

FRANÇAIS

# NEWSLETTER

#02



ALPAERA

Interreg



Cofinancé par  
l'Union Européenne  
Cofinanziato  
dall'Unione Europea

AtmoSud  
Inspirer un air meilleur

Atmo  
AUVERGNE-RHÔNE-ALPES  
votre partenaire air

Arpa  
PIEMONTE  
Agenzia Regionale  
per la Protezione Ambientale

ARPA  
Valle d'Aosta

ARPAL  
Agenzia regionale per la protezione dell'ambiente figure

France – Italia ALCOTRA

NOVEMBRE 2025

## AIDE À LA GOUVERNANCE DE L'AIR ET DU CLIMAT EN ZONES ALPINES ALCOTRA

***Cher lecteur,***

*Bienvenue à la deuxième édition de la newsletter du projet ALP'AERA, financé par le programme Interreg Italie-France ALCOTRA 2021-2027.*

*Dans cette édition sont présentés les progrès les plus significatifs du projet à travers une série d'articles couvrant différentes activités clés : du rôle du comité d'experts aux techniques innovantes de surveillance par drones, des campagnes de mesure de l'ozone et du black carbon aux analyses des scénarios futurs de qualité de l'air.*

*Le projet continue de se développer avec succès, impliquant tous les partenaires dans la caractérisation des impacts du changement climatique sur la qualité de l'air dans les vallées alpines. Les activités de surveillance se sont intensifiées et les premiers résultats émergent, fournissant des données précieuses pour la gouvernance environnementale transfrontalière.*

*Si vous souhaitez suivre nos dernières activités et être informé des développements du projet, suivez-nous sur nos réseaux sociaux et sur le nouveau site web du projet disponible sur [www.alpaera.eu](http://www.alpaera.eu).*

*Nous vous souhaitons une bonne lecture !*

**Les partenaires du projet ALP'AERA**

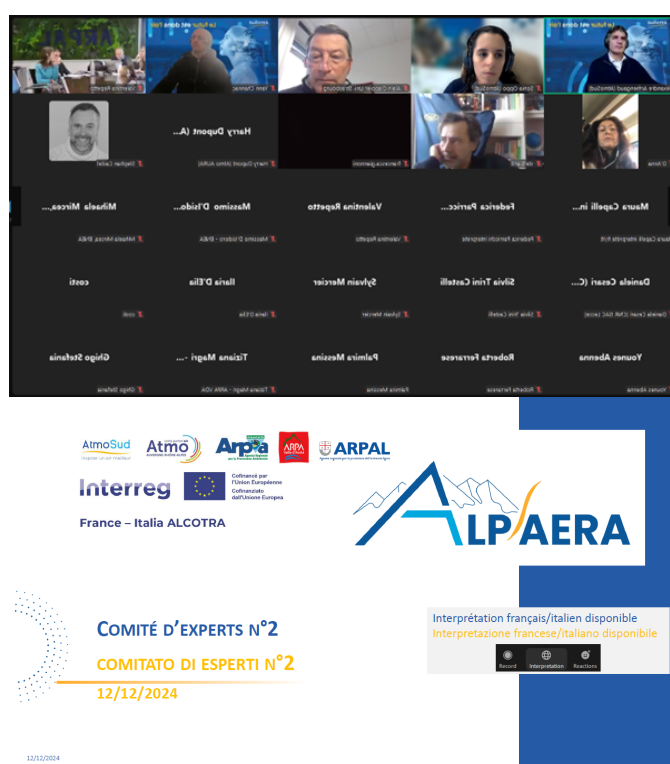
## Le comité d'experts du projet ALP'AERA : un dialogue entre science et territoire

Depuis son lancement, le projet européen ALP'AERA s'est doté d'un comité d'experts pour appuyer sa démarche scientifique. Ce comité, composé de chercheurs et d'experts en qualité de l'air et en climat, se réunit deux fois par an en visioconférence. Il a pour objectif d'éclairer les orientations du projet, de débattre des résultats scientifiques produits et de renforcer les liens entre le monde de la recherche et les partenaires du projet. Les échanges sont organisés de manière à favoriser l'interdisciplinarité et le dialogue franco-italien, grâce à une traduction simultanée.

Lors du premier comité d'experts, en juin 2024, les discussions ont porté sur le lien entre les émissions de polluants atmosphériques et les conditions météorologiques, dans un contexte de changement climatique. L'impact de secteurs tels que le chauffage au bois, la climatisation ou encore le numérique a été évoqué, ainsi que le rôle croissant des émissions biogéniques. Les experts ont également débattu des premières modélisations de qualité de l'air à l'horizon 2050 et 2070.

Le second comité, en décembre 2024, s'est focalisé sur la problématique de l'ozone, un polluant secondaire particulièrement sensible aux conditions météorologiques. Les dynamiques récentes de l'ozone ont été analysées : si les pics estivaux diminuent, les concentrations moyennes restent préoccupantes. Les discussions ont aussi porté sur l'influence du changement climatique, ainsi que sur les apports transfrontaliers d'ozone au sein de la zone ALCOTRA.

Le troisième comité, en juillet 2025, a permis d'approfondir les projections climatiques à moyen et long terme, à partir de scénarios SSP1-2.6 e SSP3-7.0. Le Centre euro-Méditerranéen sur le Changement Climatique (CMCC) a présenté les tendances attendues en matière de réchauffement et de sécheresse. Ces scénarios servent de base aux modélisations de la qualité de l'air, en particulier pour les particules fines, dont le rôle est central à la fois pour la santé publique et pour le climat.



*Sessions de visioconférence du comité d'experts ALPAERA*

Ces trois rendez-vous ont permis de renforcer la rigueur scientifique du projet et d'alimenter les réflexions stratégiques sur les politiques publiques à mener face aux enjeux conjoints de la qualité de l'air et du changement climatique. Le comité d'experts constitue désormais un pilier structurant d'ALPAERA, garantissant une approche intégrée et concertée.

Le prochain comité d'experts aura lieu en décembre 2025 et réunira à nouveau des scientifiques spécialisés dans les thématiques du projet.

Tous les rapports du Comité sont disponibles sur le site web du projet dans la section des rapports avec le lien: <https://www.alpaera.eu/report-progetto-alpaera.php?lang=fr>

## À la découverte du projet : focus sur les activités de surveillance

Dans cette rubrique, nous vous présentons les activités les plus significatives du projet. Dans cette deuxième édition de la newsletter, nous poursuivons avec la présentation des actions du WP3, dont l'objectif est la densification des points de mesure des polluants atmosphériques dans la zone ALCOTRA.

### LA SURVEILLANCE DE L'OZONE EN LIGURIE

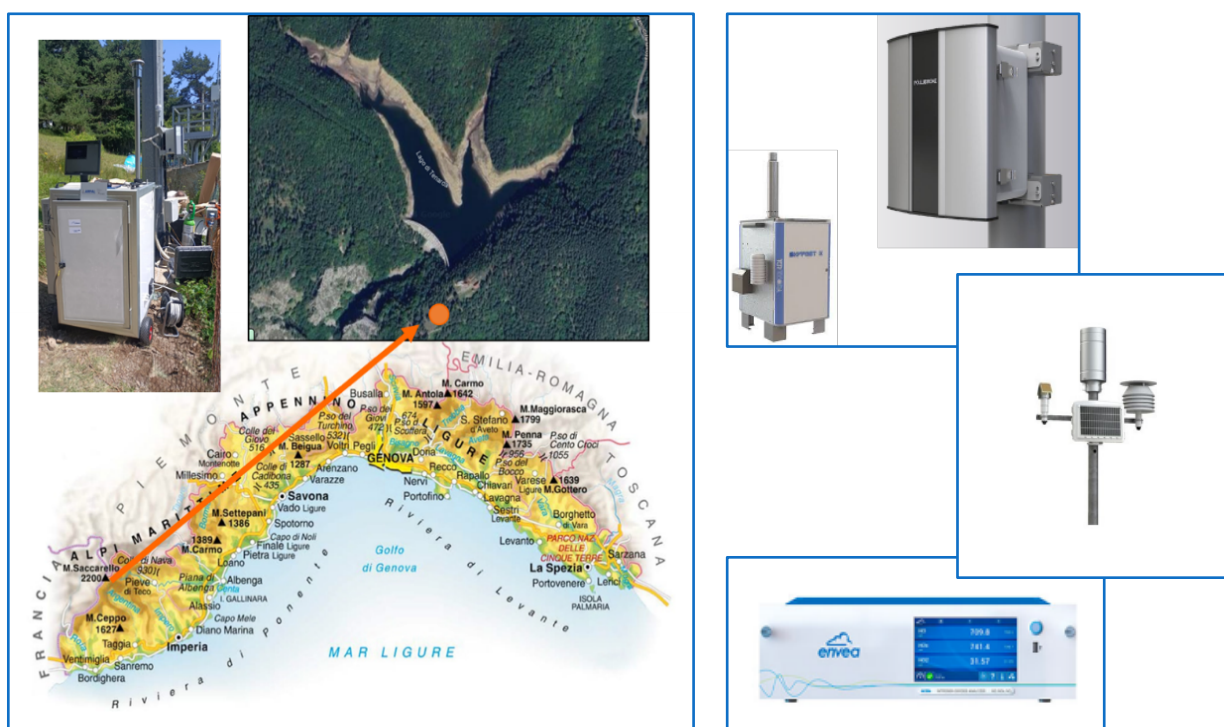
L'action du Projet WP3 prévoit le renforcement du réseau de surveillance des polluants atmosphériques dans les départements alpins par la mise en œuvre de mesures permanentes et temporaires d'oxydes d'azote, d'ozone, de black carbon et de particules pour l'amélioration de l'évaluation de l'exposition des populations.

Dans le cadre de cette action, ARPAL s'est consacrée à l'approfondissement des dynamiques qui régissent les processus de formation et d'élimination dans l'atmosphère du polluant OZONE (O<sub>3</sub>) et de ses précurseurs (OXYDES d'AZOTE, en particulier). L'OZONE est un gaz toxique, constitué de molécules instables formées de 3 atomes d'oxygène qui se scindent facilement. C'est un oxydant énergétique et pour les êtres vivants un gaz hautement toxique. Les molécules de ce composé situées dans la stratosphère (la couche d'atmosphère de 10 à 40 km au-dessus de la surface terrestre) sont continuellement générées et détruites par les radiations UV (ultraviolettes) et sont essentielles pour la vie sur Terre car elles représentent un véritable écran contre les dangereuses radiations ultraviolettes (rayons UV) provenant du Soleil.

L'OZONE troposphérique, celui qui se trouve dans la bande atmosphérique en contact direct avec la surface terrestre, est en revanche un polluant secondaire qui se forme suite à des réactions chimiques qui se produisent dans l'atmosphère à partir des précurseurs, en particulier OXYDES d'AZOTE (NO<sub>x</sub>) et Composés Organiques Volatils (COV). Ces réactions sont favorisées par le fort rayonnement solaire et les températures élevées et conduisent à la formation de différents polluants (smog photochimique). La pollution par l'OZONE est un phénomène caractéristique de la période estivale et les concentrations les plus élevées sont généralement relevées aux heures de l'après-midi et dans les zones suburbaines situées sous le vent par rapport aux principales zones urbaines.

Le plan de surveillance du Projet ALP'AERA a donc prévu deux campagnes saisonnières estivales distinctes, la première commencée en juillet 2024 et terminée en octobre de la même année, la seconde commencée en mai de cette année et actuellement en cours, précisément pour étudier la dynamique des concentrations d'O<sub>3</sub> dans une portion de région aussi sensible que peu étudiée de ce point de vue.

La station principale a été identifiée dans la Commune de PIGNA (IM) au lieu-dit COLLE BELENDIA, afin de mieux surveiller l'OZONE dans un contexte purement rural. Sur ce site a été installée une minicabine, équipée d'analyseurs certifiés d'O<sub>3</sub> et d'OXYDES d'AZOTE (NO<sub>x</sub>), un mât météo muni des principaux capteurs (température, humidité, pression atmosphérique et rayonnement solaire), un échantillonneur de poussières et un SMART SENSOR (instrumentation non conventionnelle pour la mesure des polluants atmosphériques, munie de microcapteurs pour O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, PM et Composés Organiques Volatils).



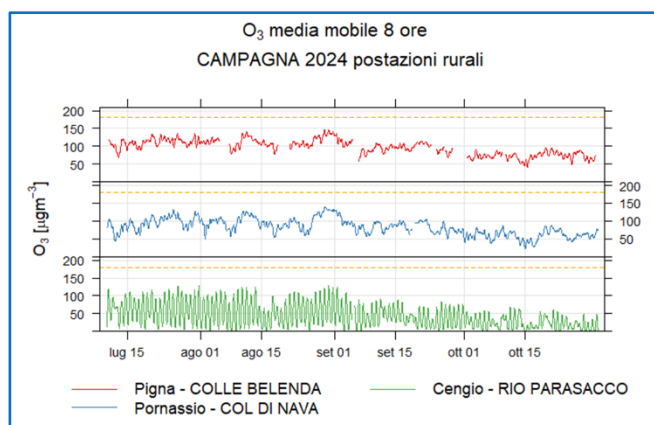
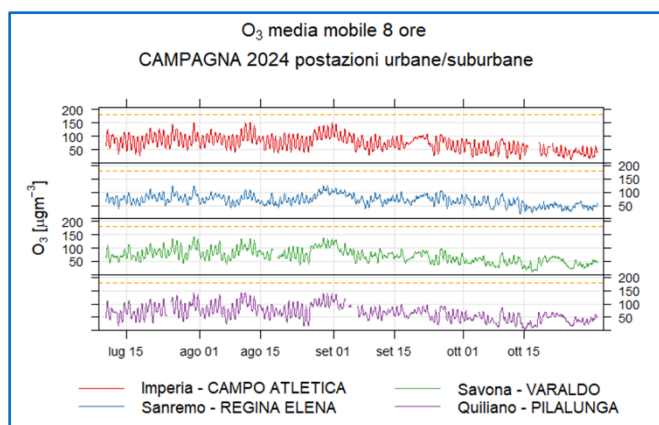
SITE DE PIGNA – COLLE BELENDIA et instrumentation installée

Un site de surveillance supplémentaire a également été aménagé en milieu urbain dans la ville d'IMPERIA au lieu-dit CAMPO ATLETICA, afin d'évaluer l'évolution des concentrations des principaux polluants à plus grande échelle, avec une référence particulière aux zones les plus anthropisées présentes sur la côte et au transport d'O<sub>3</sub> à plus grande distance.

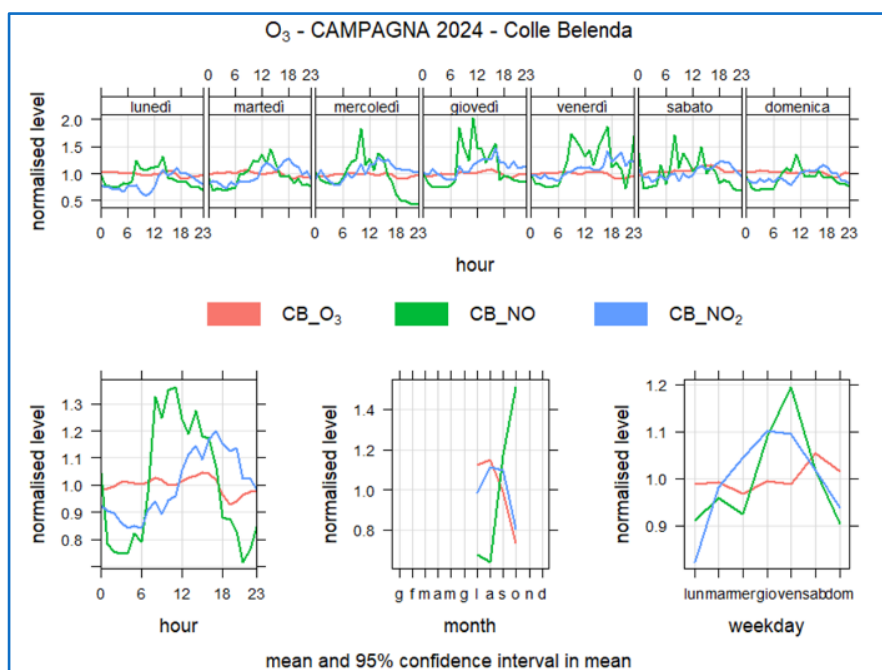


### SITE DE IMPERIA – CAMPO ATLETICA et instrumentation installée

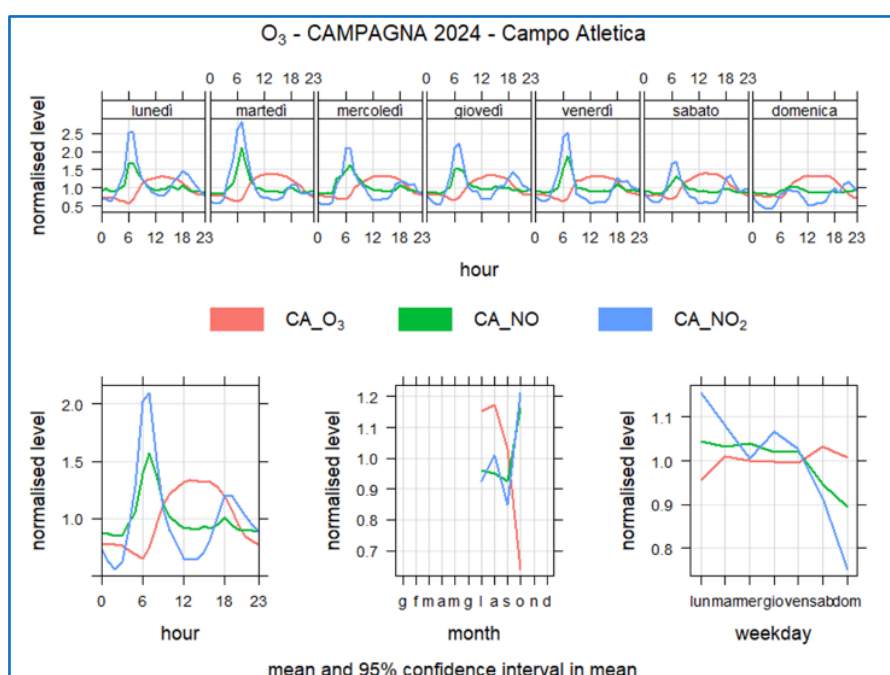
La première campagne saisonnière, menée au cours de la saison printanière-estivale 2024, a mis en évidence le respect de la valeur du SEUIL D'INFORMATION ( $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) pour le polluant  $\text{O}_3$ , prévue par la réglementation actuelle en vigueur (D.Lgs 155/2010) auprès des deux stations examinées ; la comparaison effectuée avec d'autres sites régionaux de typologie analogue a montré que l'évolution des concentrations a été la même, confirmant la distribution homogène de ce polluant sur le territoire régional.



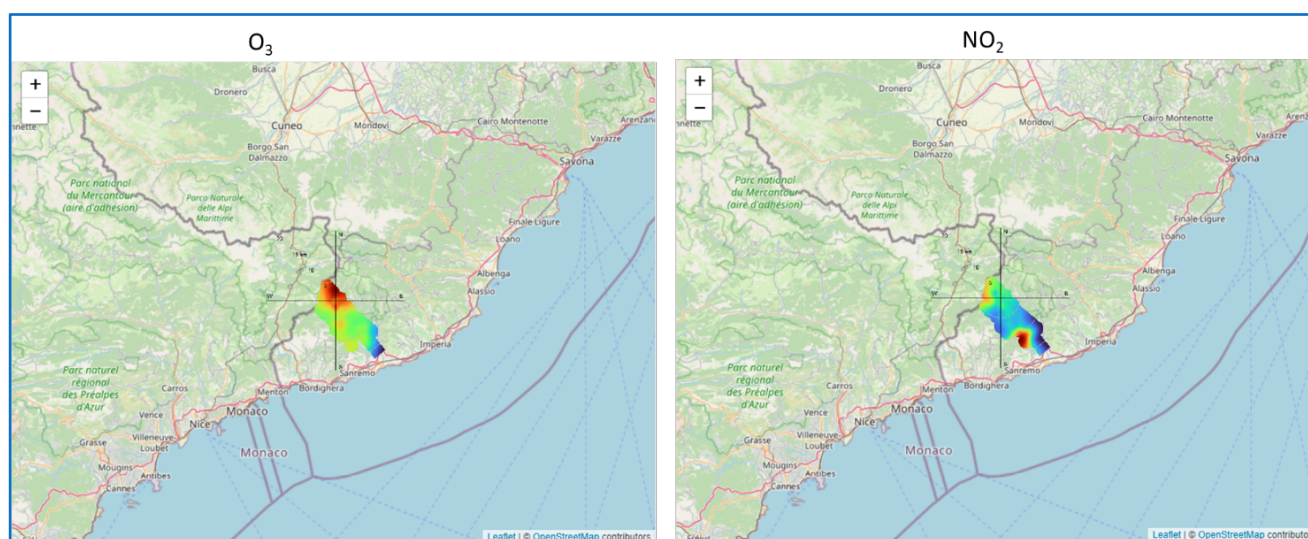
En analysant les données collectées au site de PIGNA, on a noté une relation inverse entre O<sub>3</sub> et NO<sub>x</sub> plutôt atténuée, ainsi que les variations de concentration journalières et mensuelles ; on met donc en évidence une dynamique des concentrations d'O<sub>3</sub> complexe, davantage influencée par les variables météo climatiques.



Les données collectées au site urbain d'IMPERIA montrent en revanche une relation inverse bien plus forte entre O<sub>3</sub> et NO<sub>x</sub>, précisément en raison de la présence d'un plus grand nombre de sources polluantes dans la zone, capables donc de déclencher les processus chimiques de formation/destruction de la molécule d'O<sub>3</sub> elle-même.



Les évaluations relatives à la distribution des concentrations d'O<sub>3</sub> et de NO<sub>x</sub> (spécifiquement le DIOXYDE d'AZOTE) en relation avec la direction et l'intensité du vent mesurées au site du Projet de PIGNA ont été d'un intérêt particulier. En ce qui concerne le polluant O<sub>3</sub>, on note que les concentrations les plus élevées, thématiques dans les graphiques en couleur rouge, sont mesurées en présence de ventilation de faible intensité provenant principalement des quadrants septentrionaux, montrant donc des processus de transport à longue distance plutôt contenus. La situation constatée pour les NO<sub>x</sub> est en revanche diamétralement opposée, elle présente les concentrations les plus élevées en correspondance avec des ventilations plus soutenues des quadrants méridionaux, indice donc de la présence de phénomènes de transport à distance depuis les zones les plus urbanisées.



Pendant la campagne en cours, ces thématiques seront donc approfondies, en comparant les données collectées dans le cadre du Projet avec celles du Réseau de Surveillance Régional. L'objectif sera d'étudier les tendances pluriannuelles des concentrations d'OZONE et l'influence des variables météo-climatiques et des précurseurs, en utilisant également une instrumentation non conventionnelle (SMART SENSOR, actuellement encore en phase d'expérimentation et de calibrage).

## LA SURVEILLANCE DE L'OZONE ET DE SES PRECURSEURS EN VALLEE D'AOSTE

L'ozone est le seul polluant qui, ces dernières années, continue d'avoir des niveaux supérieurs aux valeurs limites prévues par la réglementation et pour cette raison ARPA VDA a mis en place un réseau constitué de 4 stations low-cost de la société AQMesh (<https://www.aqmesh.com/>), équipées de capteurs pour la mesure de l'ozone, des oxydes d'azote et des composés organiques volatils.

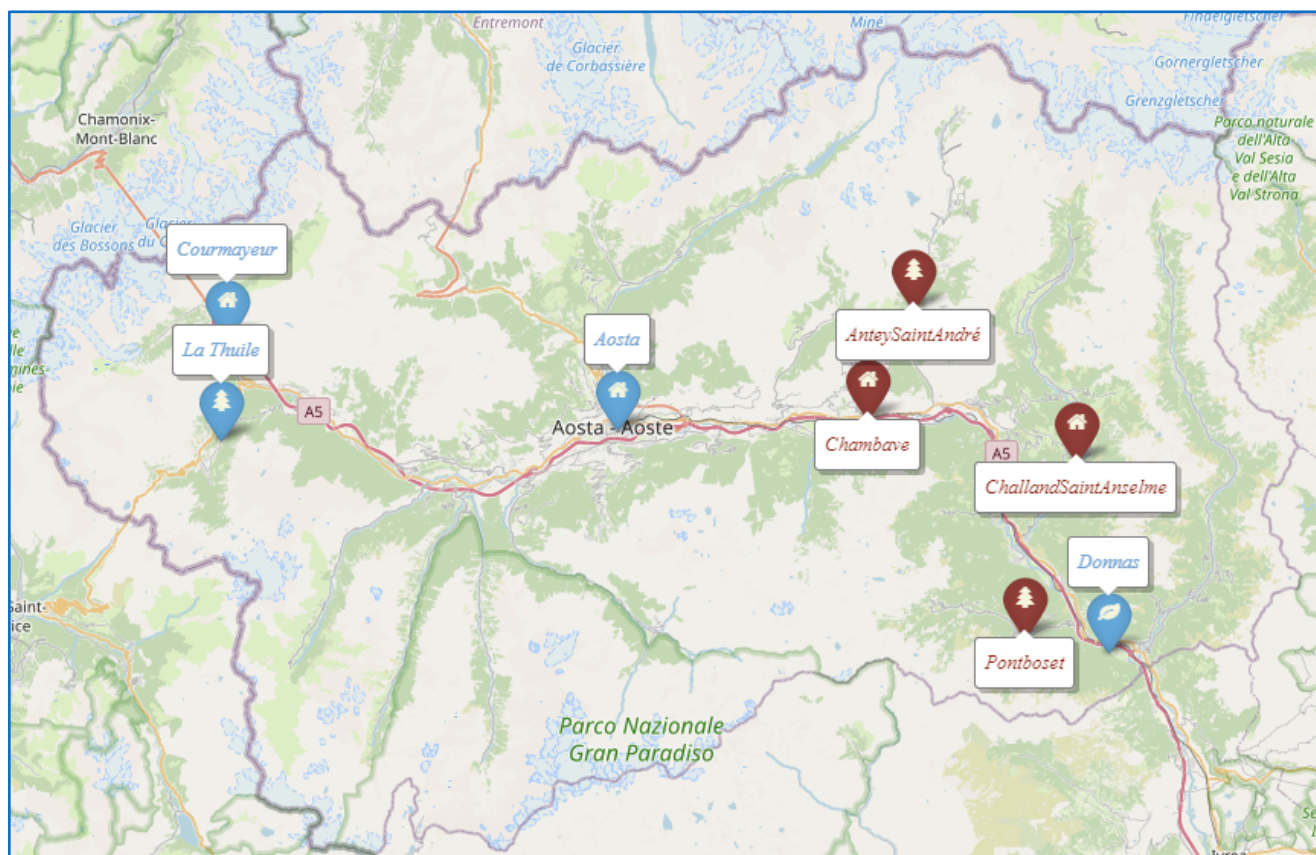


Les stations AQMesh fournissent des mesures des polluants conformes aux objectifs de performance et aux spécifications publiés par l'EPA (USA) et le CEN.

Sensor	Type	Units	Range	LOD	LOC	Precision	Accuracy
<b>O3</b>	Elettrochemical	ppb or $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0-1700 ppb	<1 ppb	<5 ppb	>0.9	5 ppb
<b>NO2</b>	Elettrochemical	ppb or $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0-4900 ppb	<1 ppb	<5 ppb	>0.85	4 ppb
<b>TVOC</b>	Elettrochemical	ppb	0-2500 ppb	<10 ppb	<50 ppb	>0.9	0.05 ppm
<b>Temperature</b>	Solid state	$^{\circ}\text{C}$ or $^{\circ}\text{F}$	-20 to 100 $^{\circ}\text{C}$	0.1 $^{\circ}\text{C}$		>0.9	2 $^{\circ}\text{C}$
<b>Humidity</b>	Solid state	%	0-100%	1%		>0.8	5%

Les stations seront utilisées pour deux campagnes de mesure estivales, une en 2025 et une en 2026. La campagne 2025 vient de se terminer et on peut tirer les premières informations sur les mesures effectuées de juin à septembre dans les 4 sites choisis pour la surveillance :

- Pontboset, 790 m
- Challand-Saint-Anselme, 1038 m
- Antey-Saint-André, 1030 m
- Chambave, 484 m



Les instruments ont fonctionné pendant toute la période prévue, à l'exception de quelques jours entre le 15 et le 17 juillet, lorsque la Vallée d'Aoste a été touchée par des précipitations intenses qui ont provoqué des coupures de courant même prolongées dans différentes localités de la région.

Les mesures des AQMesh ont été comparées avec celles des instruments du réseau de surveillance d'ARPA VDA positionnés dans les stations de :

- Aoste, 580m, urbaine, dans le chef-lieu régional
- Donnas, 341m, rurale, à la frontière avec le Piémont
- La Thuile, 1664 m, rurale, éloignée sud-ouest
- Courmayeur, 1200m, urbaine, fond de vallée ouest

Des premières élaborations des données d'ozone, on peut conclure que :

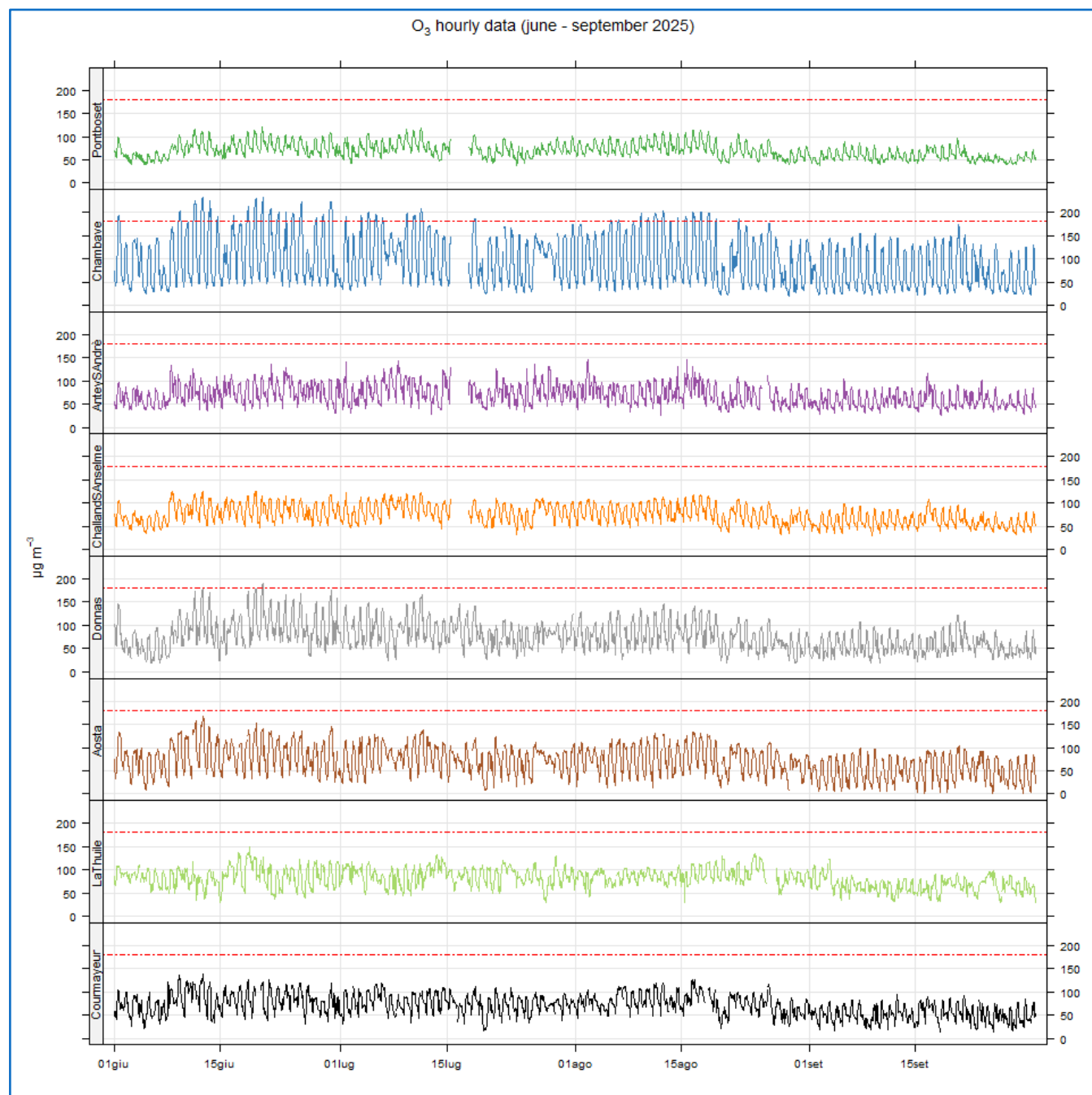
- Le capteur d'ozone de la station de Chambave a probablement surestimé les mesures<sup>1</sup>
- Les valeurs les plus élevées ont été mesurées au mois de juin, avec 4 dépassements à Donnas du seuil d'information (valeur moyenne horaire de 180 µg/m<sup>3</sup>)
- Sur la période mai-septembre, la valeur cible pour le maximum journalier de la moyenne mobile sur 8 heures (valeur moyenne horaire de 120 µg/m<sup>3</sup>) a été dépassée 35 fois à Donnas, 20 fois à Aoste, 8 fois à La Thuile, 6 fois à Antey-Saint-André, 4 fois à Courmayeur, 1 fois à Challand-Saint-Anselme

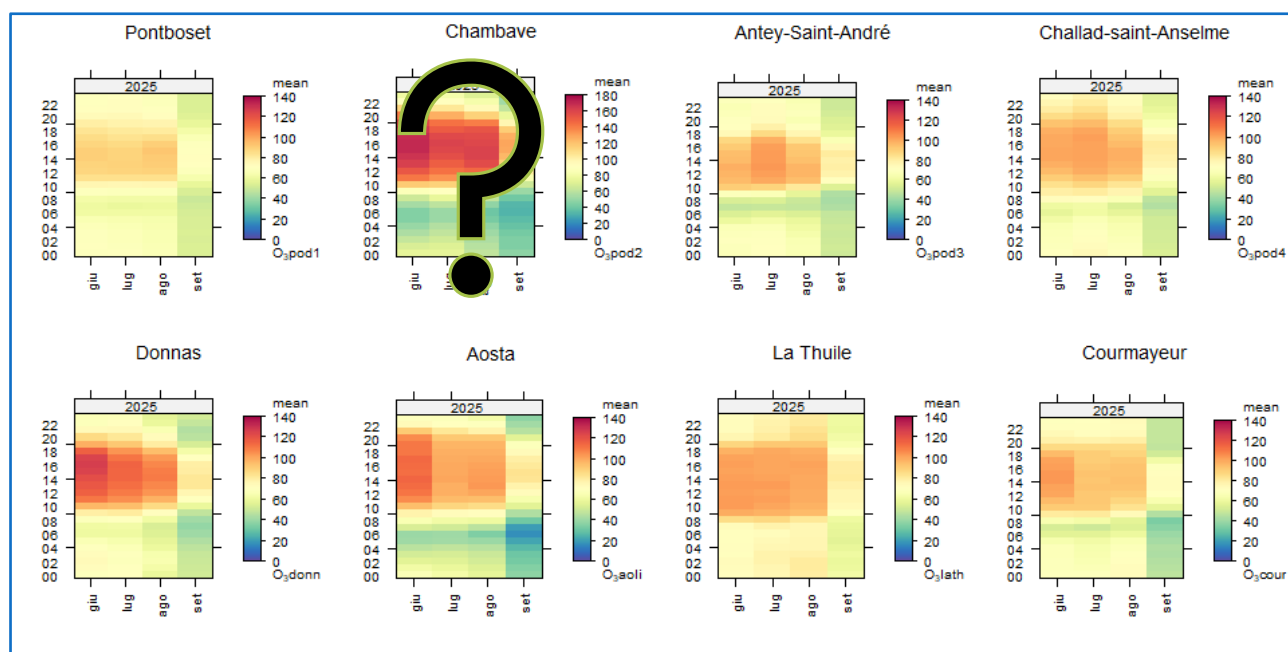
Tous les instruments seront réinstallés dans la station de Donnas pour une intercomparaison avec les instruments de station ; à la fin de l'intercomparaison, des corrections supplémentaires seront effectuées, en considérant également les conditions météorologiques dans les sites de mesure.

Statistiques de la période juin-septembre	Moyenne	Jours avec maximum de la moyenne mobile supérieur à 120	Heures avec moyenne horaire supérieure à 180
Pontboset	70	0	0
<b>Chambave</b>	<b>95</b>	<b>94</b>	<b>231</b>
Antey-Saint-André	70	3	0
Challand-Saint-Anselme	75	1	0
Donnas	76	33	4
Aosta	71	19	0
La Thuile	81	7	0
Courmayeur	71	3	0

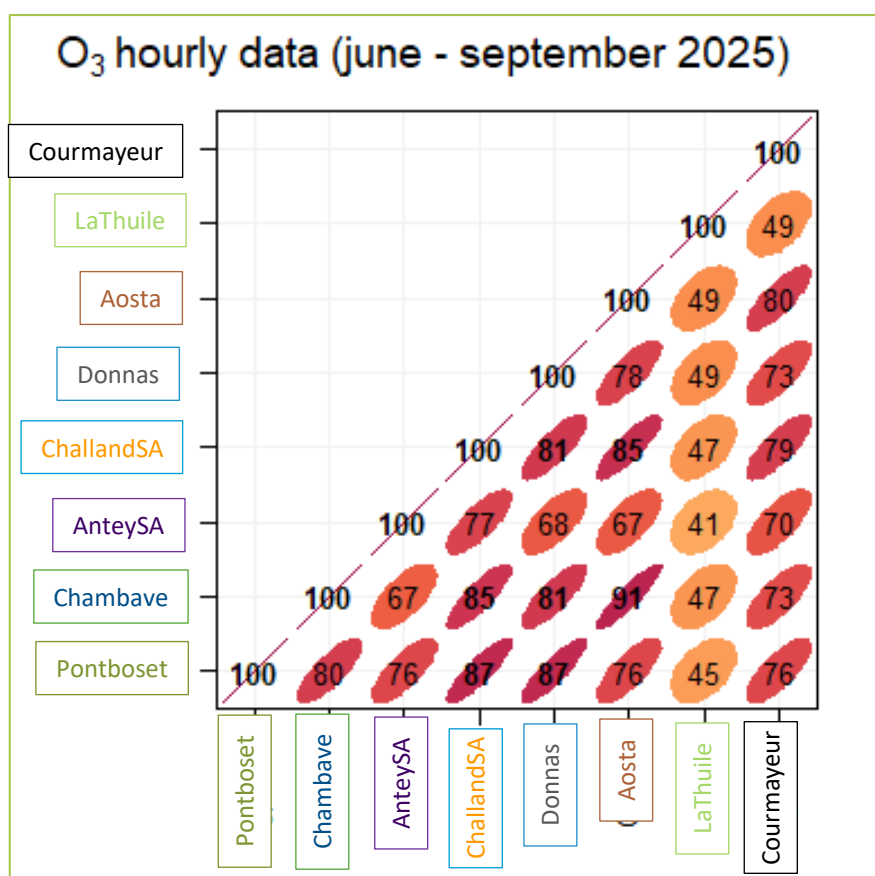
<sup>1</sup> Previsto un interconfronto nella stazione di Donnas per verificare questa ipotesi ed eventualmente correggere le misure

**Tableau 1: statistiques des mesures d'ozone relatives à la période juin - septembre 2025**



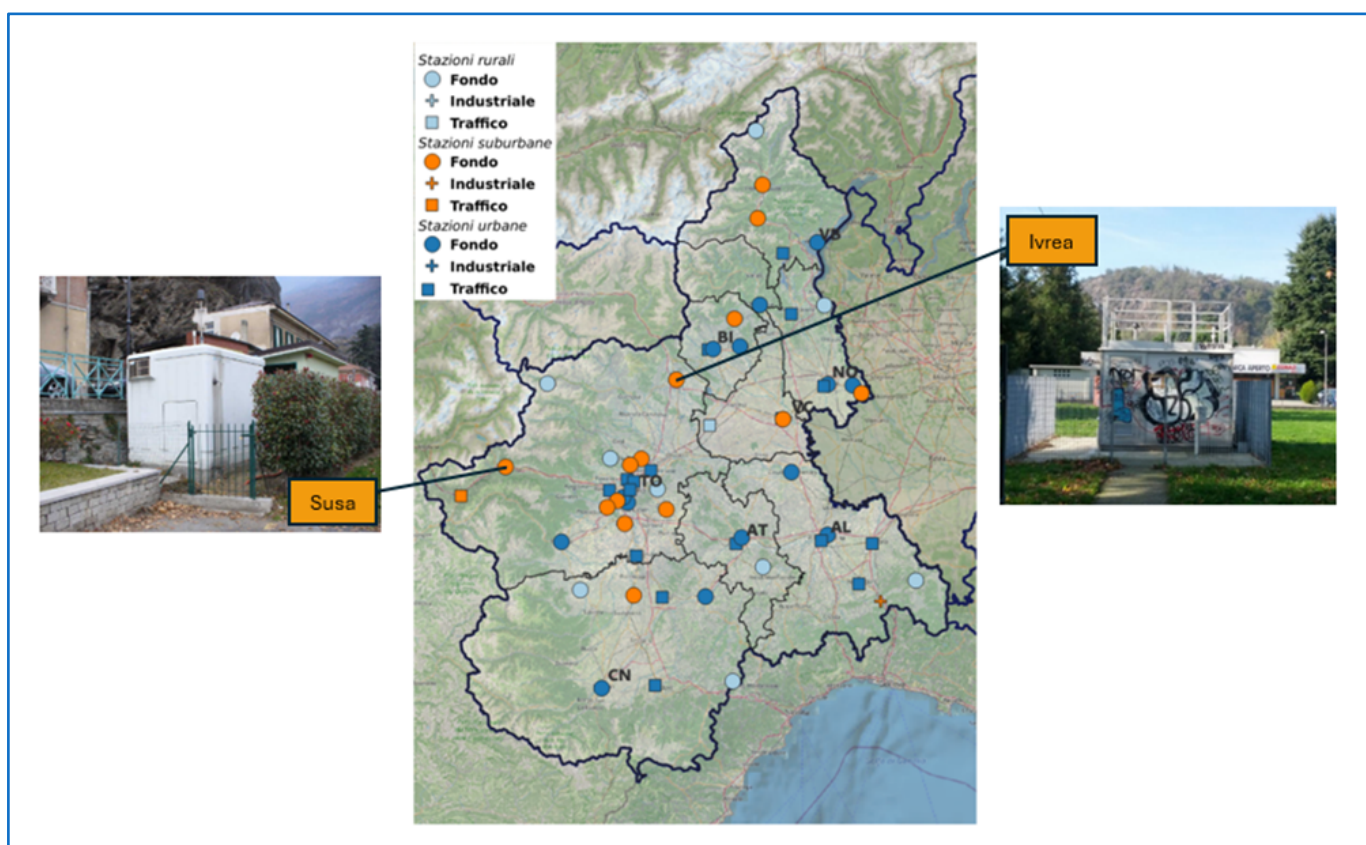
**Concentrations moyennes horaires d'ozone de juin à septembre 2025.**

**Graphique du jour type mensuel : ce type de graphique confirme également que les valeurs d'ozone les plus élevées ont été mesurées au mois de juin, dans tous les sites.**



## CAMPAGNE DE MESURE ET INSTRUMENTS BLACK CARBON

En décembre 2024, Arpa Piemonte a installé dans les stations de fond suburbain d'Ivrea-Liberazione et de Susa-Repubblica, situées respectivement à proximité de l'entrée de la Vallée d'Aoste et dans le tronçon terminal de la Basse Vallée de Susse, deux analyseurs AE36, dans le but de mesurer le Black Carbon, polluant primaire émis sous forme de suie, lors de la combustion incomplète de combustibles fossiles et de la biomasse provenant de sources naturelles et anthropiques. Le BC est l'un des principaux composants des particules fines (PM2.5) et se présente sous forme de particules microscopiques qui absorbent fortement la lumière.



Le BC est potentiellement dangereux pour la santé humaine, mais aussi pour le climat de la planète. En effet, bien qu'il ne persiste pas longtemps dans l'atmosphère comme le dioxyde de carbone, il piège la chaleur 680 fois plus que le CO<sub>2</sub>, contribuant de manière importante au réchauffement global et déterminant des effets sur les changements climatiques. Même s'il est émis dans des zones urbaines ou industrielles, le BC peut être transporté par les vents jusqu'aux Alpes, s'accumulant dans des zones sensibles du point de vue climatique où il réchauffe l'atmosphère et, en se déposant sur des surfaces enneigées ou glacées, réduit l'albédo en accélérant leur fonte.

Le Black Carbon est surveillé dans le cadre du projet Alp'Aera car les vallées alpines, souvent sujettes à la stagnation de l'air en hiver, peuvent accumuler des polluants, aggravant la qualité de l'air local. De plus, l'objectif est de fournir des données harmonisées et comparables entre différents pays alpins afin de définir des stratégies d'atténuation tant locales que transfrontalières.

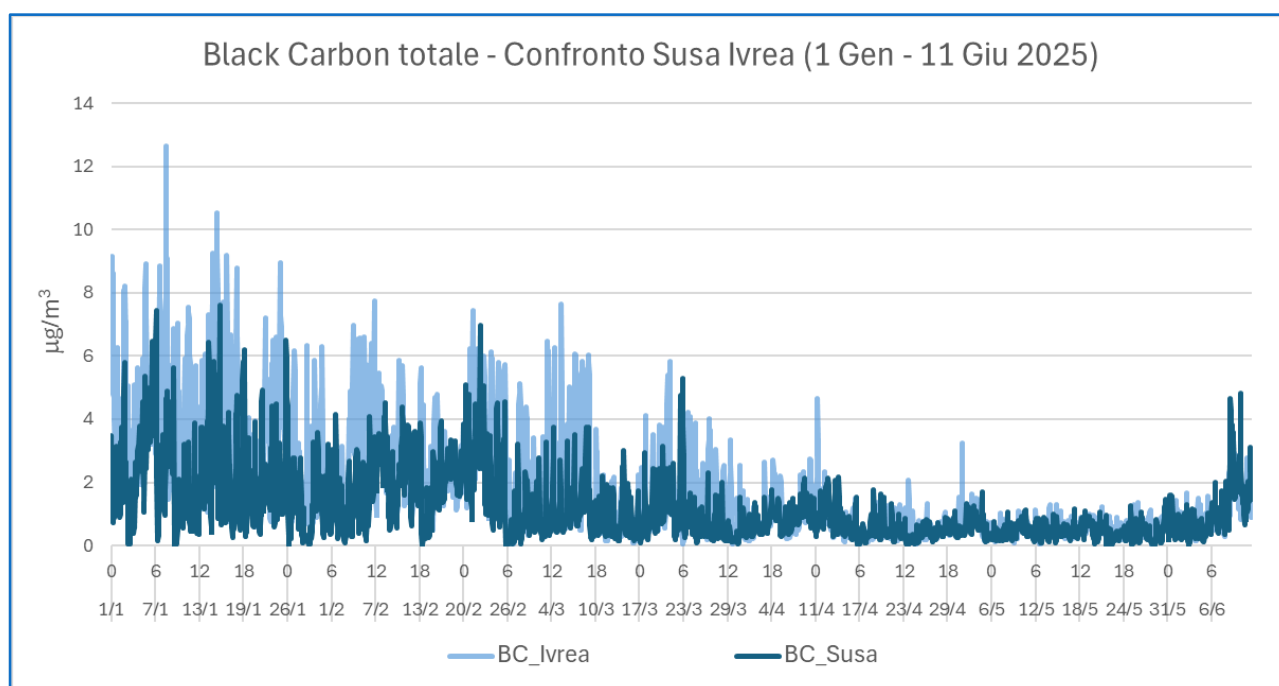
## Instrument

La mesure du BC est effectuée en utilisant l'étalomètre AE36s qui permet de mesurer en continu, sur un filtre spécial, le coefficient d'absorption de l'aérosol à 7 longueurs d'onde, de l'UV à l'IR (370-950 nm). L'instrument fournit la concentration de BC basée sur l'atténuation du rayonnement lumineux avec une longueur d'onde de 880 nm et estime la répartition des deux composantes principales : de la combustion de biomasse et des combustibles fossiles.



## Premiers résultats du monitoring

Le monitoring continu du BC met en évidence une variabilité saisonnière significative avec des valeurs maximales en période hivernale et en diminution en période plus chaude, tendance corrélée à celle du PM2.5.



Les valeurs en croissance entre le 8 et le 10 juin sont attribuables au transport de suie provenant des vastes incendies survenus au Canada au début juin.

Dans le rapport final seront approfondies les tendances des deux composantes du BC et seront comparées avec les données surveillées dans d'autres sites du Piémont et du projet Alp'Aera.

## Drones et qualité de l'air : les activités de surveillance dans les territoires alpins

Dans le cadre du projet européen ALP'AERA, les partenaires Atmo AURA et AtmoSud développent des méthodologies innovantes pour la surveillance de la qualité de l'air à travers l'utilisation de drones équipés de capteurs avancés. Ces activités visent à combler les lacunes de connaissance dans les zones alpines, territoires souvent difficilement accessibles avec les techniques de surveillance traditionnelles.

### Les expérimentations d'Atmo AURA en Haute-Savoie

Au début de février, l'équipe d'Atmo AURA composée des experts Jacky, Mathilde et Harry a mené une mission expérimentale près de Bonneville, en Haute-Savoie. L'objectif de la campagne était de tester l'emploi de drones pour l'analyse de la qualité de l'air en conditions opérationnelles réelles.



Deux types d'expériences ont été réalisés : la première a concerné la surveillance des émissions d'une cheminée à bois en conditions réelles d'utilisation, tandis que la seconde a prévu l'exécution de mesures verticales pour caractériser les profils de concentration des polluants en altitude.



Cette expérimentation a permis d'investiguer de manière spécifique les émissions du chauffage au bois, une source significative de particules fines (PM2.5) dans les territoires montagnards pendant la saison hivernale. Les résultats attendus de ces mesures devraient permettre une meilleure cartographie et une surveillance plus efficace de la qualité de l'air, ouvrant également à de nouvelles applications potentielles, en particulier pour la surveillance des sites industriels en cas d'accidents ou pour le monitoring des épisodes de pollution aiguë.

### Le développement technologique d'AtmoSud

AtmoSud, en tant que chef de file du projet ALP'AERA, mène un développement technologique significatif en collaboration avec AirCarto. L'objectif est d'équiper les drones de capteurs innovants capables de surveiller non seulement les particules fines, mais aussi des gaz polluants comme l'ozone (O<sub>3</sub>) et les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) dans les zones montagnardes difficilement accessibles des vallées alpines transfrontalières.

Les capteurs MobileAir ont fait l'objet d'une évolution technologique qui a intégré de nouveaux modules pour la mesure de gaz, utilisant des sondes ENVEA pour O<sub>3</sub> et NO<sub>x</sub>, en plus de la sonde NextPM déjà utilisée pour les particules fines.



Avant la phase opérationnelle sur le terrain, ces capteurs traversent une phase de qualification fondamentale à la station de surveillance de Marseille Longchamp. Pendant cette phase, les mesures fournies par les capteurs innovants sont comparées avec celles des instruments de référence de la station, permettant de valider les performances des dispositifs et de procéder à l'ajustement de leur calibrage.

Cette procédure de qualification représente une étape cruciale pour garantir la fiabilité des données collectées, prérequis indispensable pour un emploi ultérieur dans des zones isolées où il n'est pas possible d'effectuer des comparaisons directes avec une instrumentation de référence.

### **Perspectives et applications**

Les activités menées par Atmo AURA et AtmoSud dans le projet ALP'AERA représentent une approche complémentaire à la surveillance de la qualité de l'air dans les territoires alpins. D'une part, les expérimentations sur le terrain d'Atmo AURA permettent de tester les applications pratiques et d'investiguer des sources émissives spécifiques. D'autre part, le travail de développement et de qualification instrumentale d'AtmoSud pose les bases pour un emploi systématique et fiable de ces instruments innovants.

L'emploi des drones pour la surveillance de la qualité de l'air offre des avantages significatifs dans les contextes montagnards : il permet d'atteindre des zones autrement inaccessibles, d'effectuer des mesures à différentes altitudes pour caractériser les profils verticaux des polluants, et d'intervenir rapidement dans des situations d'urgence. Ces caractéristiques rendent cette technologie particulièrement prometteuse pour une meilleure compréhension des dynamiques de pollution atmosphérique dans les territoires alpins transfrontaliers, où les conditions orographiques complexes influencent significativement la dispersion et l'accumulation des polluants.

## L'évaluation de l'impact des changements climatiques sur la qualité de l'air

L'un des principaux objectifs du projet ALP'AERA est de caractériser l'impact des changements climatiques sur la qualité de l'air future dans la région ALCOTRA. Cela permettra de déterminer la sensibilité de la zone aux changements climatiques et, en même temps, d'identifier les leviers d'intervention les plus pertinents pour préserver la qualité de l'air future.

L'impact des changements climatiques sur la qualité de l'air est évalué dans l'action WP5, coordonnée par ARPA Piemonte, à travers l'outil des analyses de scénario. Un scénario est une représentation complète et cohérente d'un futur possible compte tenu de certaines hypothèses et en utilisant une méthodologie donnée. Les scénarios de qualité de l'air, en particulier, aident à comprendre comment différents facteurs, tels que les émissions, les conditions météorologiques et les politiques environnementales, peuvent influencer la qualité de l'air à court ou long terme.

La principale méthodologie adoptée par la communauté scientifique pour la création des scénarios se base sur l'utilisation des modèles de chimie et transport (CHEMICAL TRANSPORT MODELS, CTMs). Les CTMs sont des modèles numériques tridimensionnels qui simulent le comportement des polluants atmosphériques sur des échelles qui peuvent varier du niveau local/urbain à celui régional, national et même global et représentent la complexité du système atmosphérique de manière réaliste :

- simulant comment les polluants sont transportés dans l'atmosphère par le vent (advection) et comment ils se dispersent, horizontalement et verticalement, à cause de la turbulence atmosphérique ;
- incorporant des mécanismes chimiques complexes qui décrivent les réactions chimiques et photochimiques (déclenchées par la lumière solaire) qui se produisent dans l'atmosphère entre les différents polluants et qui conduisent à la formation des polluants secondaires (comme l'ozone et, en partie, les particules atmosphériques et les oxydes d'azote).

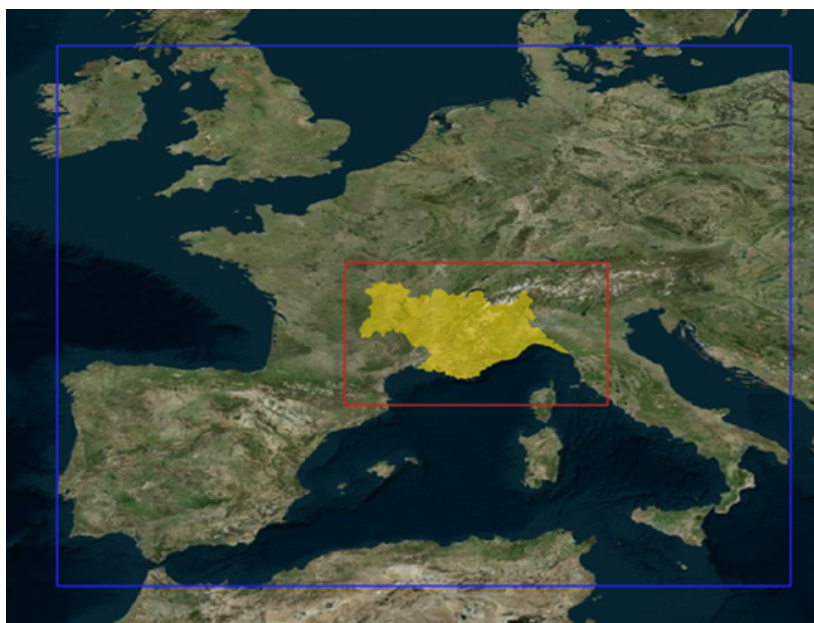
Avec un grand potentiel, ces modèles nécessitent, pour fonctionner, une série d'entrées détaillées :

- Des données météorologiques : champs tridimensionnels et temporellement résolus de variables météorologiques comme la vitesse et la direction du vent, la température, l'humidité, le rayonnement solaire, la pression atmosphérique, les précipitations et les paramètres de la turbulence atmosphérique ;
- Des données d'émissions (inventaires des émissions) : données géoréférencées et temporellement résolues sur les émissions de toutes les espèces chimiques traitées par le mécanisme chimique du modèle CTM ;
- Des conditions aux limites et initiales, c'est-à-dire les valeurs de concentration de tous les polluants traités par le mécanisme chimique (ou des principaux d'entre eux) aux bords du domaine de calcul et au début de la simulation ;

- orographie et utilisation du sol : informations géoréférencées sur la topographie du terrain et sur les caractéristiques de la surface (type de végétation, présence de plans d'eau, zones urbaines), qui influencent les dynamiques atmosphériques et de dispersion des polluants.

L'utilisation d'un modèle de chimie et transport présuppose donc l'implémentation d'un système modélisé, un ensemble intégré de différents modules capables de traiter toutes les données requises par le modèle lui-même.

En particulier, dans ALP'AERA, dans l'action WP5, on utilise le système modélisé<sup>2</sup> implémenté et géré opérationnellement par ARPA Piemonte, basé sur l'application du modèle de chimie et transport FARM (Flexible Air Regional Model)<sup>3</sup>.



**Figure 1** : domaines de simulations pour les analyses de scénario.

Les simulations de scénario sont effectuées sur deux domaines représentés en Figure 1: le principal est le domaine cible, le domaine à résolution majeure (environ 3km) qui comprend tout le territoire des régions ALCOTRA (indiqué en rouge en Figure 1), le second est le domaine le plus externe à résolution mineure (environ 12km) qui comprend toute l'Europe centro-occidentale et une partie de l'Afrique du Nord (domaine EUROPÉEN indiqué en bleu en Figure 1) et est fonctionnel pour fournir les données de conditions aux limites au domaine cible.

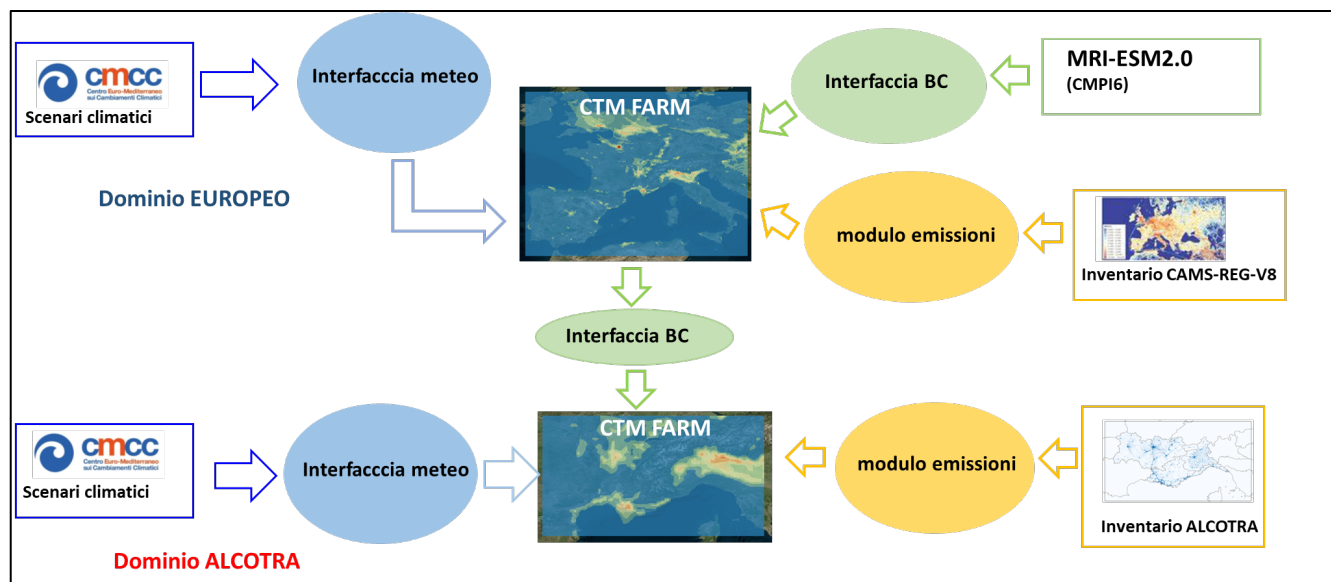
Les périodes de simulation prises en considération dans l'analyse de scénario sont trois :

- le scénario de référence (historique), centré sur 2015, qui comprend les années de 2010 à 2019 ;
- le scénario futur à moyen terme, centré sur 2050, qui comprend les années de 2045 à 2054 ;
- le scénario futur à long terme, centré sur 2070, qui comprend les années de 2065 à 2074.

<sup>2</sup>, <https://www.arpa.piemonte.it/scheda-informativa/sistema-modellistico-valutazione-previsione>

<sup>3</sup> <http://www.farm-model.org/>

Chaque scénario a été simulé avec le système modélisé d'ARPA Piemonte synthétiquement représenté en Figure 2 pour une période consécutive de dix ans, centrée autour de l'année de référence.



**Figure 2 :** schéma conceptuel du système de modélisation utilisé pour les analyses de scénario.

Voyons maintenant plus en détail les différentes composantes de la chaîne de modélisation et les données qu'elle utilise.

### Les données météorologiques

Les données météorologiques qui alimentent les analyses de scénario du projet ALP'AERA sont en réalité des données de scénarios climatiques. Ces scénarios sont obtenus en utilisant des modèles climatiques, c'est-à-dire des modèles météorologiques qui simulent les conditions futures en considérant non seulement les composantes du système climatique (atmosphère, cryosphère, hydrosphère, utilisation du sol...) mais aussi comment celles-ci sont influencées par les scénarios d'émission de gaz à effet de serre et autres polluants. Ces scénarios futurs sont connus sous le nom de Shared Socioeconomic Pathways (SSPs)<sup>4</sup>, définis dans le Sixième Rapport d'Évaluation sur les changements climatiques (Sixth Assessment Report on climate change, AR6) du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) sur la base de cinq narrations différentes qui décrivent différents parcours possibles de développement de la société, auxquels sont associés différents niveaux de forçage radiatif à l'an 2100.

Pour le projet ALP'AERA, deux de ces cinq scénarios SSP ont été considérés, plus précisément SSP1-2.6 et SSP3-7.0 :

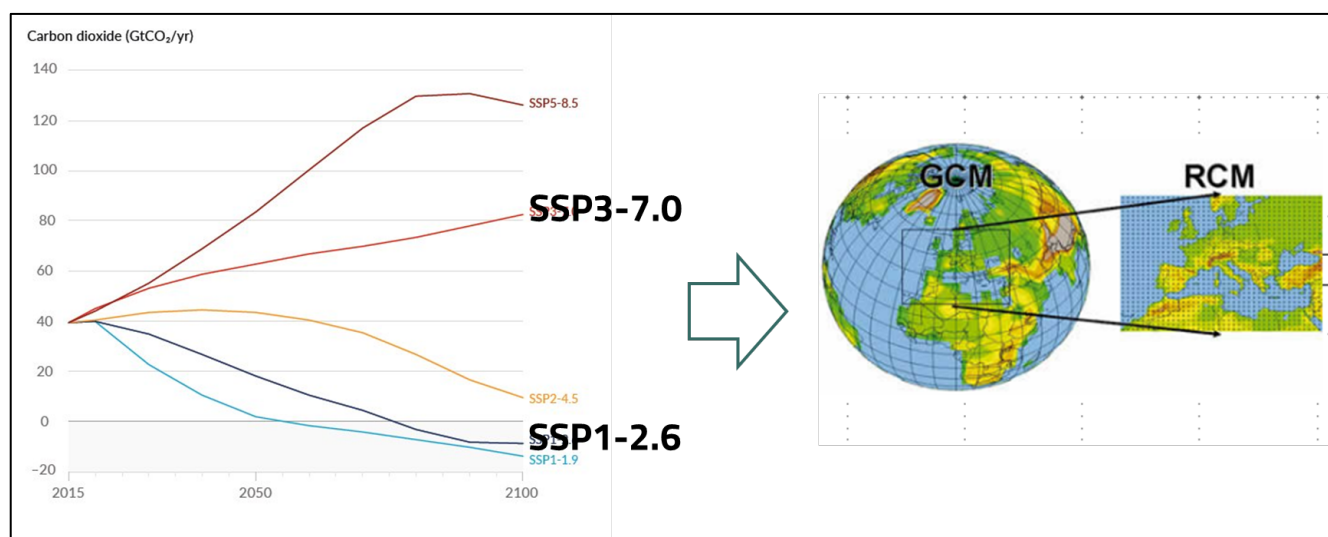
- SSP1-2.6 : avec 2,6 W/m<sup>2</sup> d'ici 2100, prévoit un développement compatible avec l'objectif de contenir le changement climatique dans les 2°C d'augmentation de la température moyenne. Il présuppose l'adoption de mesures de protection du climat, avec des défis minimaux tant en

<sup>4</sup> <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>

termes d'atténuation que d'adaptation grâce à l'innovation technologique rapide, à la distribution équitable des revenus et à la coopération globale vers la durabilité ;

- **SSP3-7.0** : avec 7 W/m<sup>2</sup> d'ici 2100, ce scénario se situe dans la partie moyenne-haute de toute la gamme de scénarios. Il prévoit un développement caractérisé par une rivalité régionale et une inégalité sociale croissante. Il présente donc des défis élevés tant en termes d'atténuation que d'adaptation en raison des politiques nationalistes, du commerce fragmenté et du progrès technologique stagnant.

Pour le projet ALPAERA, les scénarios numériques relatifs aux deux scénarios climatiques choisis, aux deux domaines et aux trois périodes de simulation ont été élaborés par le CMCC, Centre Euro-Méditerranéen pour les Changements Climatiques<sup>5</sup>, en utilisant le modèle COSMO-CLM qui est la version climatique du modèle atmosphérique prévisionnel à méso-échelle opérationnel et non-hydrostatique COSMO-LM, développé par le consortium européen COSMO<sup>6</sup>.



**Figure 3:** downscaling dynamique pour la production des scénarios climatiques

COSMO-CLM est un modèle climatique régional. Les modèles climatiques se divisent principalement en modèles climatiques globaux (GCM) et modèles climatiques régionaux (RCM). Les GCM simulent l'ensemble du système climatique terrestre, incluant atmosphère, océans, terres émergées et cryosphère, avec une résolution spatiale généralement de centaines de kilomètres et sont fondamentaux pour projeter les changements climatiques à grande échelle. Cependant, leur résolution limitée ne permet pas de capturer les détails fins au niveau local ou régional, nécessaires pour les analyses de scénario sur le territoire ALCOTRA. Pour pallier cela, on utilise les RCM, qui effectuent la descente d'échelle (dynamique) des modèles GCM (Figure 3) : les RCM prennent les conditions à leurs frontières des GCM et simulent sur des zones géographiques plus petites, avec une résolution beaucoup plus élevée. Cela permet de représenter avec plus de précision les processus locaux comme la topographie complexe des vallées alpines, les effets des côtes et les phénomènes météorologiques à petite échelle, fournissant des projections climatiques plus détaillées.

<sup>5</sup> <https://www.cmcc.it/>

<sup>6</sup> <https://www.clim-community.eu/>

Les scénarios climatiques produits par le CMCC sont élaborés, selon le schéma de la Figure 2, pour préparer les données numériques d'entrée au modèle de chimie et transport FARM sur les deux domaines de simulation.

### Les données émissives

Parmi les objectifs principaux du projet ALPAERA, la création d'un inventaire des émissions commun à la zone ALCOTRA pour l'année 2019 est primordiale : à partir de cet inventaire, il a été en effet possible de construire l'input émissif au modèle de chimie et transport FARM pour les simulations sur le domaine ALCOTRA, selon le schéma de la Figure 2.

Les inventaires régionaux du Piémont, de la Ligurie et de la Vallée d'Aoste et les cadastres des régions Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur et Auvergne-Rhône-Alpes estiment, sur la base de la connaissance des activités responsables de la formation d'émissions (indicateurs statistiques et variables proxy) et des facteurs d'émission, les quantités émises par les différentes typologies de sources (sources ponctuelles, linéaires et surfaciques) et activités. Comme les données émissives disponibles et partagées sont assez différentes, il a été nécessaire d'effectuer leur harmonisation sur plusieurs plans :

- au niveau des catégories émissives selon les nomenclatures SNAP<sup>7</sup> (Selected Nomenclature for sources of Air Pollution – SNAP 97) et NAPFUE (Nomenclature for Air Pollution of FUEls), développées par l'Union Européenne dans le cadre du programme CORINAIR<sup>8</sup> ;
- à l'échelle géographique, permettant de passer des inventaires régionaux de chaque partenaire (communaux du côté italien et maillés du côté français) à un inventaire spatialisé sur la grille de domaine ;
- au niveau temporel, permettant de caractériser de manière spécifique l'évolution dans le temps des émissions liées aux différentes matrices émissives et de désagréger donc la donnée annuelle de l'inventaire au niveau horaire.

En dehors des régions faisant partie du projet, les émissions avec le plus grand niveau de détail disponible ont été utilisées, à savoir :

- émissions au niveau communal provenant du projet LIFE PREP'AIR<sup>9</sup> pour les régions partenaires du projet (Lombardie, Émilie-Romagne, Vénétie, Province autonome de Trente et Frioul-Vénétie Julienne) référées à l'année 2019 ;
- émissions au niveau provincial estimées par ISPRA<sup>10</sup> pour les autres régions italiennes à l'intérieur du domaine de calcul référées à l'année 2019 ;
- émissions CAMS<sup>11,12</sup>, pour les régions françaises restantes et pour tous les États compris à l'intérieur des domaines de simulation (ALCOTRA et EUROPÉEN), référées à l'année 2019.

En ce qui concerne les émissions naturelles, c'est-à-dire produites par des processus naturels, sans l'intervention directe de l'activité humaine :

<sup>7</sup> <https://www.eea.europa.eu/publications/EMEPCORINAIR4/page009-a.html>

<sup>8</sup> EMEP/EEA air pollutant mission inventory guidebook: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/emep-eea-guidebook-2023>

<sup>9</sup> Progetto PREPAIR – LIFE15 IPE IT013: <https://www.lifeprepare.eu/>

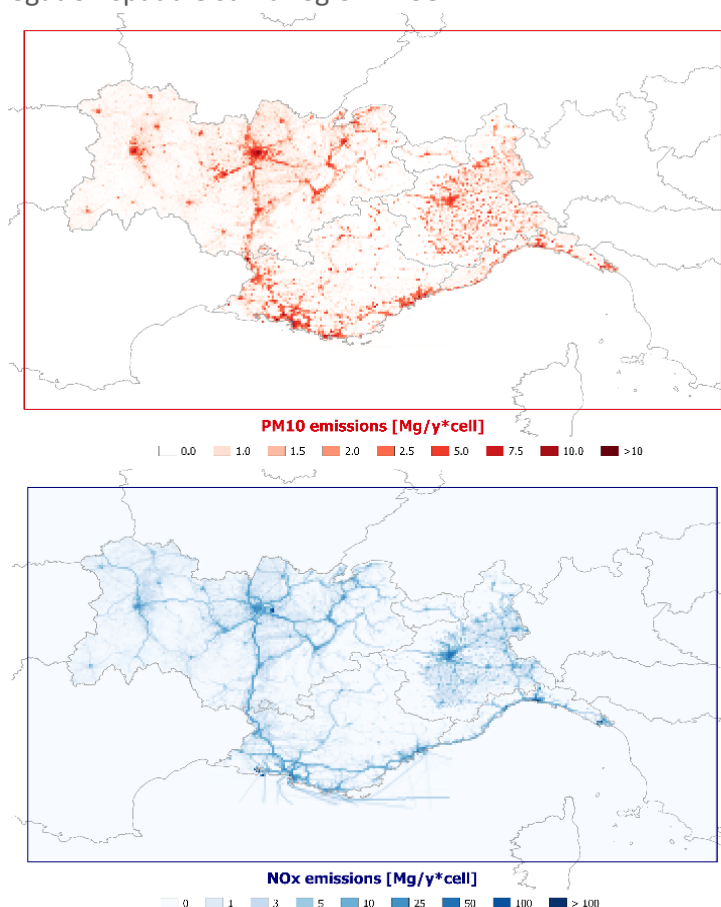
<sup>10</sup> <https://emissioni.sina.isprambiente.it/inventari-locali/>

<sup>11</sup> Copernicus Atmosphere Monitoring Service, <https://atmosphere.copernicus.eu/>

<sup>12</sup> CAMS-REG-ANT v8.0 <https://eccad.sedoo.fr/#/auth/login?redirect=/data>

- les taux relatifs aux émissions biogéniques (c'est-à-dire qui ont pour origine des organismes vivants ou des processus biologiques, et non des sources fossiles) ont été estimés à travers l'utilisation d'un modèle spécifique développé par la communauté scientifique, dénommé MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature)<sup>13</sup> ;
- les émissions de sel marin et de poussières liées aux processus éoliens de re-suspension : elles sont liées au vent, à l'humidité relative, au contenu en eau du terrain selon des algorithmes utilisés par la communauté scientifique.

La Figure 4 montre les cartes des totaux annuels d'émission de PM10 et NOx pour l'année 2019, après harmonisation et désagrégation spatiale sur la région ALCOTRA.



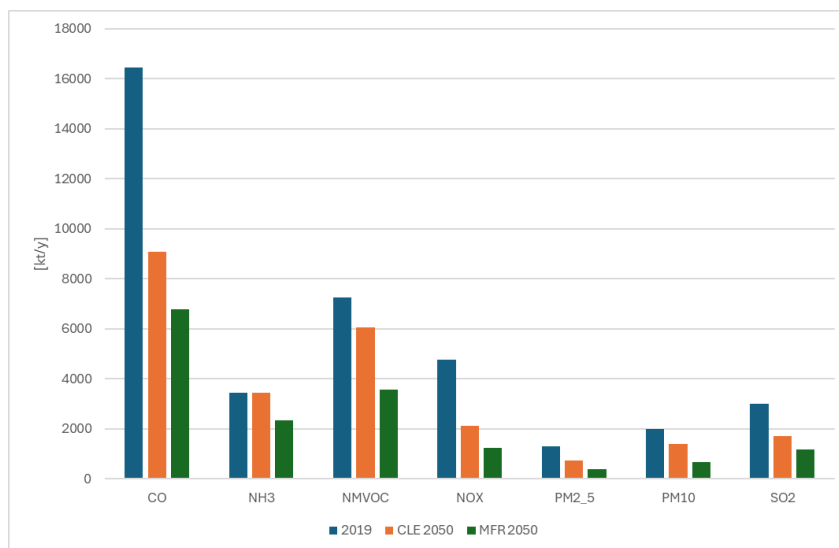
**Figure 4 :** émissions harmonisées et maillées relatives aux particules primaires (à gauche) et aux oxydes d'azote (à droite) pour l'année 2019 sur les régions ALCOTRA.

Les données émissives décrites ci-dessus sont utilisées pour alimenter le modèle de chimie et transport dans les simulations relatives au scénario de référence relatif aux années allant de 2010 à 2019. Ensuite, pour préparer les données nécessaires pour alimenter le modèle de chimie et transport dans l'analyse de scénario relatives à la période future à moyen terme (de 2045 à 2054), une projection des taux émissifs calculés pour l'année 2019 a été nécessaire à travers l'emploi des deux scénarios suivants produits par IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis)<sup>14</sup> :

<sup>13</sup> <https://doi.org/10.5194/gmd-5-1471-2012>

<sup>14</sup> [https://gains.iiasa.ac.at/gains/EUN/index.login?logout=1&switch\\_version=v0](https://gains.iiasa.ac.at/gains/EUN/index.login?logout=1&switch_version=v0)

- un scénario baseline, IIASA CLE (c'est-à-dire Current Legislation, législation actuelle) Eclipse v6 scenario,
- un scénario alternatif optimiste, IIASA MFR (c'est-à-dire Maximum Feasible Reduction, réduction maximale possible) Eclipse v6 scenario.



**Figure 5 :** comparaison entre les émissions CAMS-REG-ANT sur le domaine EUROPÉEN à l'année de référence 2019 et en 2050 pour les scénarios IIASA CLE et MFR.

Le premier scénario est utilisé en concomitance avec le scénario climatique SSP3-7.0, car cohérent avec le parcours de développement socio-économique hypothétique, tandis que le second scénario, avec des réductions optimistes du cadre émissif, est utilisé en concomitance et en cohérence avec le scénario climatique SSP1-2.6. La Figure 2 montre une première comparaison entre le scénario de référence en 2019 et les scénarios CLE et MFR en 2050 (émissions relatives au domaine EUROPÉEN) pour les principaux polluants atmosphériques.

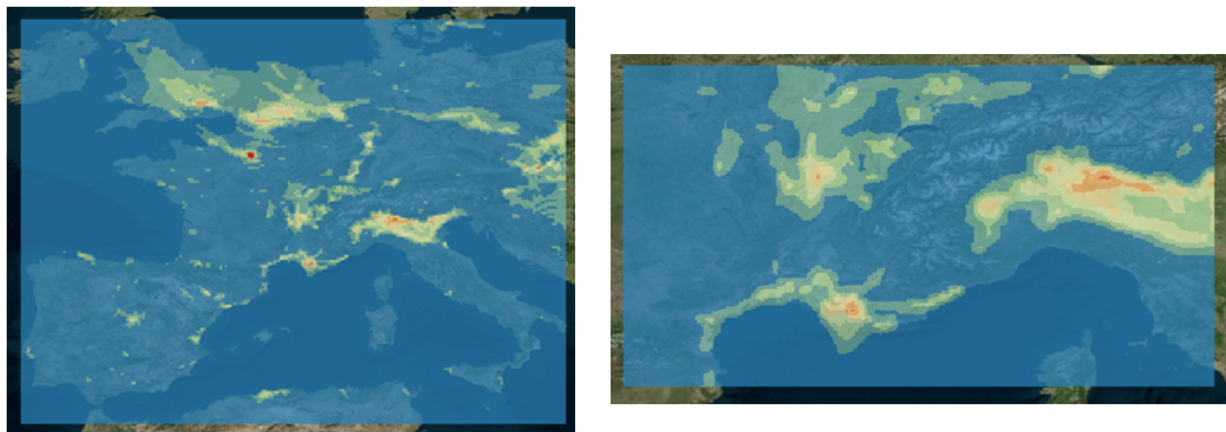
### Les données de conditions aux limites

Un modèle de chimie et transport nécessite, à chaque heure de simulation, des conditions aux limites, c'est-à-dire des informations relatives à la masse des polluants qui entrent et sortent du domaine de calcul. Du fait de la définition de l'architecture du système modélisé (Figure 2), les conditions aux limites doivent être fournies seulement aux bords du domaine EUROPÉEN, car sur le domaine cible à haute résolution ALCOTRA les conditions aux limites sont tirées directement des champs de concentration produits par les simulations sur le domaine EUROPÉEN. Le domaine EUROPÉEN a été en effet introduit pour générer les conditions aux limites détaillées pour le domaine ALCOTRA, simulant en même temps directement, dans les différents scénarios, les effets des sources émissives majeures localisées à l'extérieur du domaine cible, mais qui peuvent toutefois influencer directement la qualité de l'air.

Les conditions aux limites pour le domaine EUROPÉEN sont tirées, pour toutes les périodes de simulation pour les deux scénarios climatiques différents, des champs de concentration des

principaux polluants atmosphériques distribués par le modèle climatique global MRI-ESM2.0<sup>15</sup>. Ces champs, étant globaux, sont à basse résolution mais sont cohérents et en ligne avec les scénarios climatiques produits par le CMCC à travers le modèle climatique régional COSMO-CLM.

### Le analisi di scenario e la valutazione degli impatti



**Figure 6** : exemples de champs de concentration moyenne journalière de dioxyde d'azote pour le scénario de référence. À gauche, carte de concentration sur le domaine EUROPÉEN pour le jour 02/01/2010, à droite la carte correspondante sur le domaine ALCOTRA.

Les impacts conjoints des changements climatiques et des mesures de réduction émissive sur la qualité de l'air dans le territoire ALCOTRA seront donc évalués en comparant, à travers des indicateurs opportuns, les résultats des simulations produites par le modèle de chimie et transport FARM dans le scénario de référence (2010 - 2019) avec ceux dérivant des scénarios dans le futur à moyen terme (2045 - 2054) et dans le futur à long terme (2065 - 2074).

Les analyses de scénario décrites sont actuellement en cours : compte tenu du niveau élevé de détail spatial (toute l'Europe occidentale) et temporel (dans l'ensemble environ 60 ans avec fréquence), les simulations demandent d'importantes ressources de calcul, des temps de calcul élevés et la nécessité de gérer d'énormes quantités de données. Par conséquent, elles sont réalisées sur un système de calcul parallèle à hautes performances hébergé au centre de supercalcul international CINECA<sup>16</sup> et se poursuivront (avec l'analyse des résultats) pendant presque toute la durée du projet ALP'AERA.

<sup>15</sup> doi:10.22033/ESGF/CMIP6.6842

<sup>16</sup> <https://www.hpc.cineca.it/>

---

**Suivez-nous pour en savoir plus !**

Interreg

Cofinancé par  
l'Union Européenne  
Cofinanziato  
dall'Unione Europea

France – Italia ALCOTRA



Site web du projet

[www.alpaera.eu](http://www.alpaera.eu)

Site web Alcotra

<https://www.interreg-alcotra.eu/it/alpaera-sostegno-alla-governance-dellaria-e-del-clima-nelle-aree-alpine-alcotra>

Nos réseaux sociaux

[https://www.instagram.com/alpaera\\_alcotra/](https://www.instagram.com/alpaera_alcotra/)<https://www.linkedin.com/showcase/alp-aera/><https://www.facebook.com/share/1BZEf7bHKR/?mibextid=wwXlfr>  
[www.youtube.com/@AlpAera](https://www.youtube.com/@AlpAera)

Pour plus d'informations, veuillez contacter :

ARPA Valle d'Aosta – Vallée d'Aoste

[alpaera@arpa.vda.it](mailto:alpaera@arpa.vda.it)