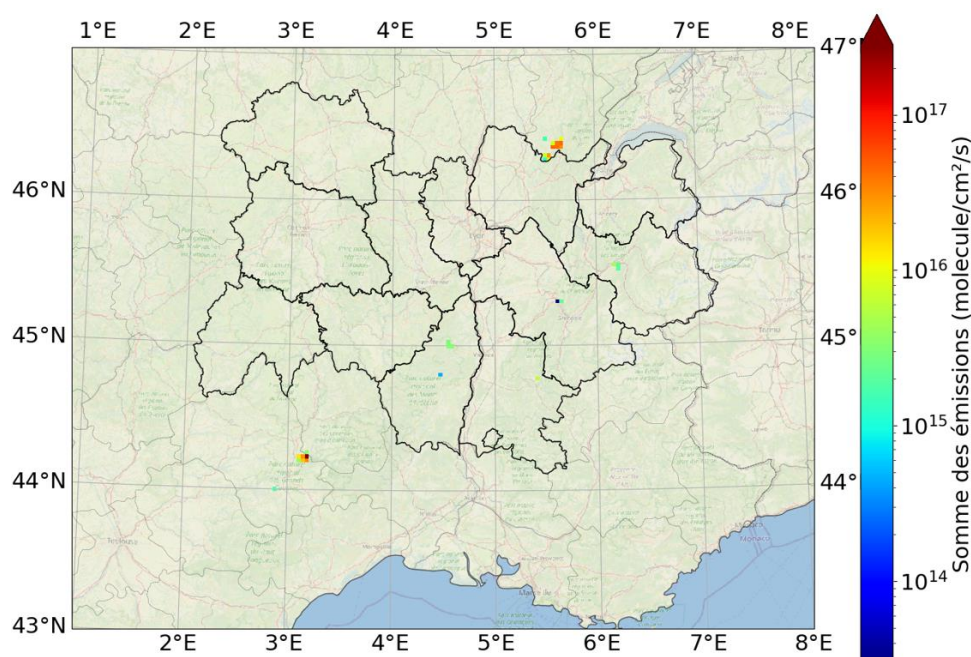


Figure 12 - Localisation des émissions de polluants liées aux incendies entre le 1^{er} et le 21 août 2022 identifiées par APIFLAME à partir des données MODIS de détection de feux. Les valeurs représentent de la somme des émissions sur toutes les altitudes et sur toute la période est représentée en molécules.cm⁻².s⁻¹.

Plusieurs sources d'émissions sont observables sur la région et ses environs, notamment dans le Jura ainsi qu'entre la Lozère et l'Aveyron. L'incendie de Voreppe est également détecté et pris en compte par APIFLAME dans ces conditions. Sur cette base, la première simulation Test_APIFLAME_fire_MODIS_veg_MODIS est réalisée. Néanmoins, les résultats cartographiques ne révèlent qu'une contribution très limitée, de l'ordre de 1 µg.m⁻³. La comparaison avec les observations, la simulation de référence et la simulation Test_APIFLAME_fire_MODIS_veg_MODIS (figure 13) montre l'impact de la prise en compte des émissions liées aux feux de forêt.

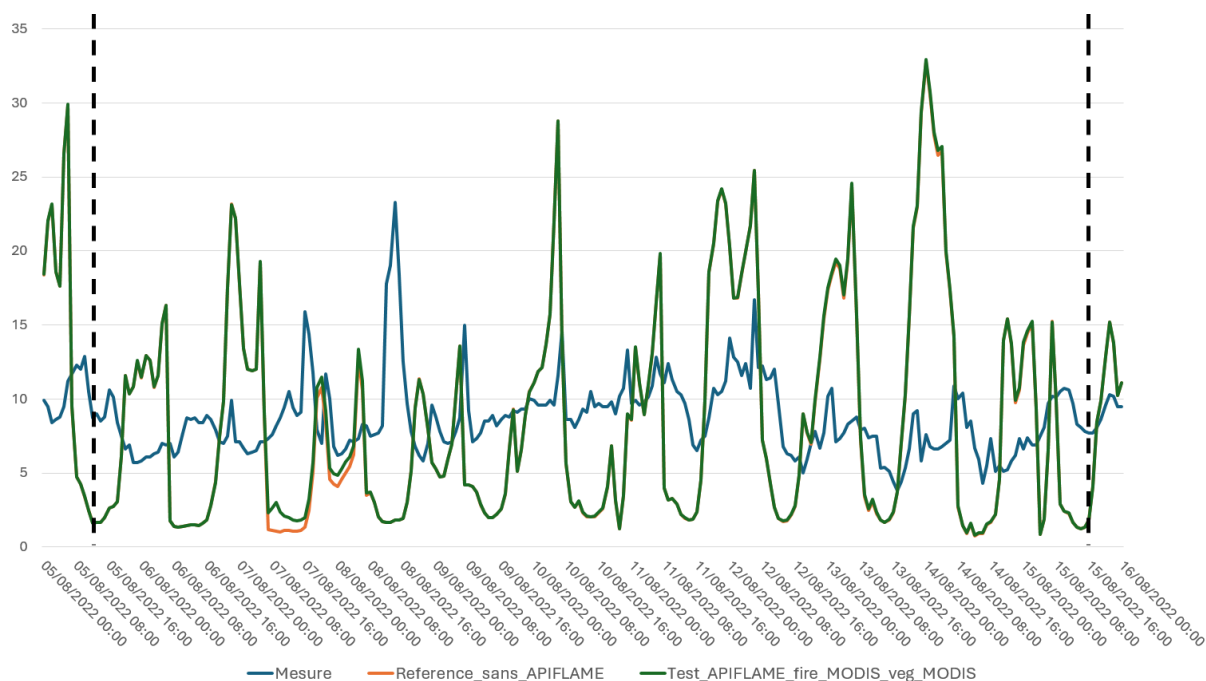


Figure 13 - Evolution horaire des valeurs de concentration en PM2.5 (µg.m⁻³) à la station des Frênes (Grenoble). La courbe bleue correspond aux mesures, la courbe orange à la simulation Reference_sans_APIFLAME et la courbe verte à la simulation Test_APIFLAME_fire_MODIS_veg_MODIS. Les barres verticales représentent le début et la fin de l'incendie de Voreppe.

La simulation Test_APIFLAME_fire_MODIS_veg_MODIS met en évidence une très faible augmentation de 1 à 2 $\mu\text{g.m}^{-3}$ de PM2.5 par rapport à la simulation Reference_sans_APIFLAME, attribuable à l'incendie de Voreppe sur les journées du 07 août 2022. Cette modification du seuil de détection des anomalies thermiques fournies par les données de détection de feux par satellite est retenue et conservée dans nos simulations suivantes. Cependant, les résultats montrent que la contribution des émissions liées aux incendies reste très faible. De plus, l'incendie est observable sur la journée du 7 août à partir de la simulation et le 8 août par la station. Une modification des données d'entrée est donc testée dans le cas suivant.

5.3. Test n°2 : changement de données de végétation de MODIS à CLC

Dans cette partie, la base de données d'occupation des sols CLC est utilisée, marquant la construction de la simulation Test_APIFLAME_fire_MODIS_veg_CLC. La différence de concentrations entre la simulation Reference_sans_APIFLAME et la simulation Test_APIFLAME_fire_MODIS_veg_CLC est représentée sur la figure 14.

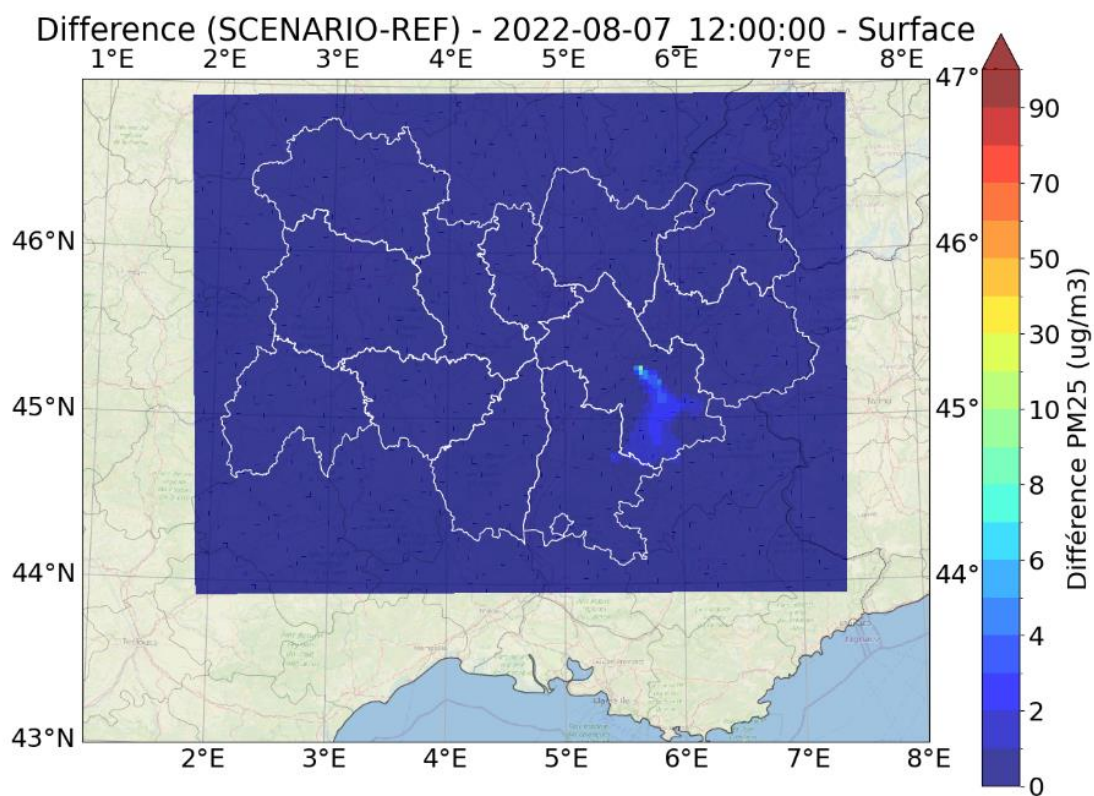


Figure 14 - Différence de concentrations en PM2.5 entre la simulation Test_APIFLAME_fire_MODIS_veg_CLC et la simulation Reference_sans_APIFLAME le 07/08/2022 à 12:00 UTC au niveau de la surface.

Cette carte montre que les émissions liées à l'incendie sont de l'ordre de 10 à 20 $\mu\text{g.m}^{-3}$ en PM2.5 pour les pixels proches de l'incendie (moins de 10 km de distance de la source). Le panache des particules émises par l'incendie impacte la ville de Grenoble puis se disperse vers le Sud. La contribution de l'incendie à l'injection de polluants apparaît plus importante que dans lors de la simulation Test_APIFLAME_fire_MODIS_veg_MODIS. Le changement de base de données d'occupations des sols semble avoir une incidence sur les émissions des polluants simulées à partir de la source.

L'évolution des concentrations de la simulation Test_APIFLAME_fire_MODIS_veg_CLC avec les données mesurées et la simulation Reference_sans_APIFLAME est représentée sur la figure 15.

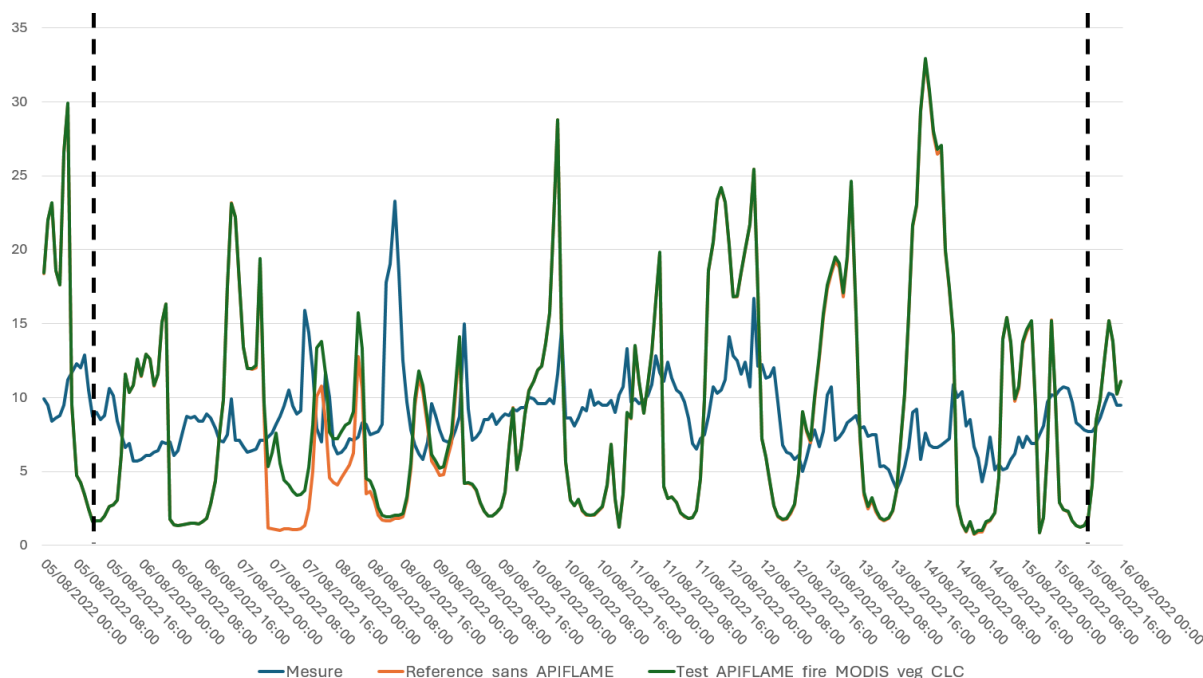


Figure 15 - Evolution horaire des valeurs de concentration en PM2.5 ($\mu\text{g.m}^{-3}$) à la station des Frênes (Grenoble). La courbe bleue correspond aux mesures, la courbe orange à la simulation Reference_sans_APIFLAME et la courbe verte à la simulation Test_APIFLAME_fire_MODIS_veg_CLC. Les barres verticales représentent le début et la fin de l'incendie de Voreppe.

Une différence de 3 à 4 $\mu\text{g.m}^{-3}$ est observée entre la simulation de référence et la simulation actuelle après la modification de la végétation de MODIS à CLC. Comme lors de la précédente simulation, les variations quotidiennes des concentrations de PM2.5 des simulations avec et sans utilisation d'APIFLAME sont plus grandes que les variations observées par les instruments de la station des Frênes. L'apport des émissions de l'incendie de Voreppe est perceptible les 7 et 8 août dans la simulation Test_APIFLAME_fire_MODIS_veg_CLC, contrairement à la simulation utilisant la base de données d'occupation des sols MODIS où la contribution n'est observée que lors de la journée du 7 août.

Pour la suite de l'étude, la configuration du module APIFLAME retenue combine l'abaissement du seuil de détection des anomalies de température, utilisée pour traiter la détection des feux, et l'utilisation de la base de données de végétation et d'occupation des sols CLC. Les simulations Test_APIFLAME_fire_MODIS_veg_MODIS et Test_APIFLAME_fire_MODIS_veg_CLC montrent que le module permet bien de prendre en compte les émissions liées aux feux de forêt, en particulier celui de Voreppe, et d'ajuster en partie la quantité totale émise lors de simulations CHIMERE. Toutefois, la base de données de détection des feux MODIS est inadaptée à une utilisation en mode prévision. Une modification du code source est nécessaire pour permettre à Atmo AuRA de réagir en temps réel.

5.4. Test n°3 : intégration des données SEVIRI

L'utilisation du module APIFLAME en prévision s'accompagne de plusieurs contraintes. La modélisation doit fournir des résultats rapidement afin de permettre, si nécessaire, le déclenchement d'alertes. Cela suppose non seulement des temps de calcul réduits, mais aussi des données d'entrée disponibles en temps réel et régulièrement mises à jour. Or, la base MODIS utilisée jusqu'ici présente un délai de mise à disposition d'un à plusieurs jours, ce qui limite son usage opérationnel. Pour pallier cette limite, une autre source de données plus réactive doit être intégrée. Le capteur SEVIRI embarqué sur le satellite géostationnaire Meteosat Second Generation constitue une alternative intéressante : il fournit des données de détection de feux (FRP) avec un délai de seulement 2 à 3 heures. Ces données, compatibles avec un usage prévisionnel, offrent une résolution spatiale de 3 km au nadir et une résolution temporelle de 15 minutes (<https://navigator.eumetsat.int/product/EO:EUM:DAT:MSG:FRP->

[SEVIRI](#), accessible le 17/06/2025).

Pour intégrer les données SEVIRI à la place des données MODIS, nous avons modifié les scripts d'APIFLAME. La résolution temporelle fine des données SEVIRI (15 minutes) permet d'observer la variabilité de la FRP à une échelle temporelle plus fine que celle employée dans CHIMERE (1 heure).

L'insertion de ces données supposent de faire plusieurs hypothèses :

- Les données SEVIRI ne fournissent pas d'estimation de la zone brûlée. Pour approcher cette valeur, la première hypothèse sera d'attribuer la taille d'un pixel issues de la données SEVIRI ($\sim 3 \times 3 \text{ km}^2$) comme surface brûlée si la détection est avérée. Cette surface plus grossière peut être à l'origine de la non-visibilité de certains petits feux ou même de la surestimation des émissions des incendies détectés car la surface brûlée est plus grande.
- La résolution temporelle plus faible (15 minutes) n'est pas compatible avec la résolution horaire définie dans CHIMERE ni dans APIFLAME. Les données de FRP sont donc agrégées sur une heure et la valeur maximale sur l'heure est retenue.

Les différences de concentration entre cette nouvelle simulation *Test_APIFLAME_fire_SEVIRI_veg_CLC*, utilisant la base de données SEVIRI pour la détection des feux, et la simulation *Reference_sans_APIFLAME* est représentée sur la figure 18. La cartographie de l'évènement montre des concentrations plus importantes que dans les précédents tests. L'impact de l'incendie est plus important sur une large zone proche de l'incendie mais aussi sur la Drôme et les Hautes-Alpes. Les concentrations estimées atteignent entre 50 et 70 $\mu\text{g.m}^{-3}$ à proximité de l'incendie, et autour de 30 $\mu\text{g.m}^{-3}$ aux abords de l'agglomération grenobloise.

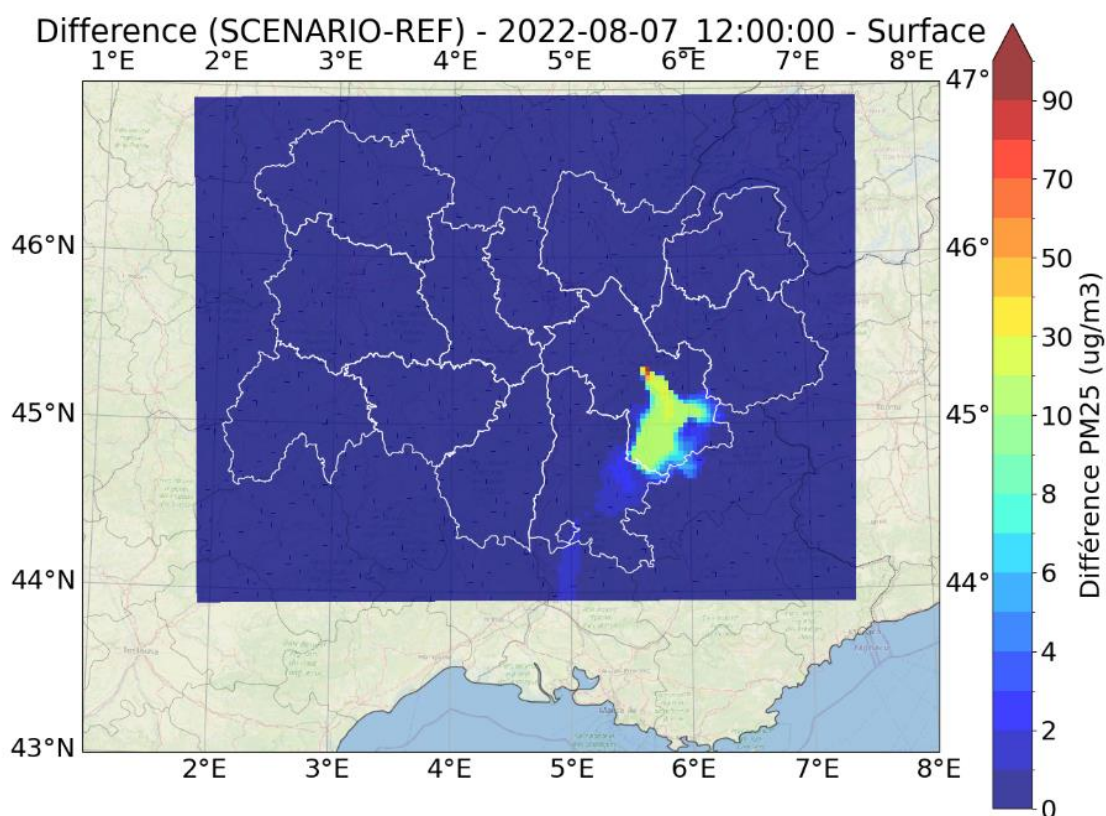


Figure 16 - Différence de concentrations en PM2.5 entre la simulation *Test_APIFLAME_fire_SEVIRI_veg_CLC* et la simulation *Reference_sans_APIFLAME* le 07/08/2022 à 12:00 UTC au niveau de la surface.

Afin de pouvoir comprendre l'impact de l'utilisation des données de feux SEVIRI dans APIFLAME, une évolution temporelle des concentrations moyennes des PM2.5 est réalisée lors de l'évènement (Figure 17).

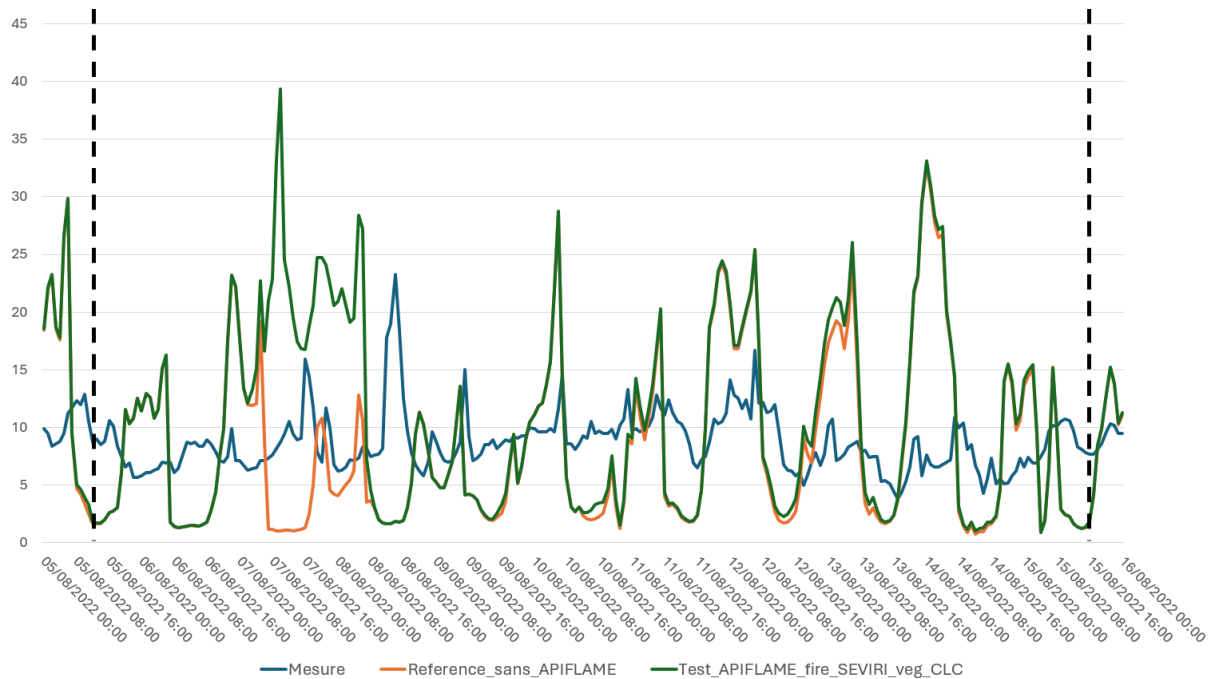


Figure 17 - Evolution horaire des valeurs de concentration en PM2.5 ($\mu\text{g.m}^{-3}$) à la station des Frênes (Grenoble). La courbe bleue correspond aux mesures, la courbe orange à la simulation *Reference_sans_APIFLAME* et la courbe verte à la simulation *Test_APIFLAME_fire_SEVIRI_veg_CLC*. Les barres verticales représentent le début et la fin de l'incendie de Voreppe.

Ce résultat nous permet de voir un grand pic attribué à l'émission de PM2.5 par l'incendie de Voreppe. La valeur maximale de concentration de PM2.5 est estimée à $39 \mu\text{g.m}^{-3}$ la journée du 7 août. Cette valeur est supérieure aux valeurs mesurées (oscillant entre 5 et $25 \mu\text{g.m}^{-3}$) lors de l'évènement et supérieure aux valeurs obtenues lors des précédentes simulations. Les valeurs simulées surestiment les valeurs mesurées lors des journées du 7 et 8 août et de légères différences sont observées sur la fin de l'évènement, notamment les 10, 12 et 13 août.

Des comparaisons complémentaires des concentrations en PM2.5, obtenues à partir de micro-capteurs, sont présentées en annexe. Bien que ces dispositifs soient précieux pour documenter la dynamique spatiale et temporelle des concentrations, leur précision demeure insuffisante pour une quantification fiable. Ces mesures ont tout de même confirmé la zone d'impact plutôt large et la temporalité du panache de l'incendie modélisé.

6. Discussion

L'intégration d'APIFLAME vise à représenter explicitement les feux de végétation comme sources d'émissions dans la chaîne de modélisation CHIMERE afin d'évaluer leur impact sur la qualité de l'air régionale. Les simulations précédentes ont été menées pour évaluer l'influence des choix de données d'entrée (feux et occupation des sols - végétation) sur les émissions et les concentrations simulées de polluants. Les émissions libérées par l'incendie de Voreppe sont comparées en fonction de la simulation (figure 18).

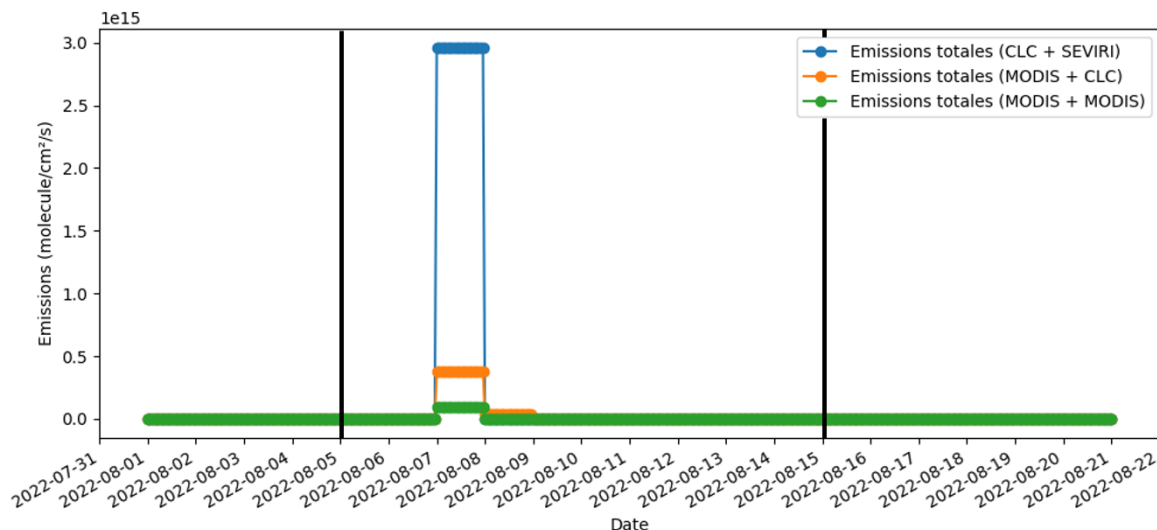


Figure 18 - Evolution horaire des émissions totales de polluants à la source de l'incendie, toutes altitudes confondues. La simulation Test_APIFLAME_fire_MODIS_veg_MODIS est représentée en vert, la simulation Test_APIFLAME_fire_MODIS_veg_CLC en orange et Test_APIFLAME_fire_SEVIRI_veg_CLC en bleu.

Avec la configuration Test_APIFLAME_fire_MODIS_veg_MODIS, les émissions atteignent environ $0.1 \text{ molécules.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$ sur la seule journée du 7 août 2022. Le passage à la base de données d'occupation des sols CLC (Test_APIFLAME_fire_MODIS_veg_CLC) multiplie la somme des émissions par un facteur de 4 ; l'utilisation de SEVIRI couplée à CLC (Test_APIFLAME_fire_SEVIRI_veg_CLC) multiplie par un facteur de 6 par rapport à la simulation Test_APIFLAME_fire_MODIS_veg_CLC. Sur Grenoble, malgré le passage du panache, l'impact observé sur le réseau de mesures au sol reste limité, ce que la modélisation confirme par des rehaussements modestes.

Il est à noter que les émissions sont constantes tout le long de la journée du 07/08/2022, ne faisant pas apparaître de variations sur la résolution horaire. Il est possible d'utiliser les données de feux SEVIRI pour faire apparaître la variabilité horaire des émissions des polluants (Turquety et al., 2020) mais cette option n'a pas été retenue afin de conserver l'homogénéité des tests pour l'étape de la comparaison. Ce résultat nous permet d'observer la nature restrictive des données d'entrées.

De plus, ces simulations jouent le rôle de tests de sensibilité sur les données d'entrées :

- La base de données de végétation et occupation des sols (MODIS à CLC). L'accroissement des émissions s'explique par des différences de classification et de teneur en combustible (densité/biomasse) entre bases : CLC peut attribuer des types plus "combustibles" sur certaines zones, augmentant la consommation de carburant et donc les émissions.
- La détection des feux (MODIS à SEVIRI). La meilleure résolution temporelle de SEVIRI (15 min) réduit les « manques » d'observation inhérents aux capteurs polaires (MODIS) et capte mieux la persistance des foyers sur la journée, ce qui accroît la charge émissive agrégée. En contrepartie, la résolution spatiale plus grossière et la conversion FRP aux émissions peuvent conduire à des surestimations si elles ne sont pas calibrées localement.

Dans le cas de l'incendie de Voreppe, les mesures indiquent un impact modéré, cohérent avec une advection du panache vers le Sud de l'agglomération grenobloise observée par les stations de mesure. Cet outil possède aussi la capacité d'évaluer l'influence des émissions d'incendies localisés dans d'autres régions sur le territoire de la région Auvergne-Rhône-Alpes. C'est le cas de l'incendie proche de Massegros Causses Gorges (48 – Lozère) entre les 13 et 14/08/2022 (figure 19) qui a été testé lors de cette étude.

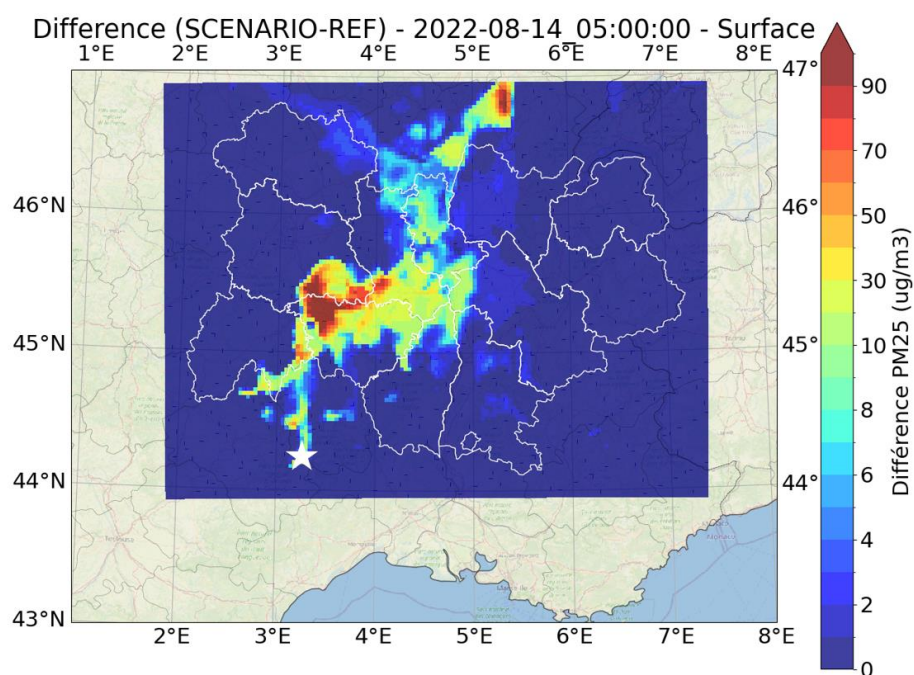


Figure 19 - Différence de concentrations en PM2.5 entre la simulation CHIMERE-APIFLAME modifiée avec l'utilisation des données de détection des anomalies thermiques SEVIRI et avec la végétation CLC et la simulation de référence sans APIFLAME le 14/08/2022 à 05:00 UTC au niveau de la surface. L'étoile blanche représente l'incendie de Massegros.

L'incendie débute sur les contreforts de la Lozère et de l'Ardèche et nous pouvons voir que le panache est poussée sur la région Auvergne-Rhône-Alpes. De fortes concentrations de PM2.5 liées à l'incendie passent sur les départements de l'Auvergne (30 à $90 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) mais aussi la Loire, le Rhône et l'Ardèche. Les mesures effectuées les plus proches de la source se trouvent dans le Cantal à la station rurale de Rageade où une comparaison est effectuée (Figure 20).

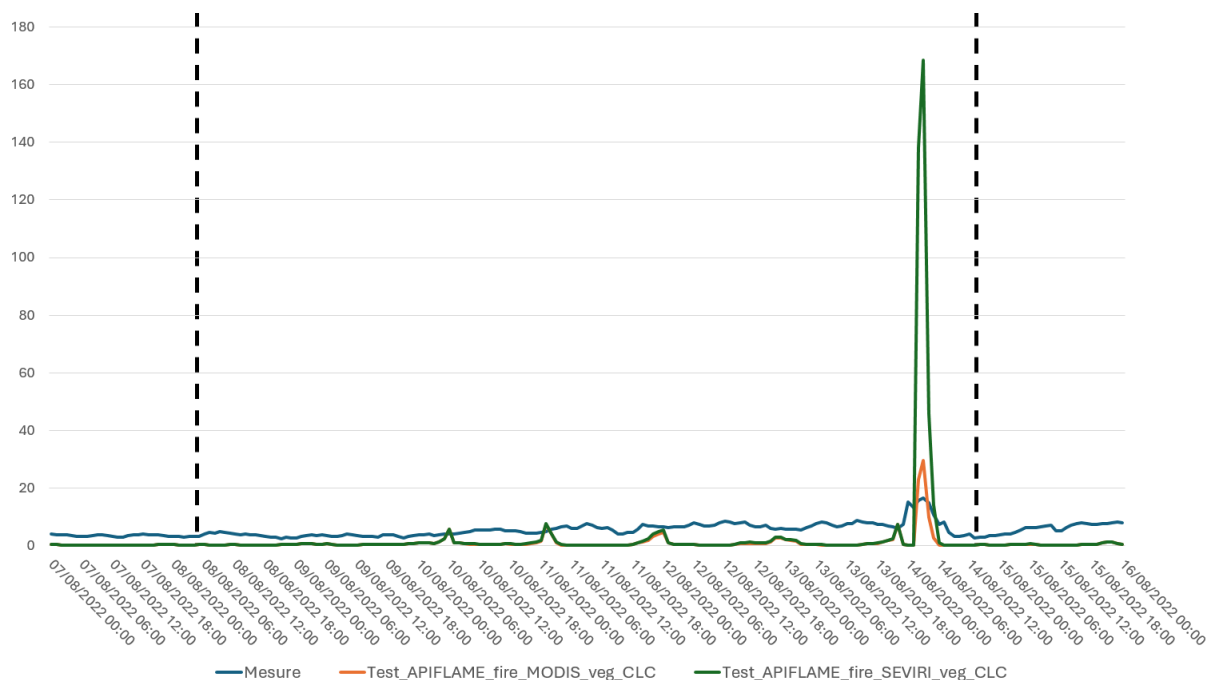


Figure 20 - Evolution horaire des valeurs de concentration en PM2.5 ($\mu\text{g.m}^{-3}$) à la station de Rageade (Cantal). La courbe bleue correspond aux mesures, la courbe orange à la simulation Test_APIFLAME_fire_MODIS_veg_CLC et la courbe verte à la simulation Test_APIFLAME_fire_SEVIRI_veg_CLC. Les barres verticales représentent le début et la fin de l'incendie de Massegros Causses Gorges.

Un pic bref de concentration de PM2.5 (environ $30 \mu\text{g.m}^{-3}$) est observé par la station à Rageade (Cantal – 15) le 14/08/2022. Ce type de résultats pour les concentrations de PM2.5 est rarement observé dans les zones rurales. Néanmoins, les modèles observent au même moment ce même pic estimé à plus de $200 \mu\text{g.m}^{-3}$ pour la simulation utilisant SEVIRI pour les données de feux. APIFLAME possède la capacité de repérer cet événement mais dans ce cas-ci, les émissions ont tendance à être surestimées suggérant que l'hypothèse des surfaces brûlées identiques à l'emprise du pixel SEVIRI est encore à travailler. On pourrait aussi regarder l'influence de la répartition verticale des émissions et tester les options de répartition verticale proposées dans APIFLAME.

Ainsi, l'apport des données satellites intégrées dans APIFLAME améliore la représentation des feux dans la modélisation atmosphérique actuelle. Cette approche ouvre des perspectives opérationnelles claires, même si des limites subsistent, notamment sur l'estimation des émissions et la représentation des panaches. La conclusion qui suit revient sur les résultats généraux de cette étude et propose des pistes d'évolution pour un usage effectif au sein d'Atmo AuRA.

7. Conclusion et perspectives

Cette étude a pour objectif d'évaluer l'intégration du module APIFLAME dans la chaîne de modélisation de la qualité de l'air afin de mieux représenter l'impact des feux de forêt sur les émissions de polluants. Plusieurs étapes ont permis d'atteindre cet objectif :

- L'implémentation d'APIFLAME avec un test sur l'impact des différentes sources de données d'entrée (MODIS, CLC, SEVIRI),
- La simulation sur un cas d'étude en Auvergne-Rhône-Alpe (incendie de Voreppe, août 2022) et en dehors de la région (incendie en Lozère, août 2022),
- La comparaison entre les émissions simulées et les observations disponibles.

Les résultats montrent qu'APIFLAME est capable de reproduire les principales émissions liées aux incendies et de mettre en évidence leur contribution dans les simulations de qualité de l'air. À court terme, le module peut donc être mobilisé par Atmo AuRA pour l'analyse rétrospective des événements marquants et, sous certaines conditions, pour améliorer les prévisions opérationnelles avec les données satellites SEVIRI. Ces conditions concernent principalement la disponibilité rapide des données satellites, la maîtrise du temps de calcul, et la limitation des biais liés aux surestimations (notamment avec SEVIRI).

Plusieurs limites ont été mises en évidence lors de cette étude. En effet, la base de données MODIS de détection de feux n'est pas adaptée pour une application en mode prévision. La base de données SEVIRI, disponible plus rapidement (en 2 à 3 heures), est alors utilisée et implantée dans la chaîne de modélisation. Cependant, avec cette base de données, l'hypothèse selon laquelle toute la surface d'un pixel (de résolution 3 x 3 km²) est brûlée, si une valeur seuil de FRP est atteinte, peut conduire à une surestimation des émissions.

Pour un usage opérationnel d'APIFLAME en prévision, le processus repose sur SEVIRI pour la détection des feux et sur CLC pour l'occupation des sols. Pour la cartographie annuelle, la combinaison MODIS avec CLC peut fournir une base robuste pour l'évaluation rétrospective d'Atmo AuRA.

Afin d'améliorer l'outil et son usage opérationnel dans la chaîne de prévision d'Atmo AuRA, plusieurs axes de travail sont à envisager, par ordre de priorité :

- Des travaux d'amélioration de l'intégration de SEVIRI dans APIFLAME (prise en compte des surfaces brûlées à partir de module de suivi des feux en direct, variation horaire des émissions, ajuster les seuils de détection des anomalies thermiques),
- Développer ou utiliser un module de propagation des incendies couplé aux paramètres météorologiques pour mieux représenter la dynamique des sources,
- Diversifier les sources satellites de détection des feux avec les nouveaux capteurs comme VIIRS, appelés à remplacer MODIS, ou encore le capteur FCI plus récente (à bord du satellite géostationnaire MeteoSat Third Generation), remplaçant SEVIRI (sur les satellites MeteoSat Second Generation),
- Connecter APIFLAME à des modèles de dispersion rapides (par exemple HYSPLIT) pour fournir des résultats plus rapidement.

Ce travail souligne l'importance croissante des données satellites pour l'évolution de la qualité de l'air. Leur large couverture spatiale et leur résolution temporelle rapprochée des modèles comme CHIMERE en font une information complémentaire aux mesures au sol et aux inventaires. Les satellites apportent une capacité unique de détection rapide et systématique des feux, indispensable pour anticiper les impacts sur la qualité de l'air dans un contexte de changement climatique où la fréquence et l'intensité des incendies tendent à augmenter.

En conclusion, APIFLAME constitue un outil prometteur pour Atmo AuRA : utilisable dès à présent pour enrichir l'analyse des épisodes et, à moyen terme, pour renforcer les capacités de prévision à condition d'intégrer des sources satellites adaptées et de poursuivre les développements techniques identifiés.

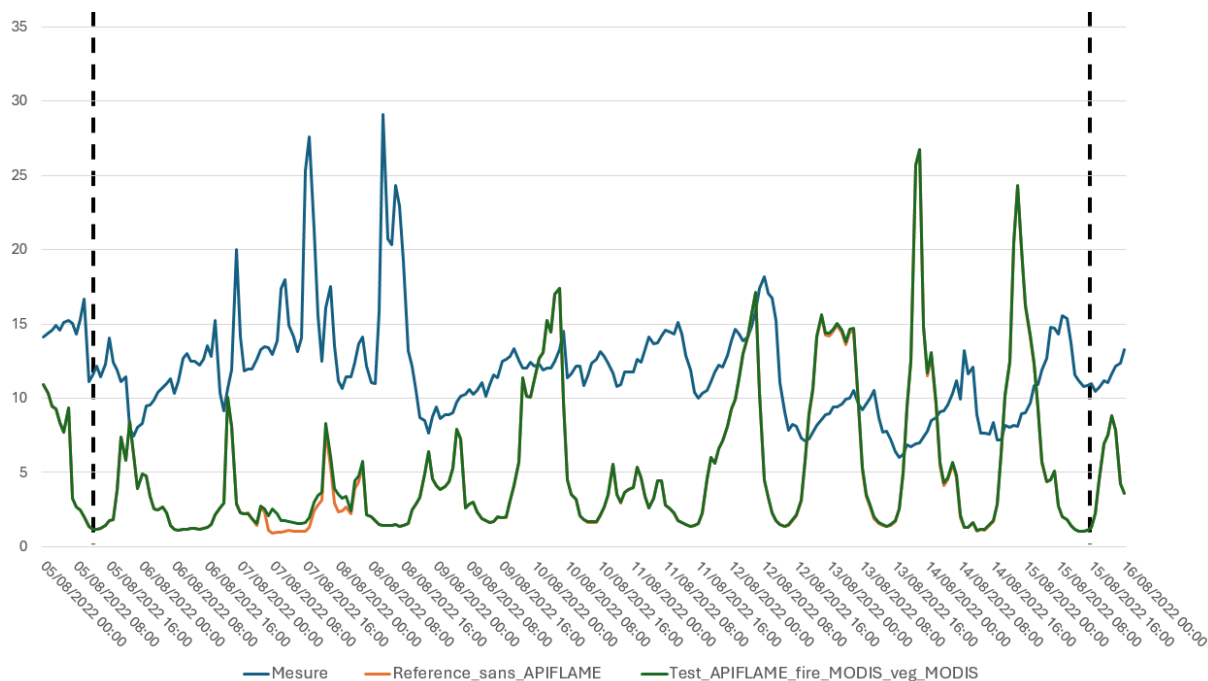


Figure 21 - Evolution horaire des valeurs moyennes de concentration en PM2.5 ($\mu\text{g.m}^{-3}$) aux micro-capteurs de Varcès, Seyssinet et Noyarey. La courbe bleue correspond aux mesures, la courbe orange à la simulation Reference_sans_APIFLAME et la courbe verte à la simulation Test_APIFLAME_fire_MODIS_veg_MODIS. Les barres verticales représentent le début et la fin de l'incendie de Voreppe.

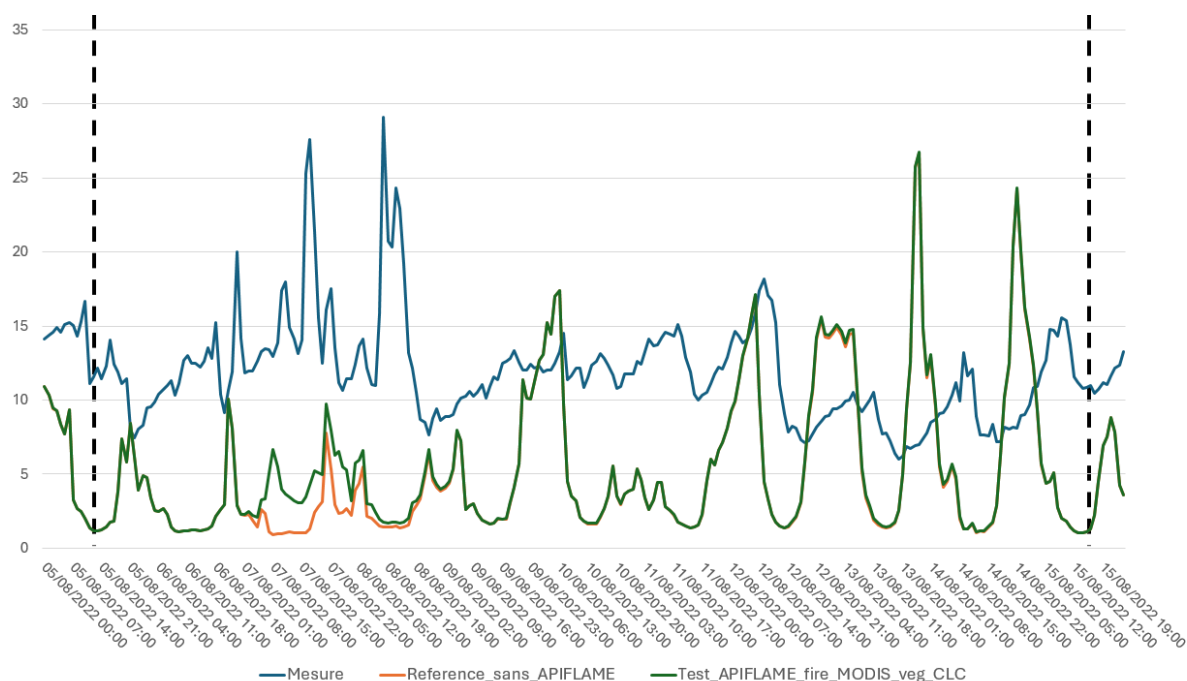


Figure 22 - Evolution horaire des valeurs moyennes de concentration en PM2.5 ($\mu\text{g.m}^{-3}$) aux micro-capteurs de Varcès, Seyssinet et Noyarey. La courbe bleue correspond aux mesures, la courbe orange à la simulation Reference_sans_APIFLAME et la courbe verte à la simulation Test_APIFLAME_fire_MODIS_veg_CLC. Les barres verticales représentent le début et la fin de l'incendie de Voreppe.

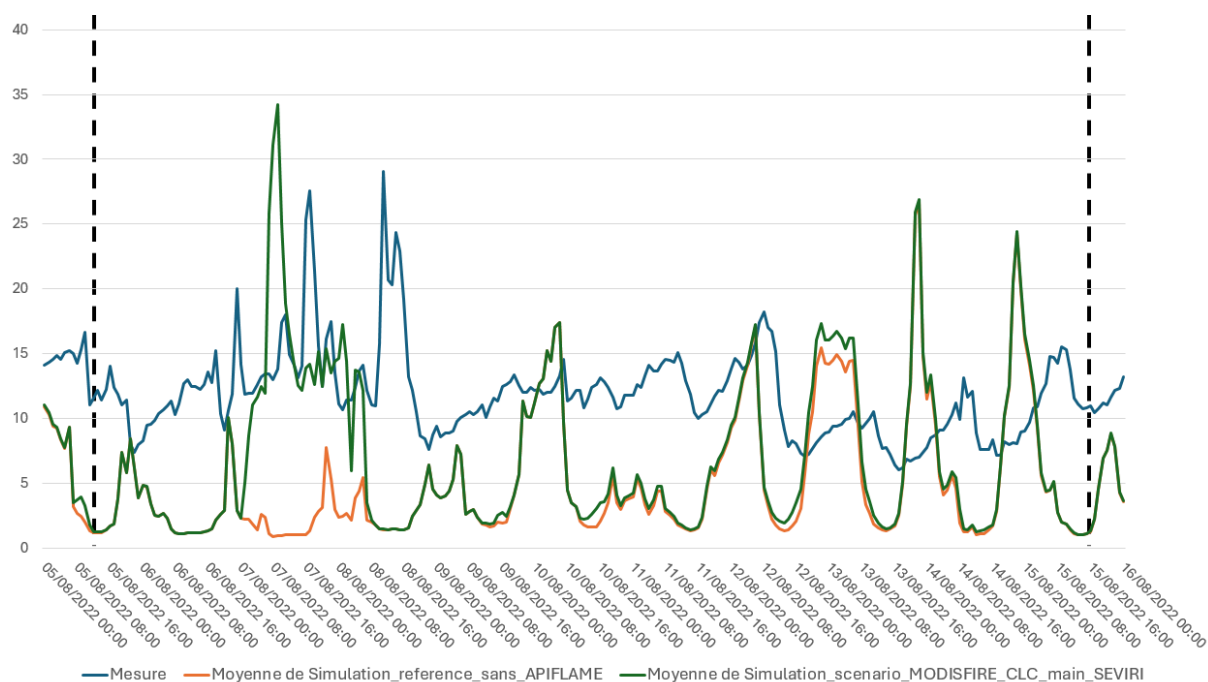


Figure 23 - Evolution horaire des valeurs moyennes de concentration en PM2.5 ($\mu\text{g.m}^{-3}$) aux micro-capteurs de Varcès, Seyssinet et Noyarey. La courbe bleue correspond aux mesures, la courbe orange à la simulation Reference_sans_APIFLAME et la courbe verte à la simulation Test_APIFLAME_fire_SEVIRI_veg_CLC. Les barres verticales représentent le début et la fin de l'incendie de Voreppe.

Bibliographie

Akagi SK, Yokelson RJ, Burling IR, Meinardi S, Simpson I, Blake DR, McMeeking GR, Sullivan A, Lee T, Kreidenweis S, Urbanski S, Reardon J, Griffith DWT, Johnson TJ, Weise DR (2013) Measurements of reactive trace gases and variable O₃ formation rates in some South Carolina biomass burning plumes. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13, 1141–1165. <https://doi.org/10.5194/acp-13-1141-2013>

Chen Y, Hall J, van Wees D, Andela N, Hantson S, Giglio L, van der Werf GR, Morton DC, Randerson JT (2023) Multi-decadal trends and variability in burned area from the fifth version of the Global Fire Emissions Database (GFED5). *Earth System Science Data* 15, 5227–5259. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5227-2023>

Giglio L, Csiszar I, Justice CO (2006) Global distribution and seasonality of active fires as observed with the Terra and Aqua Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensors. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 111, G02016. <https://doi.org/10.1029/2005JG000142>

Giglio L, Randerson JT, van der Werf GR, Kasibhatla PS, Collatz GJ, Morton DC, DeFries RS (2010) Assessing variability and long-term trends in burned area by merging multiple satellite fire products. *Biogeosciences* 7, 1171–1186. <https://doi.org/10.5194/bg-7-1171-2010>

Ichoku C, Ellison L (2014) Global top-down smoke-aerosol emissions estimation using satellite fire radiative power measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics* 14, 6643–6667. <https://doi.org/10.5194/acp-14-6643-2014>

Kaiser JW, Heil A, Andreae MO, Benedetti A, Chubarova N, Jones L, Morcrette JJ, Razinger M, Schultz MG, Suttie M, van der Werf GR (2012) Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power. *Biogeosciences* 9, 527–554. <https://doi.org/10.5194/bg-9-527-2012>

Mailler S, Menut L, di Sarra AG, Becagli S, Di Iorio T, Bessagnet B, Briant R, Formenti P, Doussin JF, Gómez-Amo JL, Mallet M, Rea G, Siour G, Sferlazzo DM, Traversi R, Udisti R, Turquety S (2016) On the radiative impact of aerosols on photolysis rates: comparison of simulations and observations in the Lampedusa island during the ChArMEx/ADRIED campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics* 16, 1219–1244. <https://doi.org/10.5194/acp-16-1219-2016>

Maignan F, Bréon FM, Chevallier F, Viovy N, Ciais P, Garrec C, Trules J, and Mancip M (2011) Evaluation of a Global Vegetation Model using time series of satellite vegetation indices. *Geoscientific Model Development* 4, 1103–1114. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-1103-2011>

Menut L, Bessagnet B, Khvorostyanov D, Beekmann M, Blond N, Colette A, Coll I, Curci G, Foret G, Hodzic A, Mailler S, Meleux F, Monge JL, Pison I, Siour G, Turquety S, Valari M, Vautard R, Vivanco MG (2013) CHIMERE 2013: a model for regional atmospheric composition modelling. *Geoscientific Model Development* 6, 981–1028. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-981-2013>

Monks SA, Arnold SR, Chipperfield MP (2012) Evidence for El Niño–Southern Oscillation (ENSO) influence on Arctic CO interannual variability through biomass burning emissions. *Geophysical Research Letters* 39, L14804. <https://doi.org/10.1029/2012GL052512>

OMS (1999) 'Health guidelines for vegetation fire events.' (World Health Organization: Geneva, Switzerland)

Osswald T, Gama C, Fernandes AP, Lopes D, Varela V, Miranda AI (2023) Effects of the wildfires in August 2021 on the air quality of Athens through a numerical simulation. *International Journal of Wildland Fire* 32, 1633–1645. <https://doi.org/10.1071/WF22148>

Stein AF, Draxler RR, Rolph GD, Stunder BJB, Cohen MD, Ngan F (2015) NOAA's HYSPLIT

atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bulletin of the American Meteorological Society* 96, 2059–2077. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>

Turquety S, Menut L, Bessagnet B, Anav A, Viovy N, Maignan F, Wooster M (2014) APIFLAME v1.0: high-resolution fire emission model and application to the Euro-Mediterranean region. *Geoscientific Model Development* 7, 587–612. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-587-2014>

Turquety S, Menut L, Siour G, Mailler S, Hadji-Lazaro J, George M, Clerbaux C, Hurtmans D, Coheur PF (2020) APIFLAME v2.0 biomass burning emissions model: impact of refined input parameters on atmospheric concentration in Portugal in summer 2016. *Geoscientific Model Development* 13, 2981–3009. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-2981-2020>

van der Werf GR, Randerson JT, Giglio L, van Leeuwen TT, Chen Y, Rogers BM, Mu M, van Marle MJE, Morton DC, Collatz GJ, Yokelson RJ, Kasibhatla PS (2017) Global fire emissions estimates during 1997–2016. *Earth System Science Data* 9, 697–720. <https://doi.org/10.5194/essd-9-697-2017>

van Leeuwen TT, van der Werf GR, Hoffmann AA, Detmers RG, Rücker G, French NHF, Archibald S, Carvalho Jr. JA, Cook GD, de Groot WJ, Hély C, Kasischke ES, Kloster S, McCarty JL, Pettinari ML, Savadogo P, Alvarado EC, Boschetti L, Manuri S, Meyer CP, Siegert F, Trollope LA, and Trollope WSW (2014) Biomass burning fuel consumption rates: a field measurement database. *Biogeosciences*, 11, 7305–7329. <https://doi.org/10.5194/bg-11-7305-2014>

Wiedinmyer C, Akagi SK, Yokelson RJ, Emmons LK, Orlando JJ, Soja AJ (2011) The Fire INventory from NCAR (FINN): a high resolution global model to estimate the emissions from open burning. *Geoscientific Model Development* 4, 625–641. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-625-2011>

Wiedinmyer C, Kimura Y, McDonald-Buller EC, Emmons LK, Buchholz RR, Tang W, Seto K, Joseph MB, Barsanti KC, Carlton AG, Yokelson R (2023) The Fire Inventory from NCAR version 2.5: an updated global fire emissions model for climate and chemistry applications. *Geoscientific Model Development* 16, 3873–3891. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-3873-2023>

Yokelson RJ, Burling IR, Gilman JB, Warneke C, Stockwell CE, de Gouw J, Akagi SK, Urbanski SP, Veres P, Roberts JM, Kuster WC, Reardon J, Griffith DWT, Johnson TJ, Hosseini S, Miller JW, Cocker III DR, Jung H, and Weise DR (2013) Coupling field and laboratory measurements to estimate the emission factors of identified and unidentified trace gases for prescribed fires. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13, 89–116. <https://doi.org/10.5194/acp-13-89-2013>