

FRANÇAIS

NEWSLETTER

#03

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

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

Cher lecteur,

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

Dans cette édition, nous présentons les avancées les plus significatives du projet à travers une série d'articles couvrant les activités clés : le nouveau tableau de bord ALP'AERA Data, qui rend accessibles en ligne les observations, les émissions et les scénarios de qualité de l'air du territoire transfrontalier ; les campagnes de mesure menées par ARPA Liguria, ARPA Piemonte, ARPA Vallée d'Aoste et AtmoSud sur l'ozone, les oxydes d'azote et le black carbon ; l'analyse de l'évolution des émissions, avec la spéciation des composés organiques volatils, leur potentiel de formation d'ozone et un approfondissement sur les systèmes de rafraîchissement et de climatisation ; enfin, les simulations de scénarios sur l'impact du changement climatique sur la qualité de l'air aux horizons 2050 et 2070.

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 campagnes de mesure estivales se sont étendues à de nouveaux sites de vallée 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 site web du projet disponible à l'adresse suivante www.alpaera.eu.

Nous vous souhaitons une bonne lecture !

Les partenaires du projet ALP'AERA

ALP'AERA Data : Le tableau de bord de la qualité de l'air transfrontalier France–Italie

Observations, émissions et scénarios à l'horizon 2070 réunis dans un portail unique : un outil d'aide à la décision au service des territoires alpins franco-italiens.

Comment évolue la qualité de l'air que nous respirons dans les vallées alpines ? Quels secteurs d'activité pèsent le plus dans les émissions de polluants ? Et à quoi pourrait ressembler l'air alpin dans trente ou cinquante ans ? C'est à ces questions que le tableau de bord développé dans le projet ALP'AERA entend répondre.

Il rassemble en un seul endroit toutes les données essentielles pour comprendre l'évolution de l'air que nous respirons dans les vallées alpines franco-italiennes depuis 2012. Il s'inscrit dans une ambition plus large :

proposer aux décideurs publics des indicateurs communs, partagés de part et d'autre de la frontière, et des outils opérationnels pour bâtir des stratégies d'adaptation au changement climatique. Car la hausse des concentrations de gaz à effet de serre et l'évolution de la teneur de l'atmosphère en aérosols affectent directement le climat dans les massifs alpins, avec des conséquences bien concrètes : retrait des glaciers, baisse de la fréquentation touristique hivernale par manque de neige, canicules et sécheresses estivales, ou encore impacts sanitaires liés à la dégradation de la qualité de l'air.

Pour donner corps à ces enjeux, le site s'organise autour de plusieurs tableaux de bord complémentaires, chacun apportant un éclairage différent sur la qualité de l'air du territoire.



LE TABLEAU DE BORD DES OBSERVATIONS

Ce premier module donne accès à des séries temporelles remontant à 2012, pour suivre l'évolution des concentrations mesurées sur le terrain : particules fines (PM₁₀, PM_{2.5}), ozone et oxydes d'azote. Il permet de visualiser les tendances de long terme, d'identifier les zones les plus exposées et de situer les niveaux actuels par rapport aux seuils réglementaires ainsi qu'aux recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé. C'est une photographie vivante de l'état de l'air, actualisée au fil des mesures collectées sur l'ensemble du territoire transfrontalier.

LE TABLEAU DE BORD DES ÉMISSIONS

Le deuxième volet s'intéresse à l'origine des polluants et des gaz à effet de serre. Il détaille les émissions secteur par secteur (résidentiel, transport, industrie, agriculture...) et région par région, ce qui permet de comprendre précisément quelles activités contribuent le plus à la pollution atmosphérique et au réchauffement climatique. Cette granularité est précieuse pour les collectivités : elle permet d'orienter les politiques publiques, comme les Plans Climat-Air-Énergie Territoriaux français ou les Plans régionaux de protection de la qualité de l'air italiens, vers les leviers d'action les plus efficaces localement, plutôt que d'appliquer des mesures génériques peu adaptées aux réalités du terrain.

LE TABLEAU DE BORD DES SCÉNARIOS FUTURS

C'est sans doute le volet le plus innovant d'ALP'AERA Data : il intègre des projections climatiques et de qualité de l'air à moyen terme (2050) et à long terme (2070). En croisant différents scénarios de réduction des émissions avec différents scénarios climatiques, ce module permet d'anticiper les défis environnementaux à venir sur l'ensemble du domaine ALCOTRA. Il éclaire aussi bien l'évolution attendue des polluants classiques que des phénomènes émergents et parfois moins visibles, comme l'essor de la climatisation dans les Alpes : poussée par la hausse des températures et la multiplication des vagues de chaleur, elle pourrait peser de plus en plus lourd sur la consommation d'énergie et les émissions associées dans les décennies à venir, si aucune évolution des comportements et des politiques énergétiques n'intervient.

UNE DÉMARCHE CONSTRUITE POUR DURER

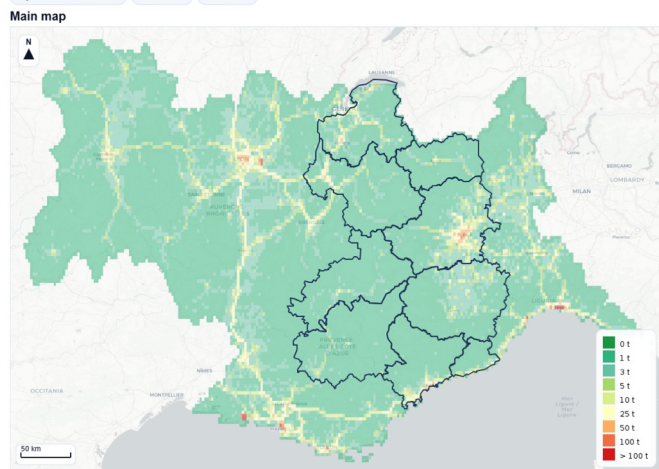
Au-delà de la simple mise à disposition de données, ALP'AERA Data a été pensé comme un outil d'aide à la décision. En croisant observations de terrain, inventaires d'émissions et modélisations prospectives, il offre une vision à 360° indispensable pour construire des stratégies d'adaptation cohérentes à l'échelle de tout le territoire alpin franco-italien, au-delà des frontières administratives.

Emissions (map)

Export 05/06/2026 12:14:56



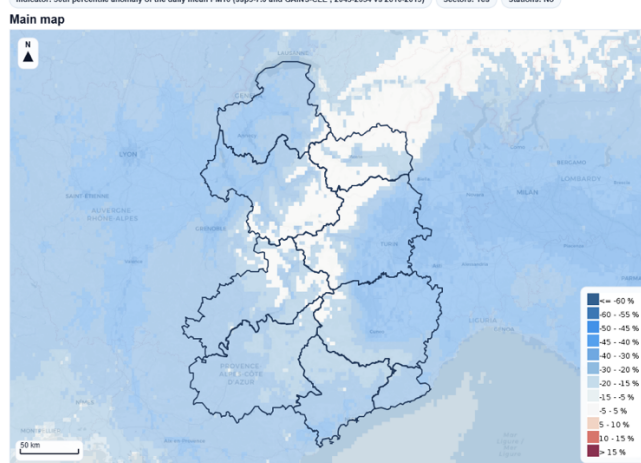
Layer: NOx emissions 2019 Sectors: Yes Stations: No



Future air quality



Indicator: 50th percentile anomaly of the daily mean PM10 (ssp3.7.0 and GAINS-CLE ; 2045-2054 vs 2010-2019) Sectors: Yes Stations: No



À vous d'explorer ! Le tableau de bord est accessible à toutes et tous. N'hésitez pas à naviguer entre les différents modules, à comparer les territoires et à observer les tendances qui vous concernent directement.

➔ Rendez-vous directement sur le portail : <https://alpaera-data.atmosud.org>

➔ Ou depuis le site web du projet : <https://www.alpaera.eu/dashboard-progetto-alpaera.php?lang=fr>

Campagnes de mesure : focus sur les activités de mise en œuvre du système de mesure de la qualité de l'air

L'Action 3.1 du projet ALP'AERA vise à surveiller la qualité de l'air le long de la frontière franco-italienne, en combinant des stations de mesure fixes et des campagnes de mesures périodiques. Dans l'ensemble, les cinq partenaires du projet disposent de 84 sites de surveillance de la qualité de l'air ambiant répartis sur le territoire d'intérêt du projet ALP'AERA (figure 1). Les polluants atmosphériques les plus couramment mesurés sont les oxydes d'azote, l'ozone, les particules fines (PM₁₀ et PM_{2,5}), tandis que les mesures du BC (Black Carbon) et des UFP (particules ultrafines) sont actuellement en cours de déploiement.

Les activités mises en œuvre dans le cadre du projet ALP'AERA ont pour objectif non seulement de partager les mesures réalisées par les différents partenaires, mais surtout de les renforcer grâce à la réalisation de nouvelles campagnes de surveillance. Ces activités visent à :

- étudier des portions du territoire encore peu connues ;
- estimer des polluants dits « émergents », tels que le Black Carbon (BC) et les particules ultrafines (UFP) ;

- évaluer l'utilisation d'instruments de mesure non conventionnels pour la surveillance des polluants atmosphériques et comparer les données obtenues avec celles issues d'instruments de mesure certifiés.

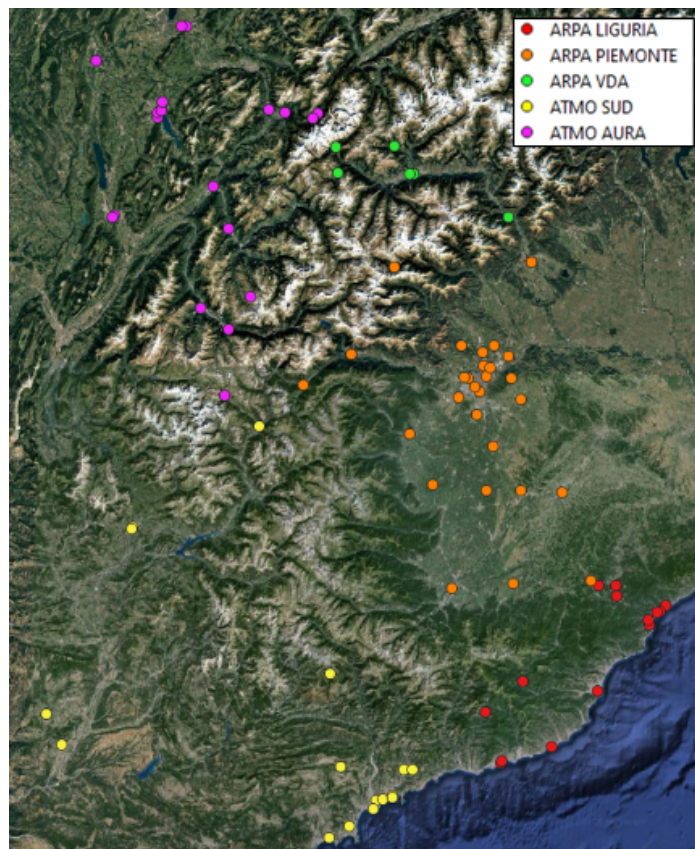


Figure 1 – Sites fixes de mesure des partenaires du projet ALP'AERA

Les partenaires du projet ont ainsi mis en œuvre plusieurs activités expérimentales destinées à approfondir les connaissances sur les polluants les plus significatifs au regard du changement climatique. Le tableau ci-après récapitule les campagnes de mesure réalisées ou en cours de réalisation dans le cadre de l'Action 3.1 (tableau 1).

PARTENAIRE	SITES DE MESURE	POLLUANTS SURVEILLÉS
ARPA LIGURIA	PIGNA (IM) – loc. Colle Belenda	O ₃ , NO _x , paramètres météorologiques
ARPA VALLÉE D'AOSTE	2025 : Antey-Saint-André, Challand-Saint-Anselme, Chambave, Pontboset 2026 : Chambave, Cogne, Etroubles, Saint-Pierre	O ₃ , NO _x , COV, paramètres météorologiques (smart sensor)
ARPA PIEMONTE	Susa (TO) – Repubblica Ivrea (TO) – Liberazione	Black Carbon
ATMO SUD	Briançon Observatoire de Haute-Provence	Black Carbon

Tableau 1 – Récapitulatif des campagnes de mesure du projet ALP'AERA (Action 3.1)

CAMPAGNES DE MESURE D'ARPA LIGURIA

Les campagnes ont été menées au cours de deux années consécutives, en 2024 et 2025, avec un intérêt particulier pour l'ozone (O_3), afin d'évaluer l'évolution de ses concentrations dans le contexte rural des Alpes maritimes. À cette fin, le site de Pigna (province d'Imperia) – Colle Belenda a été retenu, car il est particulièrement approprié pour caractériser l'évolution des concentrations d'ozone et de ses précurseurs dans la partie occidentale de la région Ligurie, ainsi que les éventuels transports transfrontaliers, en raison de sa proximité avec la frontière franco-italienne.

Les résultats de la comparaison entre les deux campagnes de surveillance sont présentés dans les graphiques ci-après. Au cours des deux périodes, on observe une relation inverse entre l' O_3 et les NO_x , mais celle-ci reste peu marquée. Les concentrations d'ozone présentent par ailleurs des variations journalières et saisonnières relativement limitées (figure 3), y compris en comparaison avec les autres stations du réseau régional.

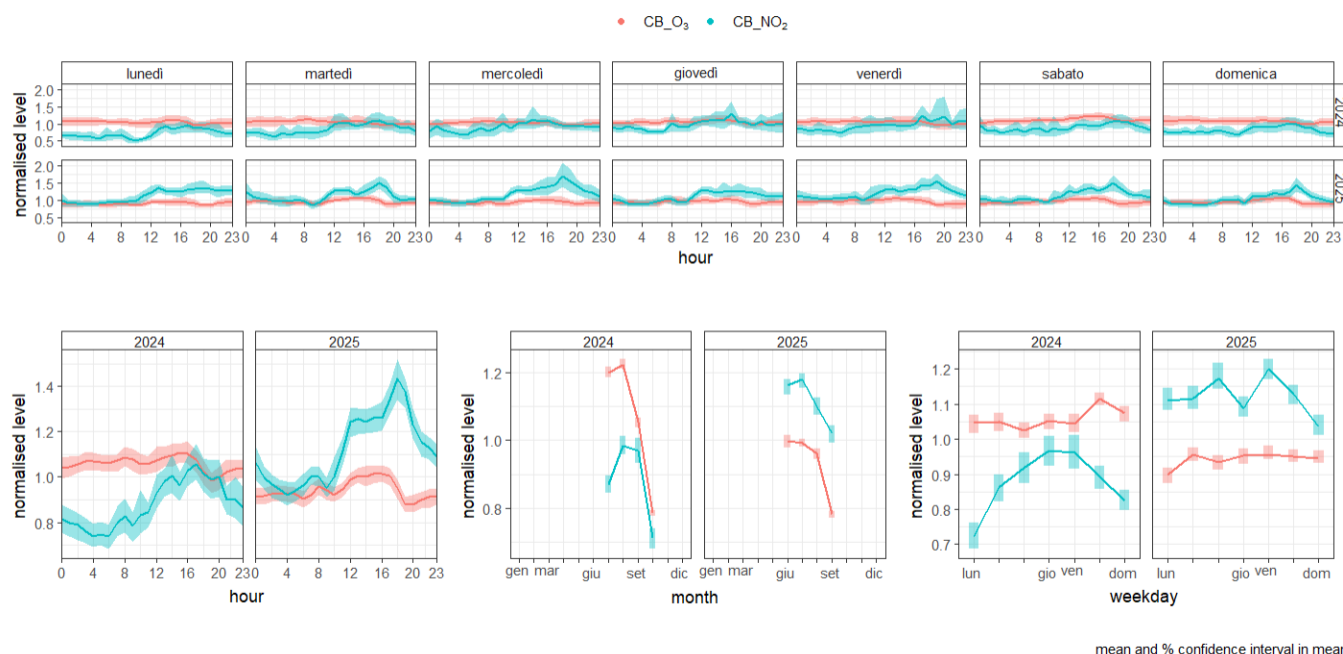


Figure 2 – Graphique Time Variation des concentrations d'ozone et de dioxyde d'azote pendant les campagnes 2024 et 2025

La dynamique des concentrations d'ozone demeure toutefois complexe et est principalement influencée par les conditions météorologiques et climatiques. Les figures 4 et 5 présentent les graphiques mettant en évidence les concentrations d'ozone en fonction des principales variables météorologiques qui déterminent et influencent les niveaux mesurés.

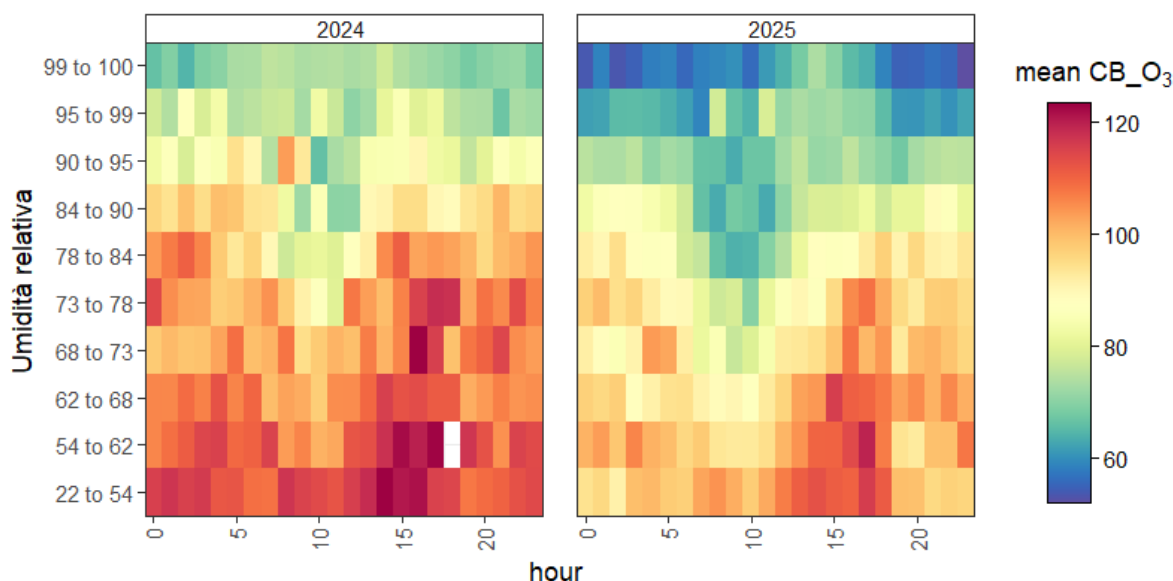


Figure 3 – Graphique Trend Level ozone/rayonnement solaire pendant les campagnes 2024 et 2025

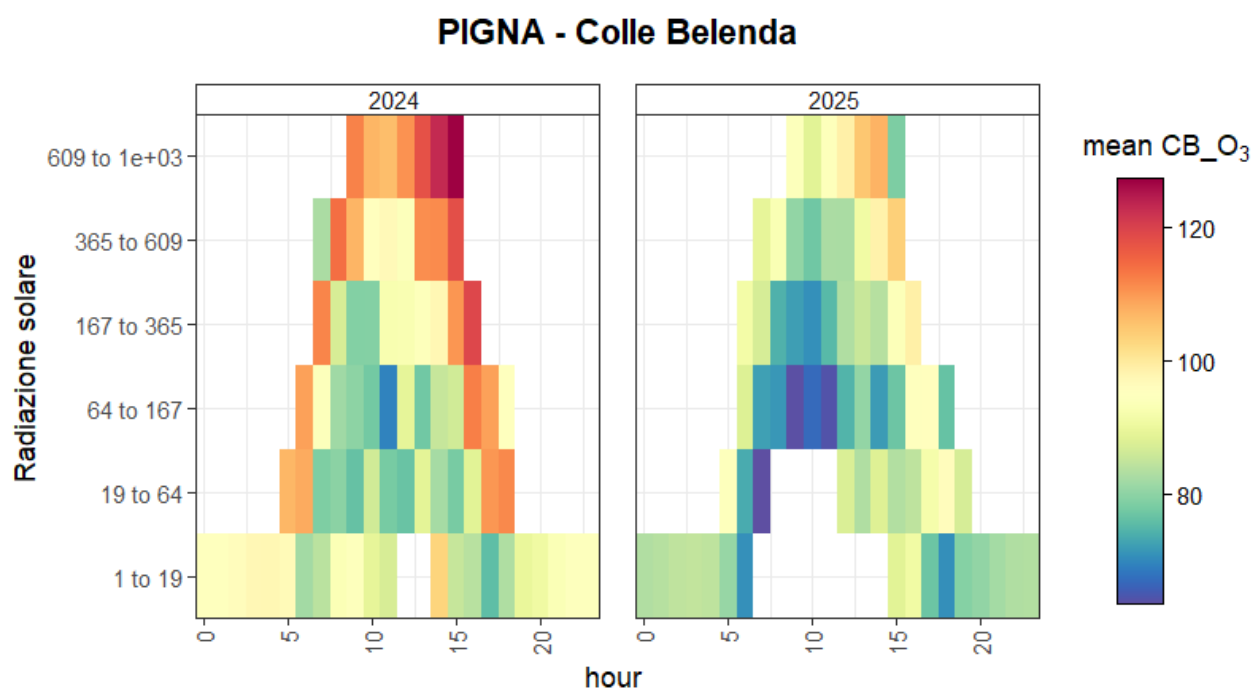
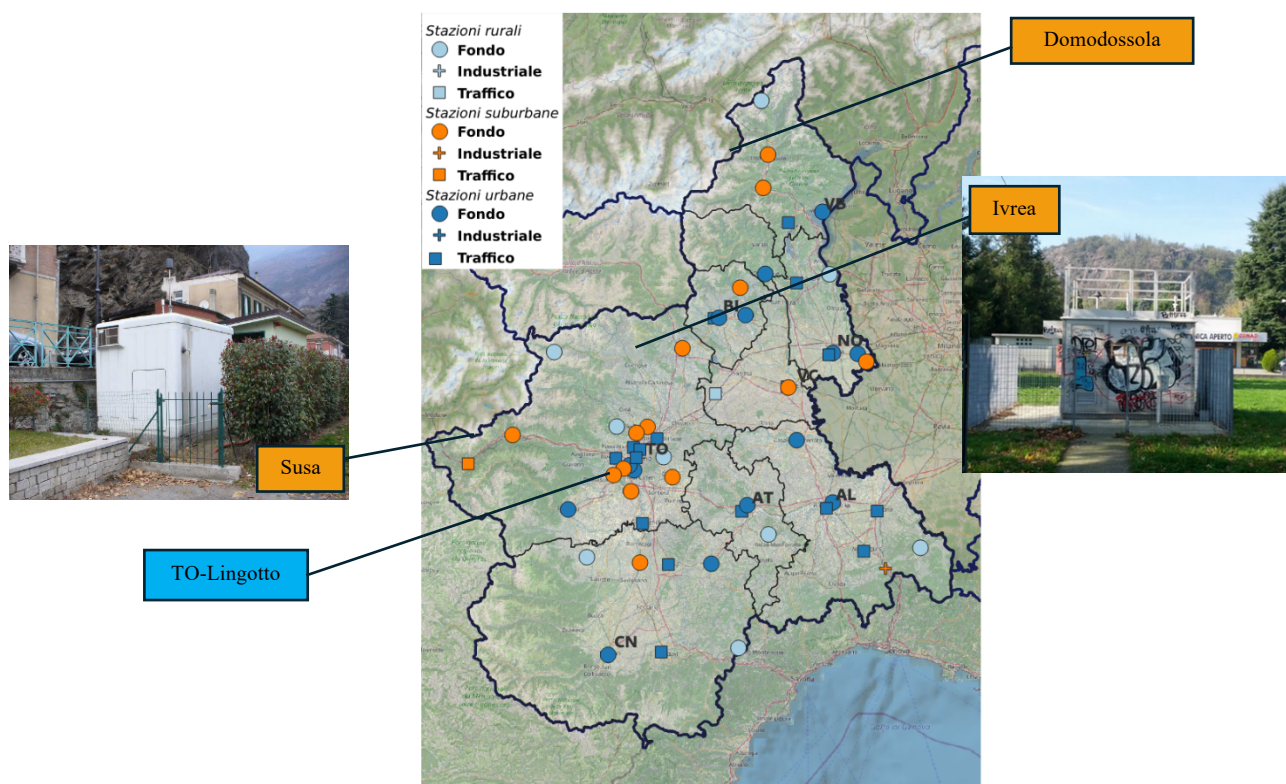


Figure 4 – Graphique Trend Level ozone/humidité relative pendant les campagnes 2024 et 2025

CAMPAGNES DE MESURE D'ARPA PIEMONTE

Dans le cadre du projet ALP'AERA, la surveillance du Black Carbon dans la Région Piémont a porté sur les deux stations de fond suburbain d'Ivrea – Liberazione et de Susa – Repubblica, sur la période comprise entre le 1^{er} janvier 2025 et le 30 avril 2026. L'installation de deux analyseurs AE36 a permis d'étendre la surveillance du Black Carbon, déjà réalisée dans le Piémont depuis 2018 sur les stations de Turin – Lingotto et de Domodossola.



Résultats de la surveillance

La surveillance continue du Black Carbon met en évidence une importante variabilité saisonnière, avec des valeurs maximales en période hivernale et une diminution pendant la saison chaude ; cette évolution est corrélée à celle des concentrations de PM_{2.5}.

La figure 1 présente les moyennes journalières de Black Carbon enregistrées entre le 1^{er} janvier 2025 et le 30 avril 2026 sur les sites de Susa et d'Ivrea. Le pic observé en juin 2025 sur les deux stations est dû à l'épisode intense de poussières provoqué par les incendies survenus au Canada. Le site d'Ivrea présente généralement des niveaux de Black Carbon plus élevés que celui de Susa, à l'exception de la période estivale, durant laquelle les concentrations sont pratiquement similaires.

Black Carbon Totale dati giornalieri 2025_2026

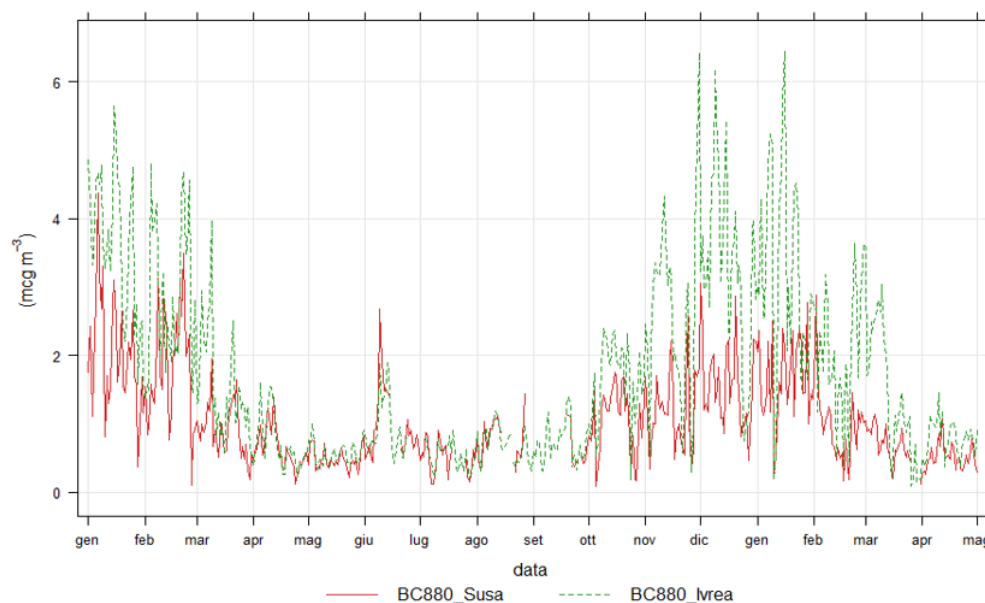


Figure 1

La figure 2 présente l'évolution des concentrations selon les heures de la journée, les mois de l'année et les jours de la semaine. Le profil journalier met en évidence deux pics, le matin et le soir, liés aux émissions du trafic routier et de la combustion de la biomasse. Les mois d'hiver, notamment janvier et décembre, présentent les valeurs les plus élevées en raison de l'intensité des sources d'émission et de conditions météorologiques moins favorables à la dispersion des polluants. Le graphique mensuel met également en évidence l'anomalie observée en juin, imputable aux incendies survenus au Canada, dont les fumées et les particules ont été transportées jusqu'en Europe.

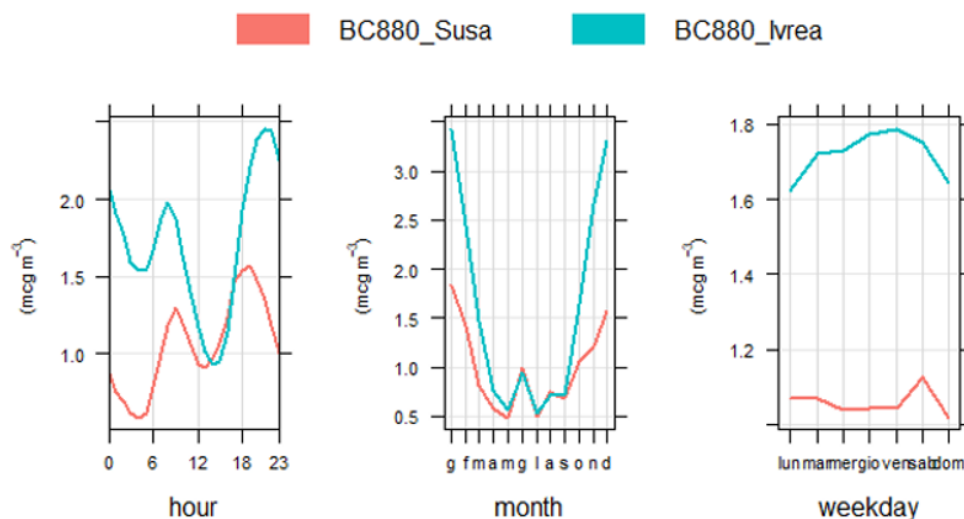


Figure 2

Les analyseurs de Black Carbon permettent également d'estimer la contribution de la combustion de la biomasse ainsi que celle des combustibles fossiles.

La figure 3, qui présente le profil du jour type, montre que, sur les deux sites, la contribution de la composante fuel (combustibles fossiles) est prédominante.

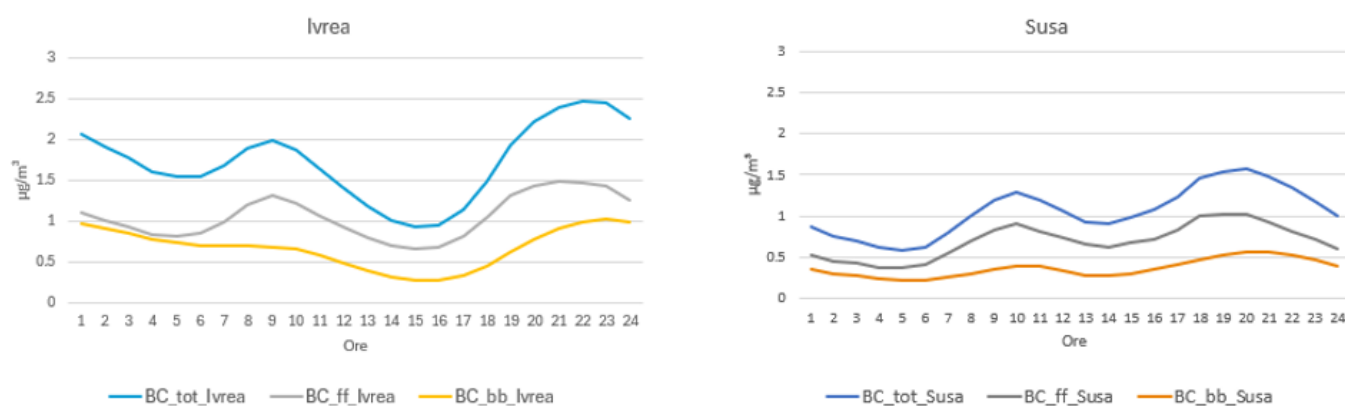


Figure 3

En comparant les données recueillies dans le cadre du projet ALP'AERA avec celles des instruments installés sur les stations de Turin – Lingotto et de Domodossola (VB) du réseau régional de surveillance, on observe (figure 4) que le niveau et l'évolution du Black Carbon total à Ivrrea sont comparables à ceux de Turin – Lingotto, tandis que Susa présente une évolution journalière similaire à celle de Domodossola, mais avec des concentrations nettement plus faibles.

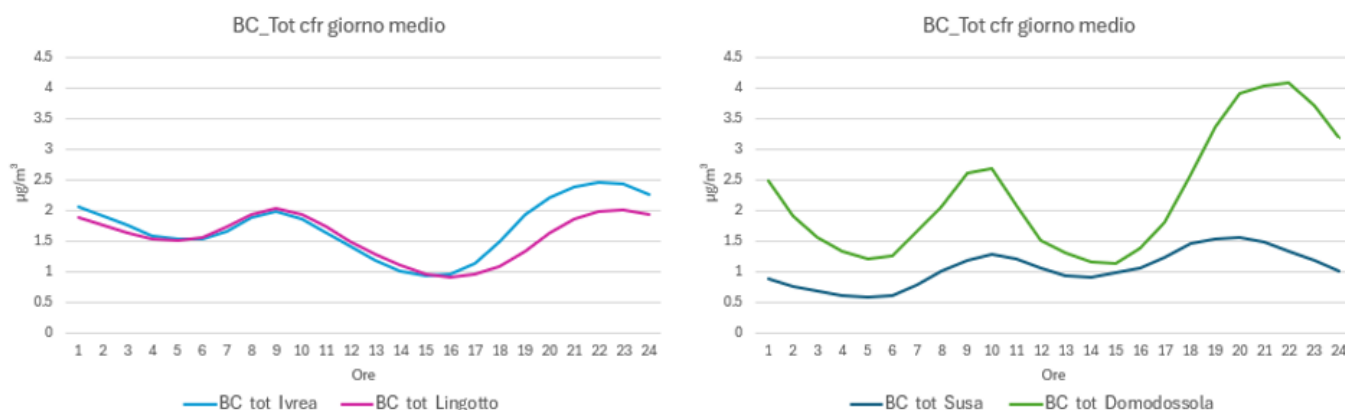


Figure 4

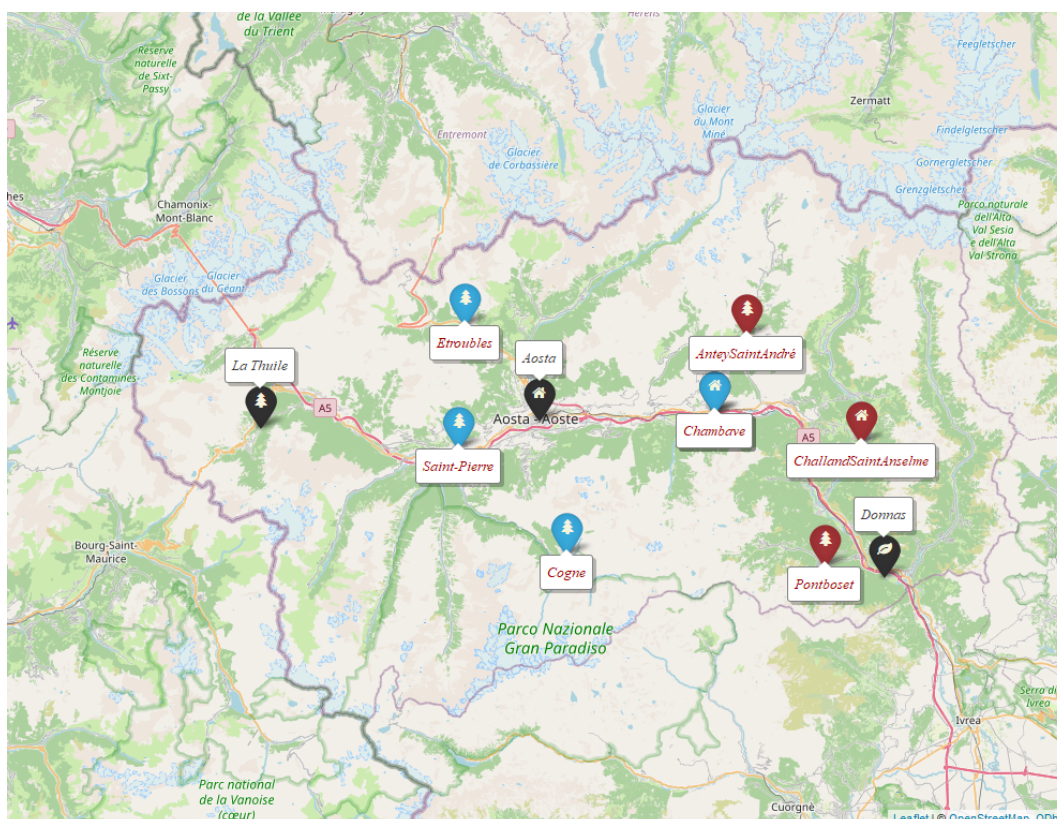
Le tableau ci-dessous présente les valeurs moyennes et maximales des concentrations horaires de Black Carbon total enregistrées dans les quatre stations au cours de l'année 2025.

Année 2025 BC_tot (données horaires)	moyenne	maximum
Domodossola (VB)	2.2	22.3
Turin-Lingotto	1.6	13.4
Ivrea	1.7	17.1
Susa	1.1	7.6

CAMPAGNES DE MESURE D'ARPA VALLÉE D'AOSTE

Les campagnes de mesure réalisées par ARPA Vallée d'Aoste portent sur l'ozone et les composés organiques volatils (COV) et sont actuellement en cours. Le plan d'échantillonnage prévoit l'utilisation d'analyseurs non conventionnels (smart sensors), étalonnés au début de la période de campagne au moyen d'une intercomparaison avec des analyseurs certifiés appartenant au réseau de mesure régional. Deux campagnes de mesure ont été réalisées :

- de mai à septembre 2025 dans quatre localités de la partie orientale de la région : Antey-Saint-André, Challand-Saint-Anselme, Chambave, Pontboset ;
- de mai à août 2026 dans trois localités de la partie occidentale de la région : Cogne, Etroubles, Saint-Pierre, ainsi qu'à nouveau à Chambave.



Des smart sensors AQMesh, qui utilisent des cellules électrochimiques pour la mesure des polluants, ont été employés. La comparaison avec l'instrumentation de référence du réseau de surveillance d'ARPA Vallée d'Aoste a montré que les mesures d'ozone des AQMesh sont bien corrélées avec les mesures de référence, mais qu'elles leur sont inférieures : une correction calculée par régression linéaire a donc été appliquée aux mesures des capteurs.



Les valeurs d'ozone mesurées au cours de l'été 2025 par les trois capteurs installés dans les vallées latérales (Pontboset, Challand-Saint-Anselme, Antey-Saint-André) sont en bon accord entre elles et n'ont donné lieu à aucun dépassement de la valeur cible ni du seuil d'information. Le capteur installé à Chambave a en revanche enregistré des niveaux d'ozone très élevés, qui laissent supposer un dysfonctionnement du capteur.

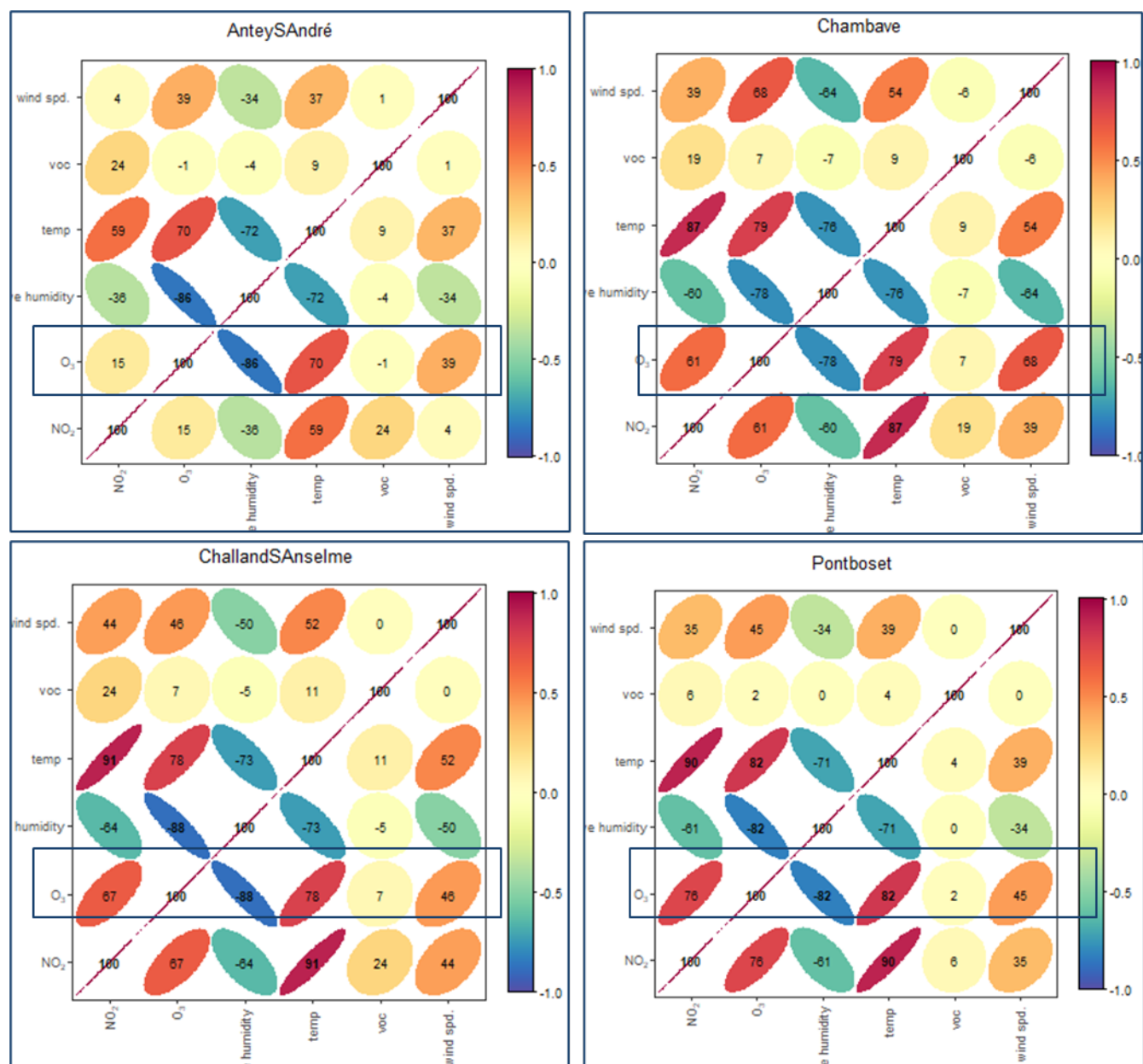
	Concentration moyenne $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Jours avec maximum de la moyenne glissante sur 8 heures supérieur à $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$	Heures avec concentration supérieure à $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Pontboset	70	0	0
Challand-Saint-Anselme	75	1	0
Antey-Saint-André	70	0	0
Chambave	95	111	237
Donnas	76	35	4
Aoste	71	20	0
La Thuile	81	8	0
Courmayeur	70	0	0

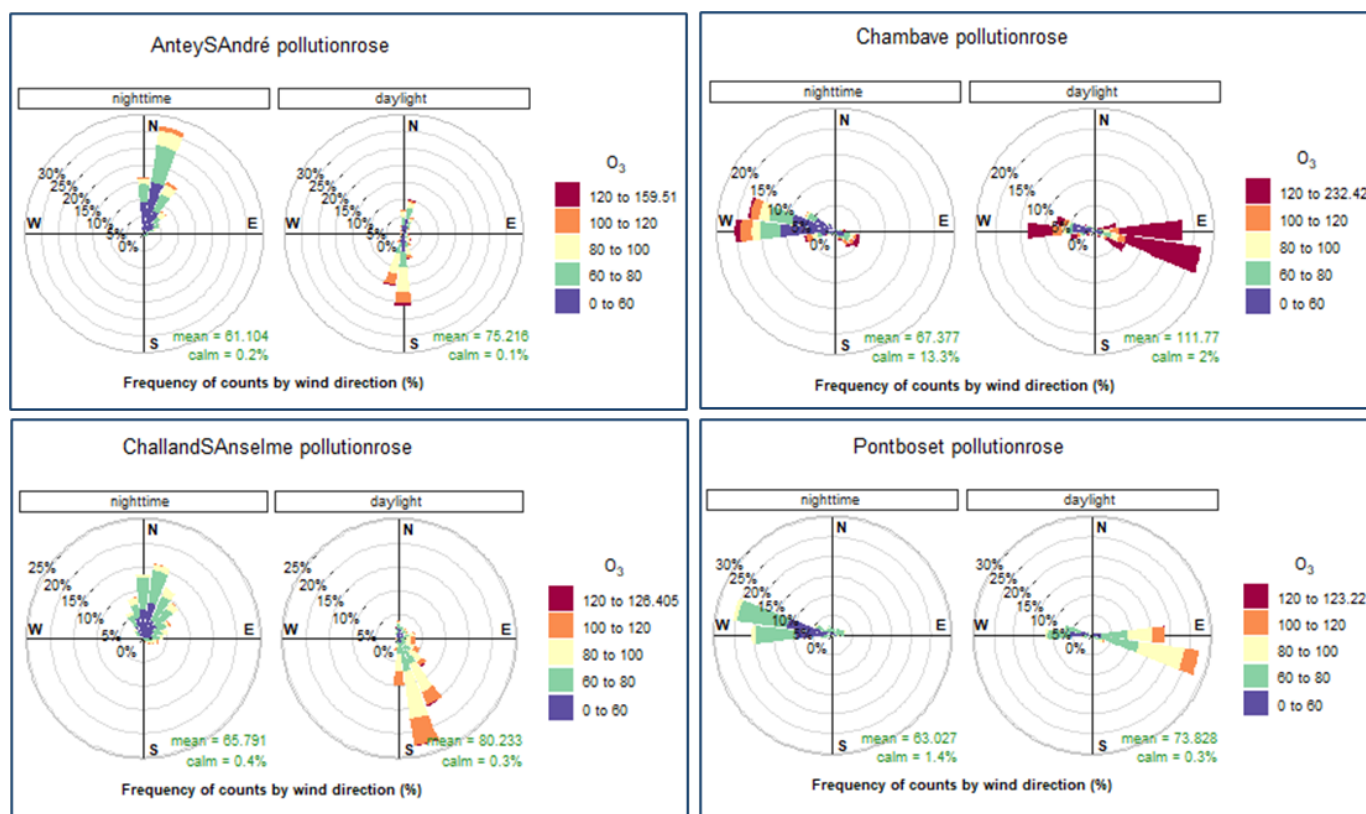
Sur tous les sites, la corrélation est forte avec la température (positive) et avec l'humidité (négative). La corrélation avec la vitesse du vent est elle aussi positive, et plus marquée sur le site de Chambave (où la brise de vallée est particulièrement intense et fréquente durant les mois d'été).

Afin de déterminer l'influence du vent sur les sites de campagne pour lesquels aucune mesure de vent n'est disponible, un modèle météorologique (SWIFT) a été utilisé pour reconstruire le champ de vent. Une première simulation a été réalisée sur l'ensemble du territoire régional, à une résolution de 1 km, à partir des données

des stations météorologiques présentes sur le territoire régional ; une descente d'échelle à 125 m a ensuite été effectuée sur des domaines de quelques kilomètres englobant les sites de mesure.

Tous les sites se trouvant dans un contexte de vallées alpines, le régime de vent dominant est celui de la brise de vallée/montagne, avec des vents remontant la vallée durant les heures diurnes et descendant de l'amont durant les heures nocturnes, le long de l'axe de la vallée. Dans ce régime, l'intensité du vent est modérée le jour et généralement faible la nuit. Sur tous les sites de mesure, les concentrations d'ozone les plus élevées sont observées par vent de vallée.





CAMPAGNES DE MESURE D'ATMO SUD

Les campagnes de mesure menées par AtmoSud ont porté sur le Black Carbon. La surveillance est actuellement en cours sur le supersite rural de l'Observatoire de Haute-Provence, où les mesures ont débuté en juin de l'année dernière et dont les données sont en cours d'élaboration. Cette station fait partie du réseau national ICOS-France et constitue la station régionale de la Région Sud dédiée à l'étude des concentrations des gaz à effet de serre (CO₂ – dioxyde de carbone et CH₄ – méthane) ainsi que du CO (monoxyde de carbone), traceur des processus de combustion. Les premiers résultats montrent clairement que les concentrations mesurées sur le site de l'Observatoire de Haute-Provence sont nettement plus faibles que celles observées sur les autres stations du réseau régional (les sites de Gap, Nice et Marseille ont été pris comme référence), aussi bien pour le Black Carbon que pour les PM₁₀, ce qui confirme que ce site est représentatif du niveau de fond pour cette catégorie de polluants. Les figures 1, 2 et 3 présentent la distribution des mesures de PM₁₀ et de BC au moyen de diagrammes box-plots.

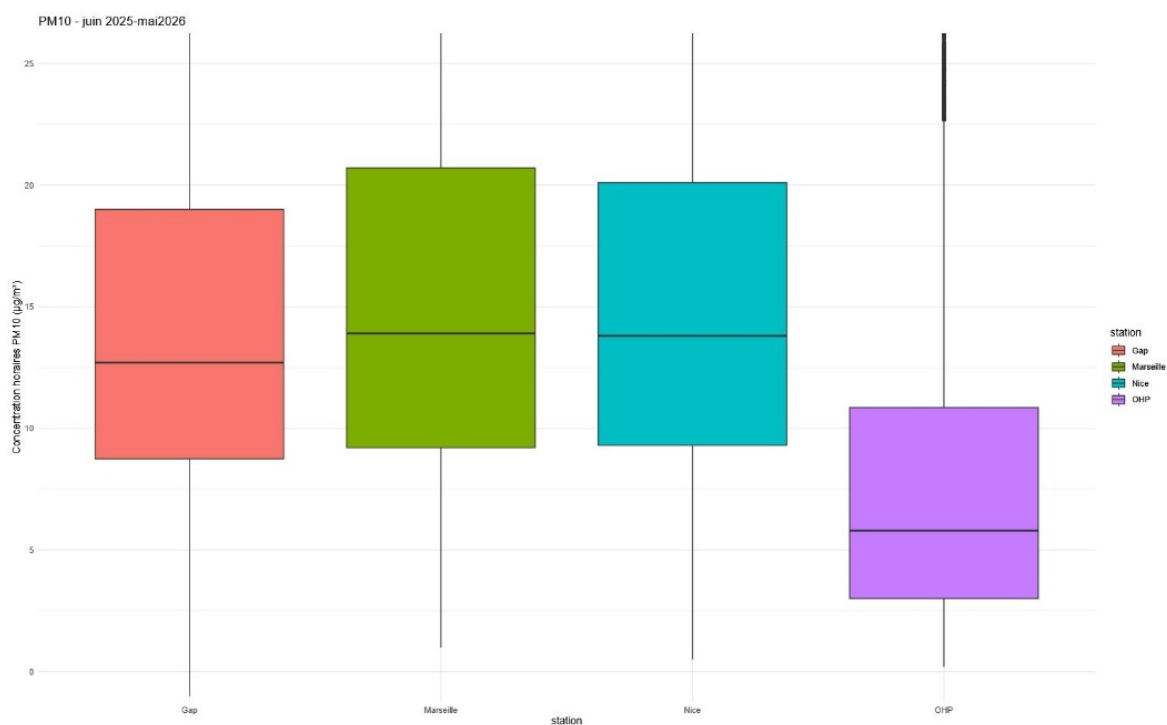


Figure 1 – Box Plot des concentrations de PM₁₀ pour les sites d'OHP, Gap, Nice et Marseille sur la période juin 2025 – mai 2026

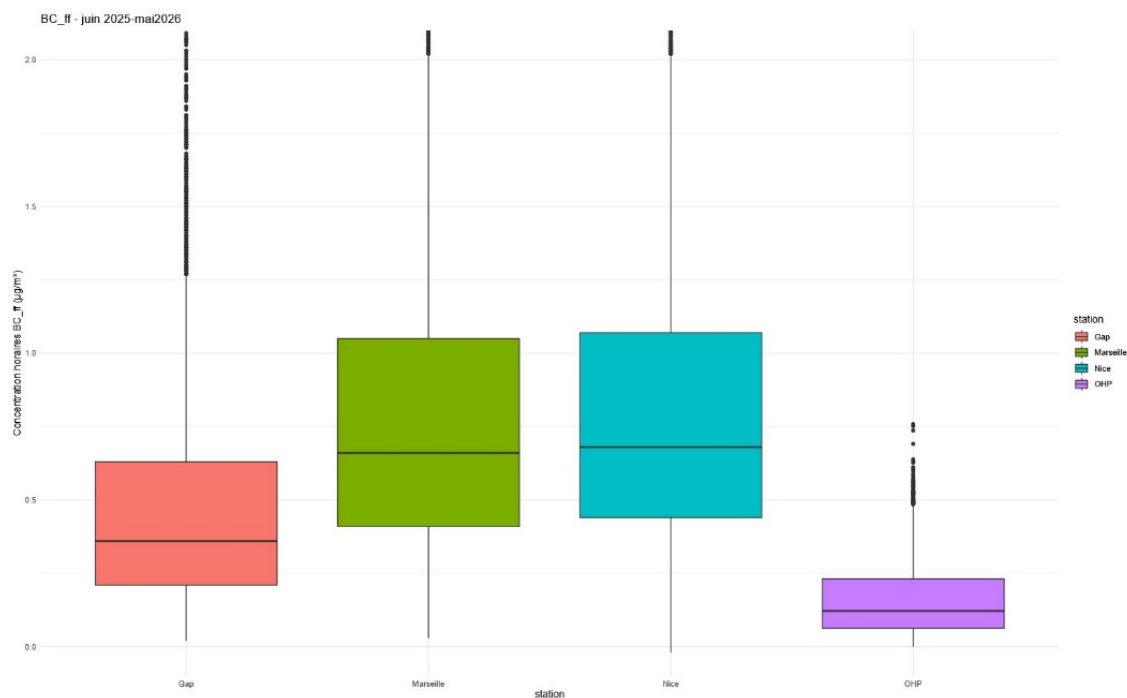


Figure 2 – Box Plot des concentrations de BC (fossil fuel) pour les sites d'OHP, Gap, Nice et Marseille sur la période juin 2025 – mai 2026

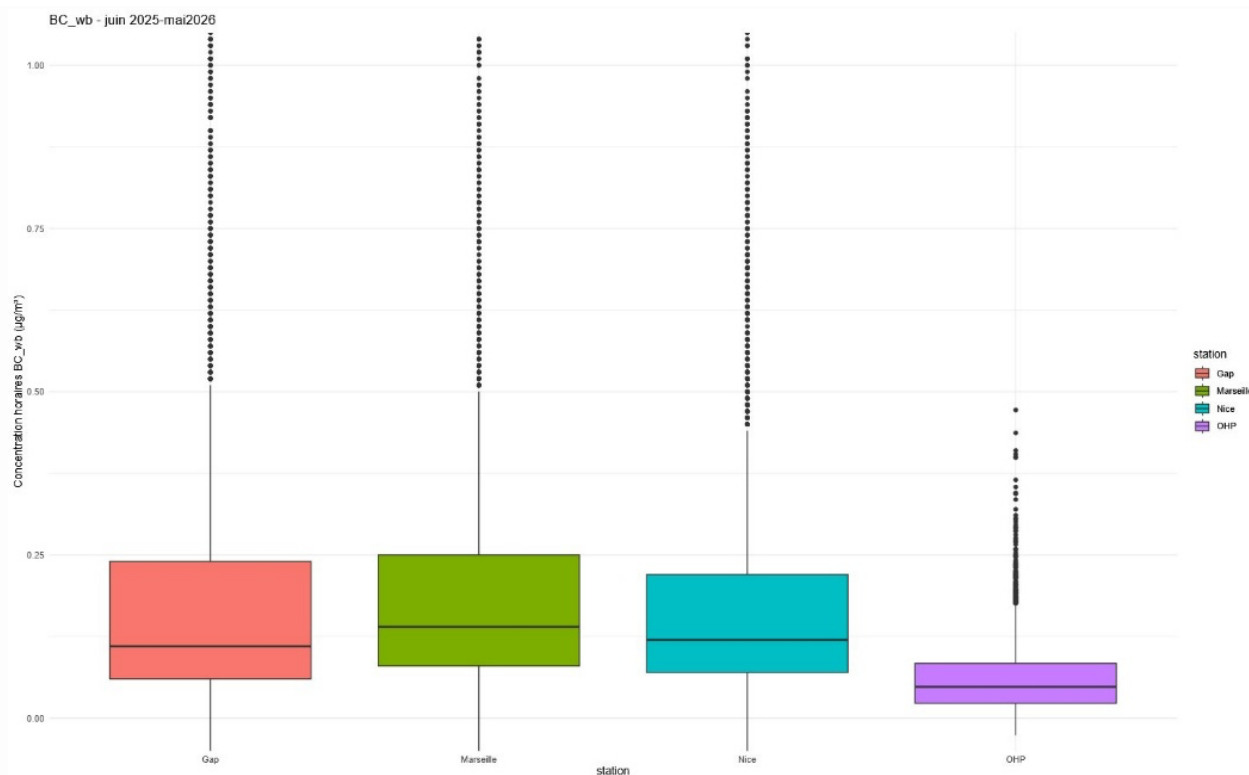


Figure 3 – Box Plot des concentrations de BC (wood burning) pour les sites d'OHP, Gap, Nice et Marseille sur la période juin 2025 – mai 2026

Évolution des émissions

Les émissions atmosphériques ne sont pas une donnée figée : elles évoluent avec les technologies, les consommations et les habitudes quotidiennes. Cette rubrique présente deux approfondissements menés dans le cadre du projet ALP'AERA, qui illustrent deux facettes de cette évolution. Le premier porte sur la spéciation des composés organiques volatils non méthaniques (COVNM) et sur leur potentiel de formation d'ozone, afin d'identifier les sources sur lesquelles les actions de réduction sont les plus efficaces sur le territoire ALCOTRA. Le second aborde la diffusion rapide des systèmes de rafraîchissement et de climatisation : une réponse nécessaire à la hausse des températures et aux vagues de chaleur, qui s'accompagne toutefois d'émissions directes de gaz fluorés, d'une demande énergétique en forte croissance et d'un impact thermique sur nos villes.

SPÉCIATION DES COMPOSÉS ORGANIQUES VOLATILS ET POTENTIEL DE FORMATION DE L'OZONE

Dans le cadre du WP4.2.1 du projet ALP'AERA, nous avons travaillé sur les données de Composés Organiques Volatils Non Méthaniques (COVNM). Nous avons réalisé ce travail principalement par le lien entre les COVNM et l'Ozone. En effet, l'Ozone est un polluant dit secondaire, c'est-à-dire qu'il se forme à partir d'autres polluants dont les COVNM. L'ozone est un gaz oxydant qui présente un double enjeu : sanitaire, car il est agressif pour les muqueuses respiratoires, et économique, puisqu'il affecte les végétaux en attaquant leurs stomates réduisant ainsi leur capacité à stocker le CO₂ et diminue les rendements agricoles.

Il existe plus de 400 types de Composés Organiques Volatils Non Méthaniques (COVNM) dans l'air. Ces composés sont impliqués dans la formation d'aérosols organiques secondaires (AOS) ou encore de l'Ozone troposphérique. Chaque espèce chimique de COVNM ne possède pas la même réactivité et donc le même potentiel de formation d'Ozone. Une échelle de classification basée sur des expériences et des modèles permet de classer leur potentiel de formation d'Ozone.

Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé l'ensemble des données d'émissions des partenaires du projet (Figure 1) pour projeter leur potentiel de formation d'Ozone dans la région ALCOTRA (Figure 2).

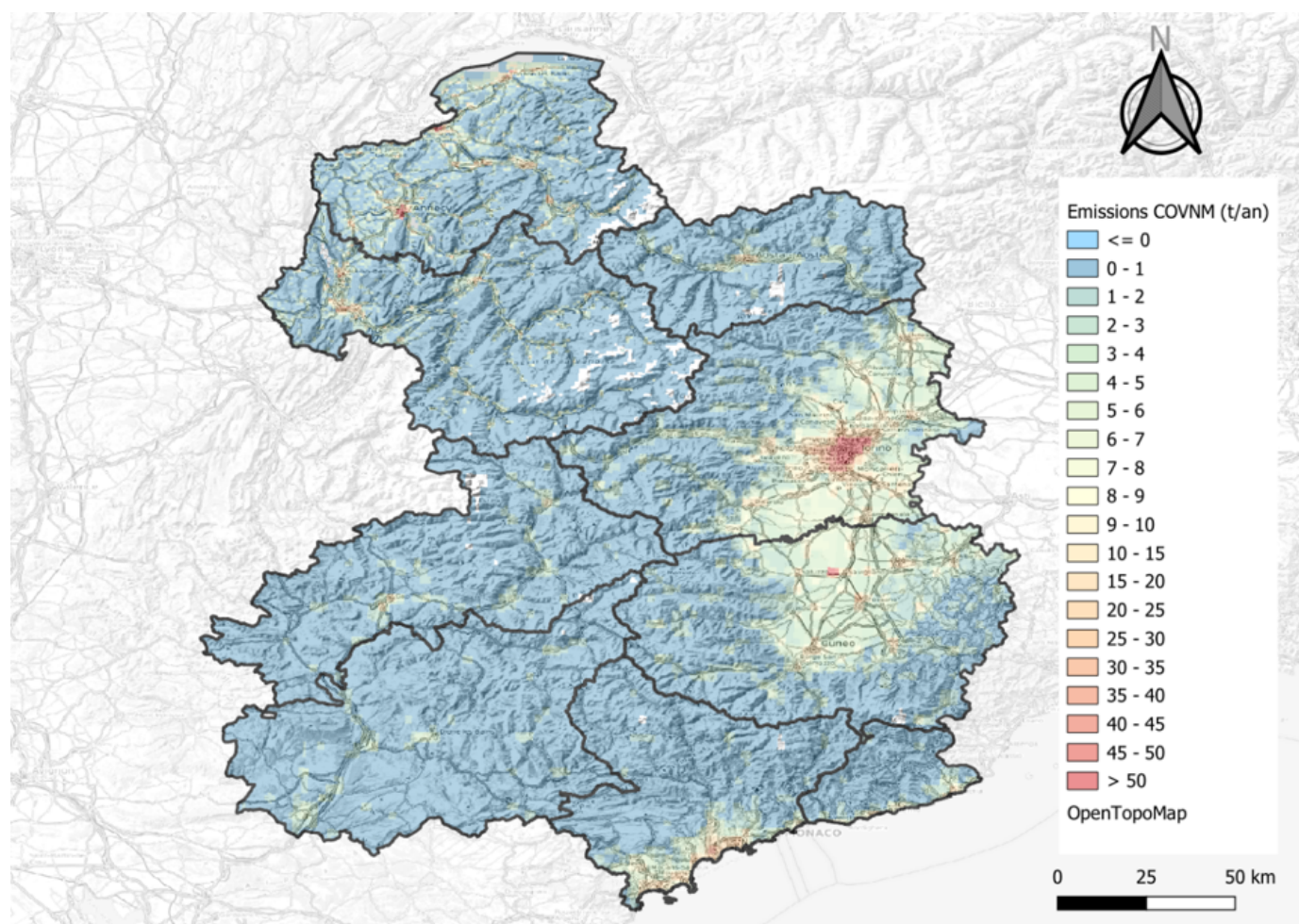


Figure 1 – Émissions de COVNM dans la région ALCOTRA – année 2019 (t/an).

La Figure 2 montre géographiquement les zones les plus impactantes notamment en vallées alpines et dans la région de Turin. Le détail des activités permet aussi d'identifier les secteurs les plus contributeurs dans la région et cibler les réductions les plus efficaces de COVNM. Les secteurs les plus impactants pointés avec ces jeux de données sont les secteurs d'utilisation domestique de solvant, ou de peinture mais aussi dans la production de pain, etc.

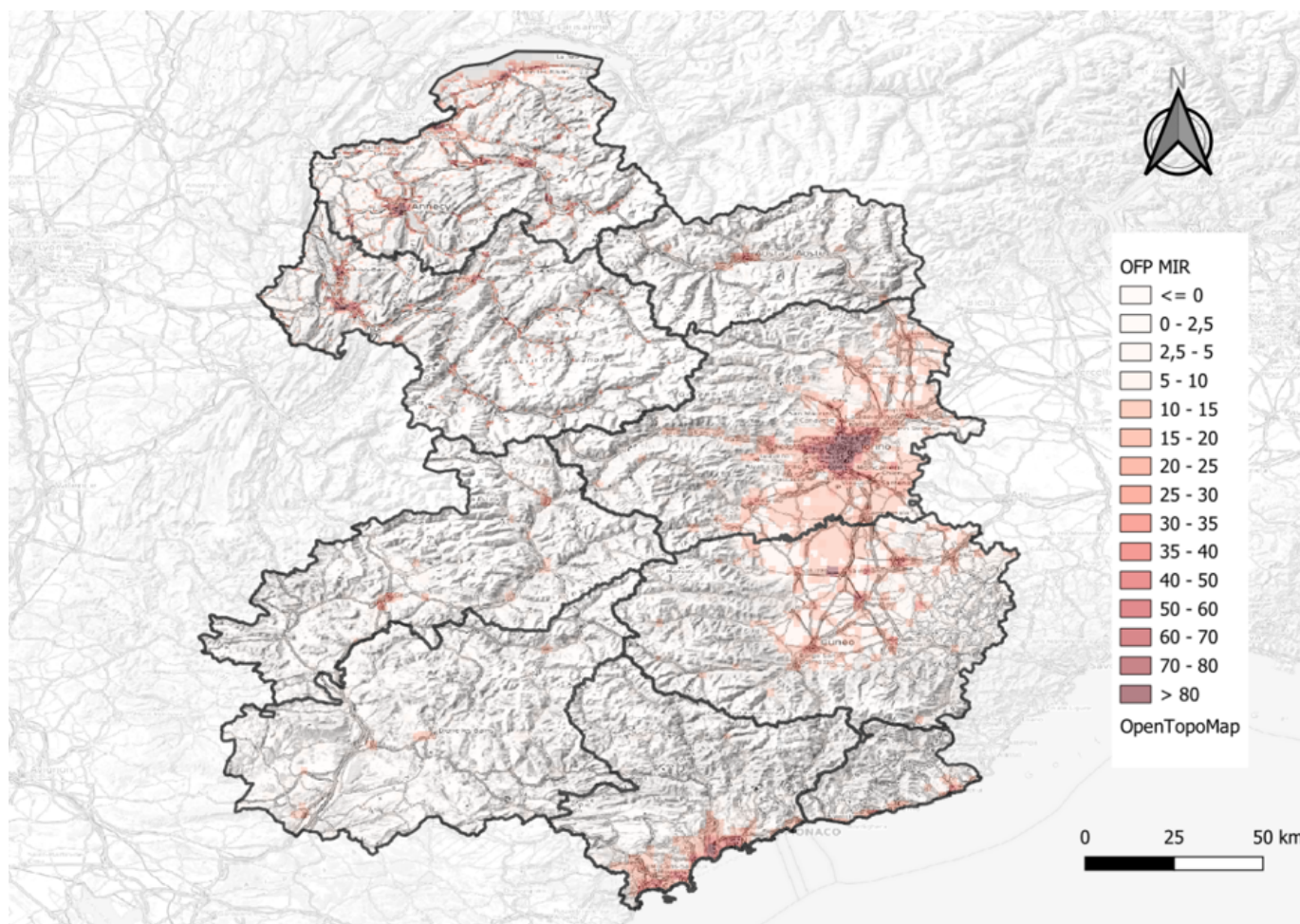


Figure 2 – Potentiel de formation de l’ozone (indice MIR) dans la région ALCOTRA, obtenu à partir des profils de spéciation et d’agrégation développés par ARPA Piemonte.

Ce travail a aussi été mis au regard d’un état de l’art sur les tables permettant de détailler ces espèces par secteur d’activité.

Pour plus de détails et pour consulter l’ensemble des résultats de l’étude, se reporter au rapport dédié publié sur le site web du projet -> https://www.alpaera.eu/a/media/n/15/159725_Rapport_WP4-1-2_Speciation_Atmo_AURA_FR.pdf

SYSTÈMES DE RÉFRIGÉRATION ET DE CLIMATISATION

L’équipe du projet ALP’AERA a recensé les toutes dernières études sur le sujet des émissions liées à l’usage de la climatisation. Elles mettent en lumière un paradoxe de plus en plus brûlant : la climatisation sauve des vies... mais alourdit notre bilan carbone.

■ Des fluides frigorigènes puissants et persistants

Les systèmes de climatisation fonctionnent grâce à des **fluides frigorigènes** (HCFC, CFC, HFC...) qui permettent de transférer la chaleur pour refroidir l'air. Mais lorsqu'un équipement est **mal entretenu, vétuste ou en fin de vie**, ces fluides peuvent **s'échapper dans l'atmosphère**, provoquant des **émissions directes de molécules fluorées** qui possèdent un **pouvoir de réchauffement global (PRG)** très élevé, parfois plusieurs milliers de fois supérieur à celui du CO₂. Si les CFC et HCFC ont été interdits pour protéger la couche d'ozone, les HFC restent massivement utilisés mais leur utilisation a permis de réduire les émissions de CO₂ équivalent (Figure 1).

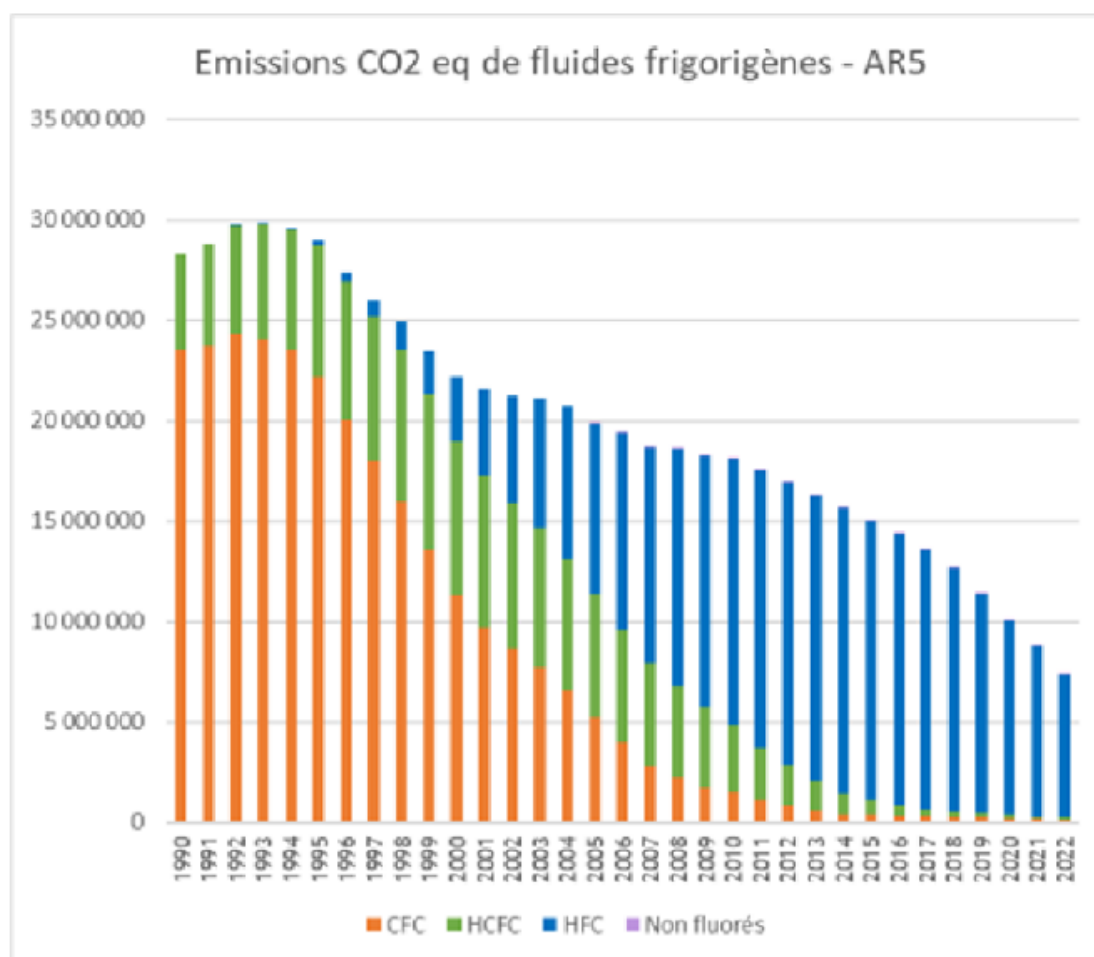


Figure 1 – Émissions mondiales de CO₂ équivalent des fluides frigorigènes entre 1990 et 2022 (source : GIEC).

■ Actions mondiales et européennes pour réduire les émissions de HFC :

Pour remédier à cet enjeu, des réglementations ont été adoptées à l'échelle mondiale et européenne. **Sur le plan international**, [l'amendement de Kigali au Protocole de Montréal](#), entré en vigueur en 2019, impose une

réduction progressive des hydrofluorocarbures (HFC), **visant une baisse de 85 % d'ici à 2045 pour certains pays.**

L'Union européenne va plus loin avec le règlement (UE) 2024/573, qui fixe l'élimination totale des HFC d'ici 2050. Ce texte impose des quotas stricts **dès 2025**, des interdictions sectorielles progressives, ainsi que des obligations de récupération, d'étiquetage et de traçabilité. Les équipements contenant des HFC, comme certains climatiseurs ou réfrigérateurs, seront progressivement interdits entre 2026 et 2035. Le système de quotas est assorti d'une redevance par tonne équivalent CO₂. Cette réglementation ambitieuse place l'UE en tête des efforts mondiaux pour réduire les F-gaz. L'objectif global est de diminuer les émissions de 80 % d'ici 2030 par rapport à 2015.

Les réglementations F-Gaz I, II et III permettent de réduire progressivement les PRG des gaz utilisés. La dernière en date est la réglementation F-Gaz III qui s'applique de 2024 à 2030 ([Règlement \(UE\) 2024/573](#)), elle a pour objectif une interdiction totale des HFC (PRG ≥ 1) en 2030 sur la réfrigération commerciale et industrielle, la réfrigération domestique, la climatisation et les pompes à chaleur résidentielles.

■ Une demande énergétique en forte croissance

L'essor de la climatisation est directement lié à la hausse des températures et à la multiplication des épisodes caniculaires. En France, **25 % des ménages sont déjà équipés**, avec des pics à 47 % dans le Sud. Dans le secteur tertiaire, 40 % des surfaces sont climatisées. En Italie, ce taux d'équipement des ménages est plus élevé, **atteignant 49 % dans le nord du pays**, mais avec de fortes disparités régionales : de 70 % en Vénétie à moins de 5 % en Vallée d'Aoste. Comme en France, cette progression s'observe depuis 2014 et s'appuie notamment sur la diffusion de systèmes réversibles, utilisés à la fois pour le chauffage et le rafraîchissement. Dans le secteur tertiaire italien, la climatisation pèse **pour 57 % de la consommation électrique des bâtiments.**

L'ADEME prévoit que cette tendance pourrait faire **plus que doubler la consommation d'électricité** liée à la climatisation d'ici 2050, même en intégrant des technologies plus efficaces. Ce phénomène représente un enjeu majeur pour les réseaux électriques, mais aussi pour les émissions indirectes, qui varient selon le mix énergétique. L'Agence internationale de l'énergie (AIE) estime que la demande mondiale d'énergie des climatiseurs devrait tripler d'ici 2050 (Figure 2). Sans mesures de mitigation ambitieuses à l'échelle internationale, la généralisation de la climatisation dans les pays émergents — notamment en Asie et en Afrique — pourrait entraîner à nouveau une **hausse des émissions de CO₂** liées à l'utilisation des systèmes réfrigérants.

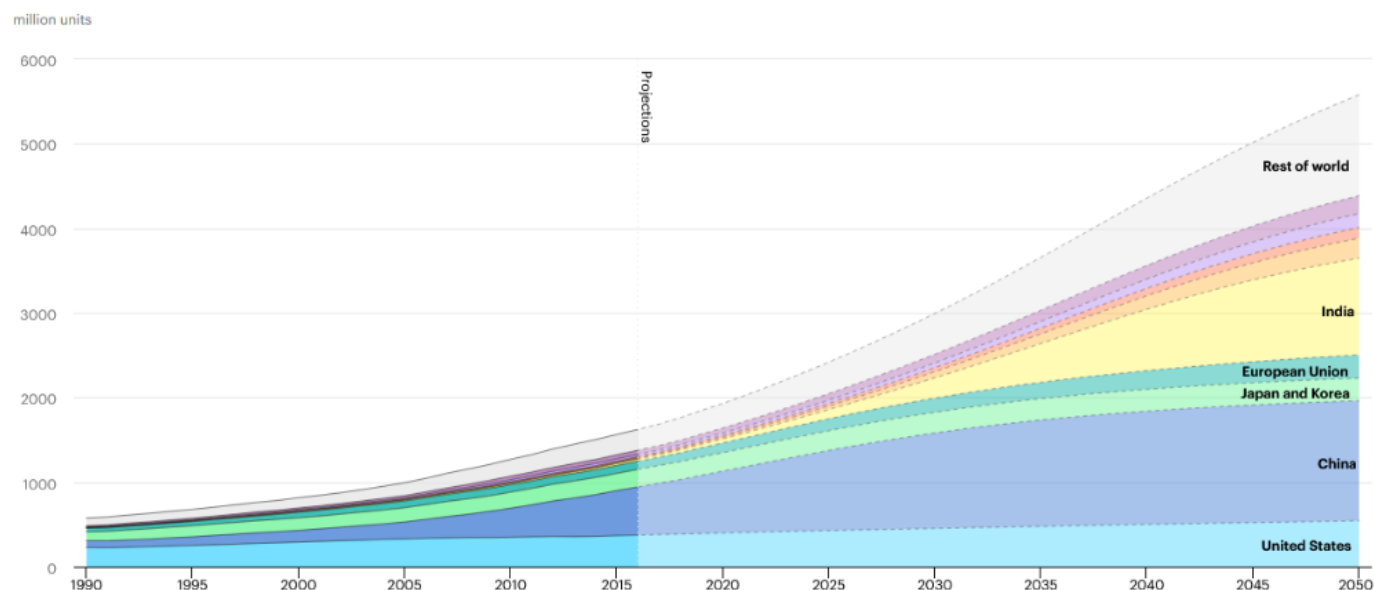


Figure 2 – Parc mondial d'appareils de climatisation entre 1990 et 2050 (source : AIE, 2018).

■ Un effet pervers sur nos villes

Au-delà des émissions de GES, la climatisation a un effet thermique direct sur l'environnement urbain. En rejetant de la chaleur à l'extérieur, les climatiseurs amplifient l'**îlot de chaleur urbain**, surtout lors des pics estivaux. Des modélisations ont montré que si **50 % des logements parisiens** avaient été climatisés en 2003, cela aurait pu augmenter la température extérieure de **2 °C** dans certains quartiers. Cela pose un vrai défi d'adaptation pour les villes, qui doivent repenser leurs stratégies de rafraîchissement, en intégrant des solutions passives et collectives.

Des solutions existent : le développement de réfrigérants naturels ou de nouvelle génération (HFO), la généralisation des systèmes de refroidissement passif, l'amélioration de l'isolation des bâtiments, mais aussi une évolution des comportements individuels (température de consigne, durée d'utilisation...). Une stratégie intégrée — entre innovation, réglementation, sobriété énergétique et gouvernance internationale — est essentielle pour sortir du paradoxe : **Refroidir les villes = réchauffer la planète.**

En savoir plus sur le rapport complet :

https://www.alpaera.eu/a/media/n/14/159727_ALP-AERA_livrable_biblio_climatisation_FR.pdf

L'évaluation de l'impact du changement climatique sur la qualité de l'air

Parmi les principaux objectifs du projet ALP'AERA figure la compréhension de la façon dont le changement climatique influencera la qualité de l'air dans la région ALCOTRA. L'analyse de ces scénarios futurs permet non seulement d'évaluer la sensibilité du territoire, mais également d'identifier les actions les plus efficaces pour protéger et améliorer la qualité de l'air dans les années à venir.

Dans la précédente newsletter, nous avons présenté l'approche méthodologique adoptée par le projet ALP'AERA pour évaluer l'évolution future de la qualité de l'air sur le territoire ALCOTRA, ainsi que le système de modélisation utilisé dans le cadre du WP5 pour réaliser les analyses de scénarios : une chaîne intégrée de modèles numériques qui, à partir des scénarios climatiques mondiaux et régionaux, produit des simulations de la qualité de l'air à haute résolution spatiale sur l'ensemble du territoire transfrontalier.

Le cœur du système, mis en œuvre par ARPA Piemonte, est un modèle numérique tridimensionnel de chimie-transport (Chemistry Transport Model – CTM) qui reproduit de manière réaliste le comportement des polluants en simulant les processus physico-chimiques qui se produisent dans l'atmosphère, c'est-à-dire l'émission, le transport, la dispersion, la transformation chimique et le dépôt. Le système de modélisation est structuré autour de deux domaines de calcul imbriqués (Figure 1) : un domaine européen à une résolution d'environ 12 km, couvrant l'ensemble de l'Europe centre-occidentale, et un domaine ALCOTRA à une résolution d'environ 3 km, qui représente avec un niveau de détail plus élevé le territoire transfrontalier.

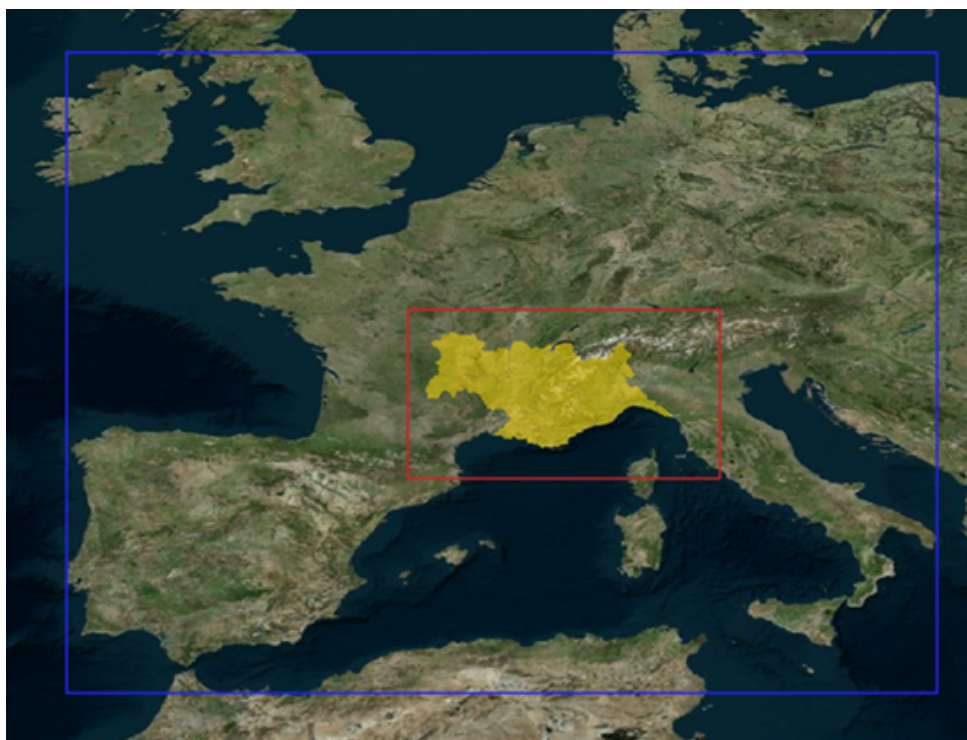


Figure 1 – Domaines de simulation pour les analyses de scénarios.

Le domaine de calcul le plus étendu fournit les conditions aux limites du domaine à plus haute résolution, garantissant ainsi la cohérence entre les échelles continentale et locale. Le modèle de chimie-transport nécessite trois grandes catégories de données d'entrée :

- les champs météorologiques, qui pilotent les dynamiques atmosphériques ; dans notre cas, il s'agit des données issues des scénarios produits par le CMCC (Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici)¹ à l'aide de son modèle climatique régional ;
- les émissions, pour chaque domaine de calcul, de l'ensemble des espèces polluantes prises en compte par le modèle CTM ;
- les données de conditions aux limites, c'est-à-dire les concentrations des polluants imposées aux frontières extérieures du domaine de calcul européen.

Trois horizons temporels ont été simulés, chacun couvrant une période de dix ans : une période historique de référence centrée sur 2015 (2010-2019), un futur à moyen terme centré sur 2050 (2045-2054) et un futur à long terme centré sur 2070 (2065-2074). Les deux scénarios futurs sont fondés sur le scénario climatique SSP3-7.0. La réalisation de simulations continues sur dix années — non pas des années de référence isolées, mais une décennie complète pour chaque scénario — est essentielle pour distinguer le signal du changement climatique de la variabilité naturelle du climat, qui peut masquer les tendances pluriannuelles lorsque seules des années isolées sont analysées.

La production de telles simulations nécessite d'importantes ressources de calcul : les simulations ont été réalisées sur un cluster parallèle de haute performance du CINECA², l'un des principaux centres italiens de calcul intensif. Malgré ces capacités, chaque année simulée requiert plusieurs semaines de calcul et les données produites se mesurent en dizaines de téraoctets. Les simulations relatives à la période historique ainsi que celles du futur à moyen terme sont désormais achevées, tandis que les simulations correspondant au futur à long terme sont actuellement en cours et en phase de finalisation.

LES SCÉNARIOS CLIMATIQUES AUX HORIZONS 2050 ET 2070 SUR LE TERRITOIRE ALCOTRA

Le scénario climatique utilisé pour les analyses de scénarios du projet ALP'AERA appartient à la famille des Shared Socioeconomic Pathways (SSPs)³, définie dans le Sixième Rapport d'évaluation sur le changement climatique (AR6) du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat – IPCC). Plus précisément, le projet s'appuie sur le scénario SSP3-7.0, qui décrit un avenir marqué par une rivalité croissante entre les régions du monde et par une aggravation des inégalités sociales, et qui prévoit un forçage radiatif de 7 W/m² à l'horizon 2100, se situant ainsi dans la catégorie intermédiaire à élevée des scénarios retenus par le

¹ <https://www.cmcc.it/>

² <https://www.cineca.it/it>

³ <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>

GIEC. Dans le cadre du projet, les simulations climatiques correspondant à ce scénario, pour les deux domaines de calcul et les horizons temporels considérés (période historique de référence, futur à moyen terme et futur à long terme), ont été réalisées par le CMCC à l'aide du modèle climatique COSMO-CLM, développé dans le cadre du consortium européen COSMO⁴.

Afin d'évaluer l'évolution des conditions atmosphériques au cours du temps, plusieurs indicateurs climatiques ont été analysés ; ils permettent de décrire de manière claire, synthétique et efficace les principaux risques liés au climat, y compris à l'échelle de vastes territoires. L'analyse s'est concentrée sur l'indice des jours de gel (Frost Days – FD), sur l'indice des nuits tropicales (Tropical Nights – TR) ainsi que sur le calcul des percentiles des températures moyenne, minimale et maximale. Selon la définition de l'Organisation météorologique mondiale (OMM), l'indice des jours de gel (FD) correspond au nombre total de jours, sur une période de référence donnée, pour lesquels la température minimale journalière est inférieure à 0 °C. À l'inverse, l'indice des nuits tropicales (TR) est défini comme le nombre total de jours durant lesquels la température minimale journalière dépasse 20 °C. Les percentiles permettent de caractériser non seulement les conditions moyennes, mais également les événements les plus intenses : des valeurs élevées, telles que les 95^e et 99^e percentiles, sont en effet associées à des phénomènes extrêmes, comme les vagues de chaleur ou les précipitations intenses. Ces indicateurs ont été calculés aussi bien pour la période historique que pour les scénarios futurs, afin de quantifier de manière claire l'ampleur des changements attendus et l'évolution possible des événements extrêmes aux différents horizons temporels, grâce au calcul des anomalies par rapport à la période de référence.

La Figure 2 présente la carte de l'anomalie du **50^e percentile de la température moyenne** sur le domaine ALCOTRA pour les deux horizons futurs. Elle montre qu'une augmentation de 1 à 2 °C de la température moyenne est attendue sur toutes les régions à l'horizon 2050, avec un réchauffement encore plus marqué à l'horizon 2070.

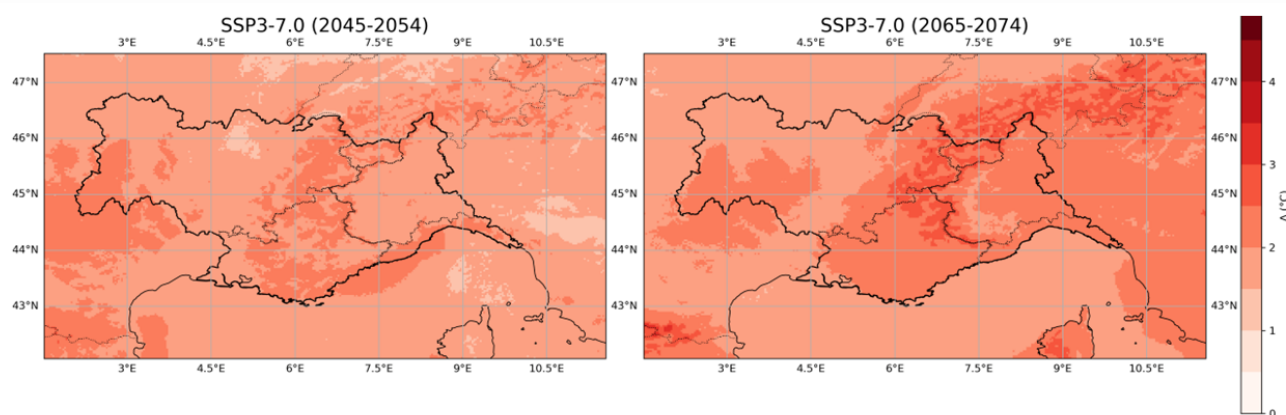


Figure 2 – Anomalie du 50^e percentile de la température moyenne pour les deux horizons futurs sur le domaine ALCOTRA.

⁴ <https://www.clm-community.eu/>

La Figure 3 présente la carte de l'anomalie du **99^e percentile de la température maximale** sur le domaine ALCOTRA pour les deux horizons temporels considérés. Les résultats mettent en évidence une intensification progressive des extrêmes de température : au cours de la période 2045-2054, les augmentations par rapport à la période de référence sont comprises entre 2 et 4 °C, tandis que pour la période 2065-2074, les anomalies dépassent largement 5 °C, les valeurs les plus élevées étant concentrées dans les secteurs septentrionaux du domaine. Ces résultats indiquent une augmentation attendue, au cours du siècle, tant de la fréquence que de l'intensité des vagues de chaleur, avec une aggravation du risque associé aux épisodes de chaleur extrême.

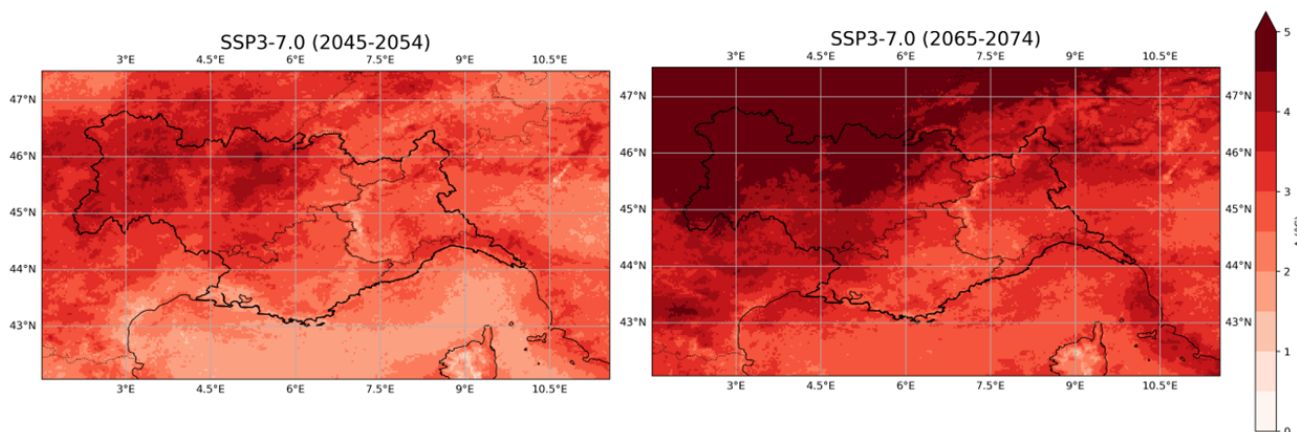


Figure 3 – Anomalie du 99^e percentile de la température maximale pour les deux horizons futurs sur le domaine ALCOTRA.

Les extrêmes froids évoluent également vers des conditions plus douces. La Figure 4 montre la distribution spatiale de l'anomalie du **1^{er} percentile de la température minimale** sur le domaine ALCOTRA pour les deux horizons temporels considérés. On observe une augmentation généralisée des températures minimales sur l'ensemble de la zone d'étude, avec un réchauffement progressif entre le milieu et la fin du siècle, particulièrement marqué dans les zones de montagne, où les anomalies dépassent 5 °C. Cette évolution montre une diminution progressive de la fréquence et de l'intensité des épisodes de froid extrême, notamment des nuits les plus froides.

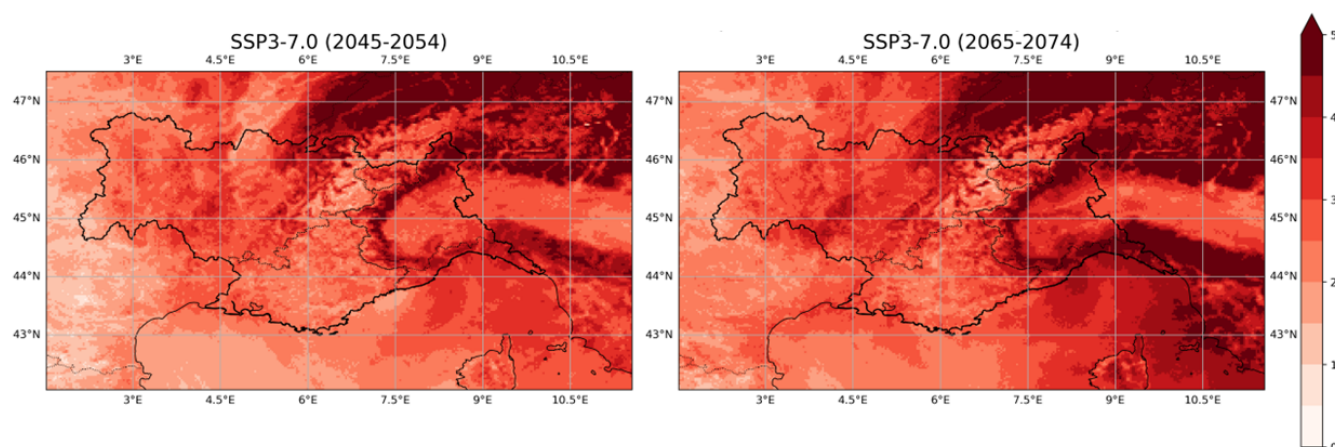


Figure 4 – Anomalie du 1^{er} percentile de la température minimale pour les deux horizons futurs sur le domaine ALCOTRA.

La Figure 5 résume la distribution spatiale des anomalies du 99^e percentile de la température maximale (a) et du 1^{er} percentile de la température minimale (b) dans les différentes régions du domaine ALCOTRA. Pour les deux variables, les distributions se déplacent vers des valeurs plus élevées au cours de la période 2065-2074 par rapport à 2045-2054, confirmant une intensification du réchauffement au fil du siècle. Pour les extrêmes de température maximale, la région Auvergne-Rhône-Alpes (AURA) présente les anomalies médianes les plus élevées ainsi que la plus forte variabilité, avec des valeurs dépassant localement 6 °C, tandis que les régions Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA), Ligurie, Piémont et Vallée d'Aoste affichent des augmentations plus modérées, généralement comprises entre 3 et 4 °C. Les extrêmes de température minimale montrent également une augmentation des anomalies dans l'ensemble des régions au cours du second horizon temporel ; les hausses sont particulièrement marquées en Ligurie et en Auvergne-Rhône-Alpes, tandis que le Piémont et la Vallée d'Aoste présentent une plus grande dispersion des valeurs, révélatrice d'une hétérogénéité spatiale plus prononcée. Dans l'ensemble, les boxplots confirment que le réchauffement concerne aussi bien les extrêmes chauds que les extrêmes froids, avec une intensification progressive dans le scénario futur et des différences régionales qui s'expliquent par les caractéristiques orographiques et climatiques du territoire.

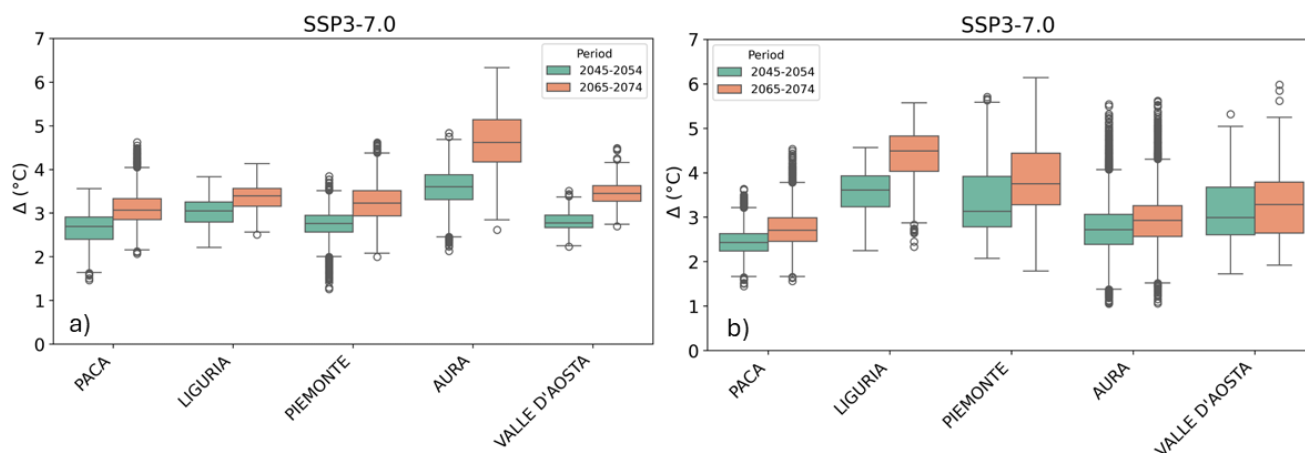


Figure 5 – Boxplots⁵ des anomalies du 99^e percentile de la température maximale (a) et du 1^{er} percentile de la température minimale (b) pour les deux horizons futurs sur les régions du domaine ALCOTRA.

La Figure 6 présente la carte de l'anomalie de l'indice des **jours de gel (Frost Days – FD)** sur le domaine ALCOTRA pour les deux horizons temporels futurs. On observe une diminution du nombre de jours où la température minimale est inférieure à 0 °C, plus marquée au cours de la période 2065-2074 que durant la période 2045-

⁵ La boîte à moustaches (boxplot) est un graphique qui représente la distribution d'un ensemble de données au moyen de cinq statistiques résumées : minimum, premier quartile (Q1), médiane, troisième quartile (Q3) et maximum. La « boîte » centrale couvre l'intervalle interquartile (IQR = Q3 – Q1), avec une ligne intérieure indiquant la médiane. Les « moustaches » s'étendent jusqu'aux valeurs extrêmes non aberrantes, tandis que les points situés au-delà des moustaches (généralement au-delà de 1,5 × IQR) sont représentés comme des valeurs aberrantes (outliers).

2054. Les diminutions les plus importantes concernent les zones montagneuses alpines, où une réduction de 40 à 60 jours de gel par an est attendue, tandis que les variations sont généralement plus limitées dans les zones côtières et de plaine. Cette évolution est cohérente avec l'augmentation des températures minimales mise en évidence dans les analyses précédentes et traduit une diminution progressive de la fréquence des épisodes de gel, avec des conséquences potentielles sur le régime d'enneigement, les écosystèmes de montagne et les activités agricoles.

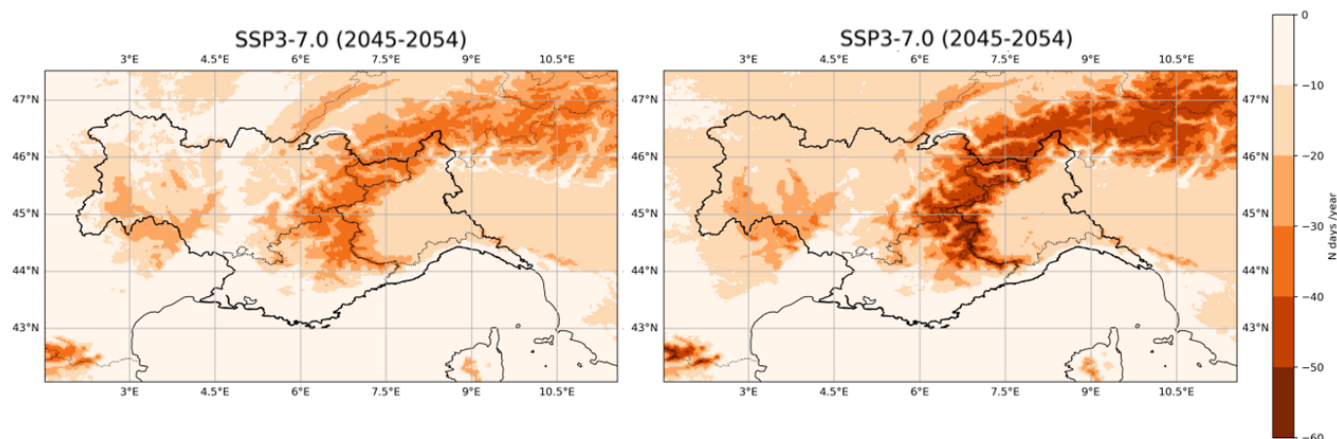


Figure 6 – Anomalie du nombre de jours de gel (FD) pour les deux horizons futurs sur le domaine ALCOTRA.

La Figure 7 présente la distribution spatiale de l'anomalie de l'indice des **nuits tropicales (Tropical Nights – TR)** sur le domaine ALCOTRA pour les deux horizons temporels futurs selon le scénario SSP3-7.0. Dans l'ensemble, on observe une augmentation marquée du nombre de nuits durant lesquelles la température minimale dépasse 20 °C, avec un signal déjà visible au cours de la période 2045-2054 et une intensification plus prononcée pour la période 2065-2074. L'augmentation est particulièrement importante dans les zones de plaine et le long des secteurs côtiers, notamment sur le littoral ligure et dans la plaine du Pô, où les anomalies atteignent des valeurs de 40 à 50 nuits supplémentaires par an. Les zones de collines et certains fonds de vallées alpines présentent également une augmentation significative, tandis que les secteurs montagneux conservent des valeurs relativement plus modérées, tout en affichant un signal positif au cours du second horizon temporel. Dans l'ensemble, la distribution spatiale confirme une expansion et une intensification progressives des nuits tropicales au cours du siècle, cohérentes avec le réchauffement des températures minimales déjà mis en évidence par les analyses des percentiles et des extrêmes froids, avec des impacts potentiellement importants sur l'inconfort bioclimatique estival et sur la fréquence des épisodes de chaleur nocturne.

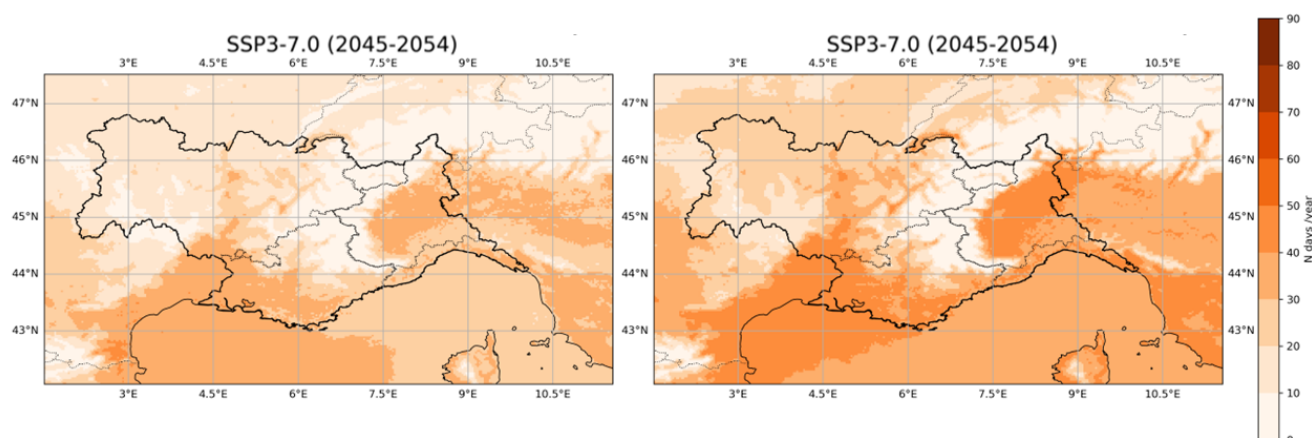


Figure 7 – Anomalie du nombre de nuits tropicales (TR) pour les deux horizons futurs sur le domaine ALCOTRA.

LES SIMULATIONS DE QUALITÉ DE L'AIR POUR LA PÉRIODE HISTORIQUE DE RÉFÉRENCE 2010-2019

Les simulations correspondant à la période de référence ont été réalisées en utilisant les données d'entrée suivantes pour le modèle de qualité de l'air :

- les simulations climatiques relatives à la période historique, réalisées avec le modèle climatique régional du CMCC, mais appliquées à la période passée observée 2010-2019, en utilisant comme forçage aux limites du domaine les conditions atmosphériques issues d'une réanalyse globale ;
- l'inventaire harmonisé des émissions sur le territoire ALCOTRA, produit dans le cadre de l'action WP4.1, avec l'année de référence 2019 et, pour le domaine européen, l'inventaire fourni par le Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS)⁶ pour les années 2010-2019 ;
- les champs de concentration des principaux polluants atmosphériques, fournis à l'échelle mensuelle par le modèle climatique global MRI-ESM2.0⁷ pour la période 2010-2019.

Les simulations de la période historique présentent un double intérêt. Elles constituent tout d'abord la période de référence à partir de laquelle seront analysées les évolutions futures de la qualité de l'air sur le territoire ALCOTRA. Par ailleurs, la comparaison entre les résultats des simulations historiques et les données de qualité de l'air effectivement mesurées par les réseaux de surveillance entre 2010 et 2019⁸ permet de valider le système de modélisation ainsi que ses différentes configurations, en mettant en évidence ses caractéristiques

⁶ <https://atmosphere.copernicus.eu/>

⁷ MRI-ESM2.0 Earth System Model, doi:10.22033/ESGF/CMIP6.6842

⁸ Les données observées proviennent de la base de données de l'AEE (Agence européenne pour l'environnement) et couvrent l'ensemble de la période 2010-2019, avec un réseau qui comprend, pour la seule zone ALCOTRA, plus de 130 stations pour le dioxyde d'azote, environ 96 pour les PM₁₀, 41 pour les PM_{2.5} et 58 stations de fond pour l'ozone, réparties entre le Piémont, la Ligurie, la Vallée d'Aoste, l'Auvergne-Rhône-Alpes et la Provence-Alpes-Côte d'Azur

récurrentes et ses limites. Ces éléments sont essentiels pour interpréter correctement les résultats relatifs aux scénarios futurs :

- pour le dioxyde d'azote (NO₂), une tendance à la sous-estimation par rapport aux observations est constatée. Les performances s'améliorent en passant du domaine européen au domaine ALCOTRA, grâce à la résolution spatiale plus fine qui permet de mieux représenter les structures spatiales du territoire transfrontalier ;
- pour les particules fines (PM₁₀ et PM_{2.5}), la sous-estimation est plus marquée et systématique sur les deux domaines de simulation, notamment durant le trimestre hivernal (décembre, janvier, février) ;
- pour l'ozone, une tendance générale à la sous-estimation est observée, moins importante toutefois sur le domaine ALCOTRA.

Les résultats obtenus sont cohérents avec ceux rapportés dans la littérature pour des systèmes de modélisation similaires appliqués à des échelles spatiales et temporelles comparables, en tenant également compte de la nature des données météorologiques et des conditions aux limites utilisées en entrée du système (simulations historiques issues d'un modèle climatique).

LES SIMULATIONS DE QUALITÉ DE L'AIR POUR LE FUTUR À MOYEN TERME 2045-2054

Une fois la période historique de référence construite et la fiabilité du système vérifiée, il a été possible de simuler le scénario futur à l'horizon 2050, correspondant à la décennie 2045-2054. Les simulations du futur à moyen terme ont été réalisées en utilisant les données d'entrée suivantes pour le modèle de qualité de l'air :

- les simulations climatiques selon le scénario SSP3-7.0, produites avec le modèle climatique régional du CMCC, en utilisant comme forçage aux limites du domaine européen les données issues du modèle climatique global, également selon le scénario SSP3-7.0 ;
- la projection à l'horizon 2050 des inventaires d'émissions utilisés pour la période historique de référence. Les émissions ont été projetées sur la base des tendances évolutives obtenues avec le modèle GAINS-Europe⁹, selon le scénario d'évolution CLE (Current Legislation) d'ECLIPSE v6, c'est-à-dire le scénario « à législation courante », qui décrit l'évolution attendue des émissions européennes de polluants atmosphériques en présence des politiques déjà planifiées, sans mise en œuvre de mesures supplémentaires ;
- les champs de concentration des principaux polluants atmosphériques, fournis à l'échelle mensuelle par le modèle climatique global MRI-ESM2.0¹⁰ selon le scénario SSP3-7.0, cohérents avec le scénario

⁹ Greenhouse Gas and Air Pollution Interactions and Synergies (GAINS)-Model, <https://web.jrc.ec.europa.eu/policy-model-inventory/explore/models/model-gains/>

¹⁰ MRI-ESM2.0 Earth System Model, doi:10.22033/ESGF/CMIP6.6842

climatique produit par le CMCC (MRI-ESM2.02 étant en effet le modèle qui fournit les concentrations d'aérosols et de polluants atmosphériques au modèle global utilisé par le CMCC).

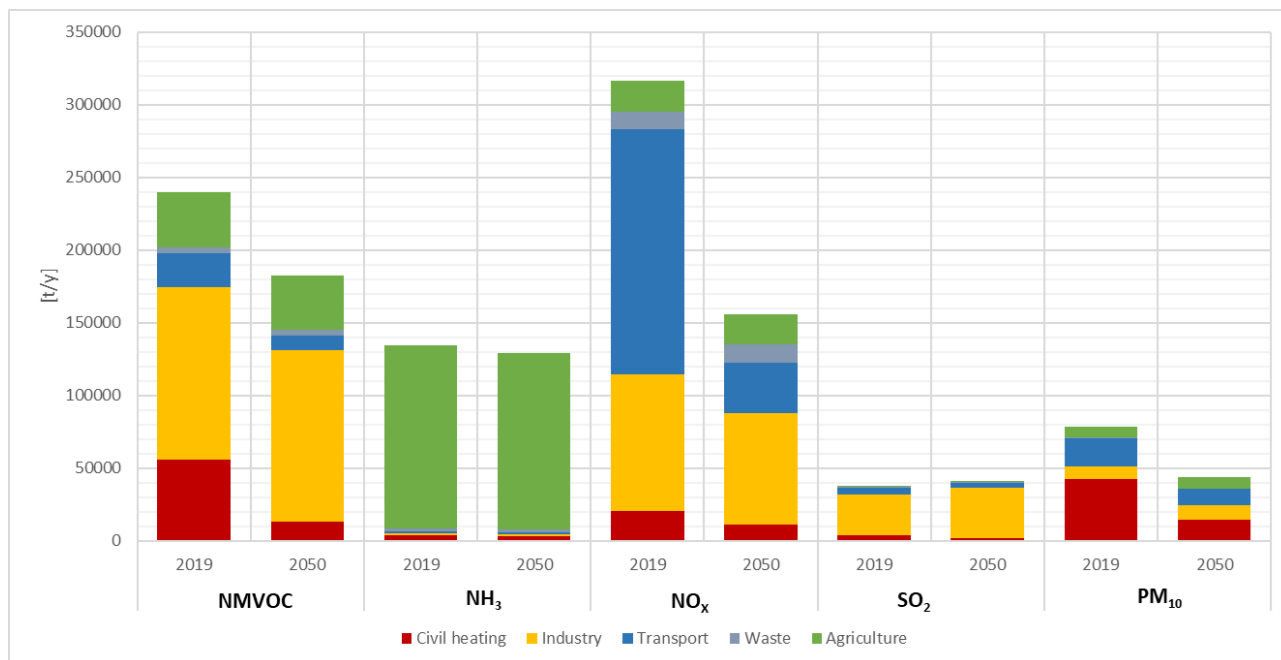


Figure 8 – Totaux des émissions sur le domaine ALCOTRA des principaux polluants atmosphériques, répartis par macro-secteur, pour le scénario de référence 2019 et la projection à l'horizon 2050.

Les simulations de qualité de l'air à l'horizon 2050 combinent le forçage climatique SSP3-7.0 avec les projections d'émissions du scénario GAINS Europe CLE. D'un point de vue qualitatif, les deux scénarios apparaissent cohérents, notamment lorsqu'ils sont considérés à l'échelle du continent européen. Le scénario SSP3-7.0 correspond à la trajectoire narrative « Regional Rivalry », caractérisée par une faible coopération internationale, un développement socio-économique inégal et une ambition limitée en matière de politiques environnementales. Le scénario GAINS CLE repose sur l'application complète de la législation existante en matière de qualité de l'air, sans introduction de nouvelles politiques, et représente donc une estimation de référence prudente des réductions d'émissions attendues. Cependant, cette cohérence ne se retrouve pas totalement au niveau structurel. Le scénario SSP3-7.0 provient de modèles intégrés d'évaluation (Integrated Assessment Models – IAM), qui représentent de manière cohérente les évolutions socio-économiques, les systèmes énergétiques, l'utilisation des sols et les émissions. À l'inverse, GAINS CLE constitue un scénario régional d'émissions, fondé sur les politiques européennes officielles et sur des hypothèses technologiques détaillées par secteur. Malgré ces différences, cette combinaison représente un compromis pragmatique entre la cohérence climatique globale et le niveau de détail régional des émissions. Elle permet en effet d'utiliser des projections climatiques avancées associées à des inventaires d'émissions à haute résolution, pertinents du

point de vue des politiques publiques. Pour le dioxyde d'azote et les particules (PM₁₀ et PM_{2.5}), dont les concentrations sur le domaine ALCOTRA sont principalement déterminées par les sources locales, régionales et continentales, la combinaison SSP3-7.0/GAINS CLE représente un futur caractérisé par un climat plus chaud et par des politiques européennes de qualité de l'air inchangées par rapport à la situation actuelle. Pour l'ozone, il convient toutefois de considérer que les simulations à l'horizon 2050 pourraient conduire à une surestimation de la contribution de l'ozone provenant de l'extérieur du domaine européen de calcul. L'ozone possède en effet une durée de vie atmosphérique longue et une forte composante de transport à longue distance : une partie de ses concentrations sur le domaine ALCOTRA provient de l'extérieur, via les conditions aux limites du modèle. Ces conditions reflètent le contexte global d'émissions du scénario SSP3-7.0, dans lequel le niveau de fond global d'ozone est plus élevé que celui attendu dans un scénario climatique cohérent avec des politiques européennes.

Les résultats des simulations 2045-2054 ont été analysés par rapport à la période de référence 2010-2019, en comparant les distributions statistiques des concentrations journalières simulées sur l'ensemble des dix années, à l'aide d'une série d'indicateurs percentilaires. L'utilisation des percentiles permet de caractériser plus complètement la distribution des concentrations par rapport à la seule moyenne annuelle. Cette dernière décrit le niveau moyen des concentrations, mais ne fournit pas d'informations sur leur variabilité ni sur les épisodes de pointe, pourtant importants pour l'évaluation des impacts sanitaires et pour la comparaison avec les valeurs limites réglementaires. Le 50^e percentile (médiane) représente la concentration journalière typique ; les 75^e, 90^e et 95^e percentiles décrivent des situations progressivement plus élevées. Une fois les percentiles disponibles, les anomalies correspondantes ont été calculées, c'est-à-dire les différences en pourcentage entre les percentiles du futur à moyen terme et ceux de la période de référence. Ce calcul a été effectué tant pour chaque maille du domaine de calcul, afin d'obtenir la distribution spatiale des différences sur le territoire ALCOTRA, que sur les données extraites aux points correspondant aux stations de surveillance¹¹, afin d'obtenir une projection à l'horizon 2050 des séries de mesures observées, basée sur les résultats des simulations, et de les comparer aux seuils réglementaires en vigueur. Le cadre réglementaire de référence adopté est celui de la nouvelle Directive européenne sur la qualité de l'air 2024/2881, entrée en vigueur au niveau européen en décembre 2024. Cette directive introduit, à partir de 2030, des valeurs limites plus strictes que celles prévues par la réglementation précédente, actuellement encore en vigueur dans les législations nationales des États membres (la transposition nationale de la directive devra être réalisée avant fin 2026).

¹¹ Sur l'ensemble du domaine ALCOTRA : 131 stations pour le NO₂, 96 pour les PM₁₀, 41 pour les PM_{2.5}, 58 pour l'ozone

LA QUALITÉ DE L'AIR DANS LE FUTUR À MOYEN TERME 2045-2054 SUR LE TERRITOIRE ALCOTRA

Pour le **dioxyde d'azote**, les tendances de réduction des émissions prévues par le scénario GAINS CLE, présentées dans la Figure 8, se traduisent par une diminution nette et significative des concentrations moyennes journalières sur l'ensemble du domaine ALCOTRA. Les réductions concernent l'ensemble des percentiles de la distribution. Elles sont plus importantes dans les zones urbaines et le long des principaux axes routiers, tandis qu'elles sont plus limitées dans les zones montagneuses, où elles deviennent significatives principalement pour les percentiles les plus élevés et durant la période hivernale (décembre, janvier et février).

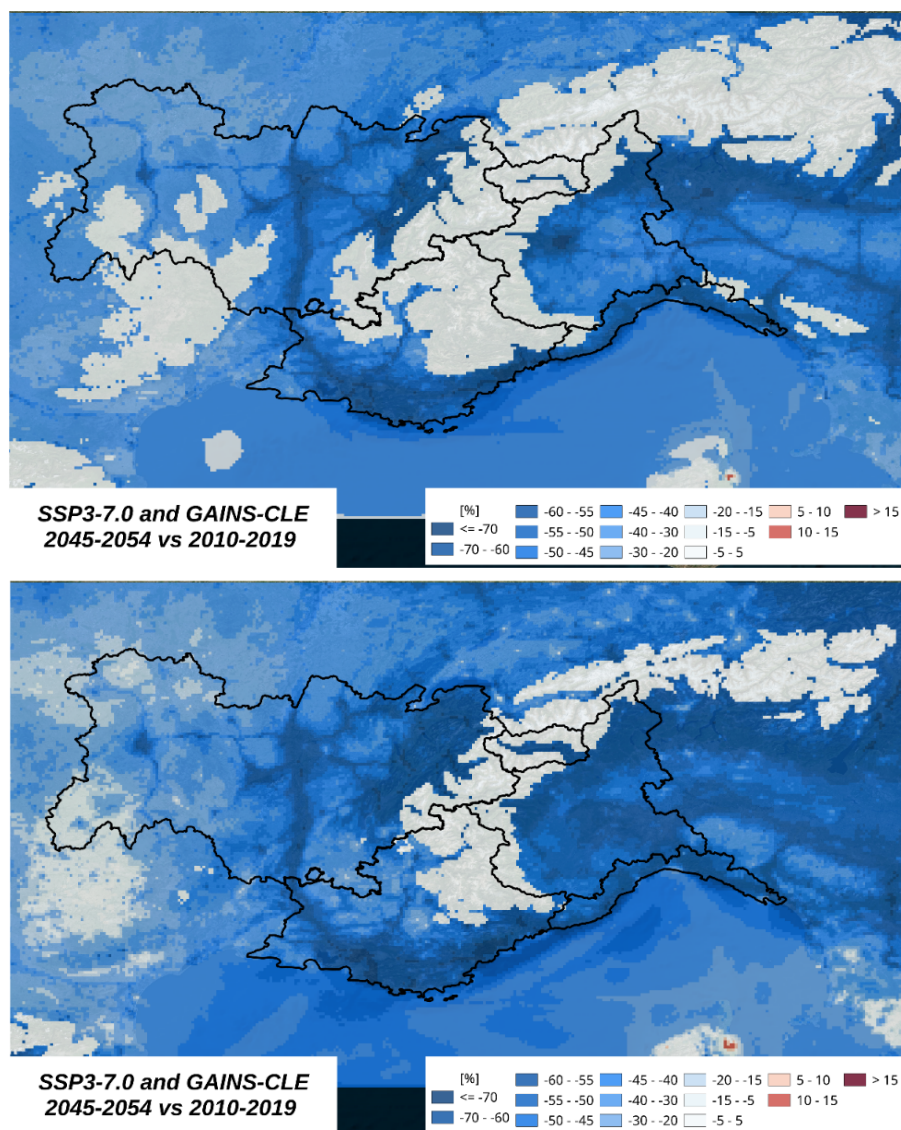


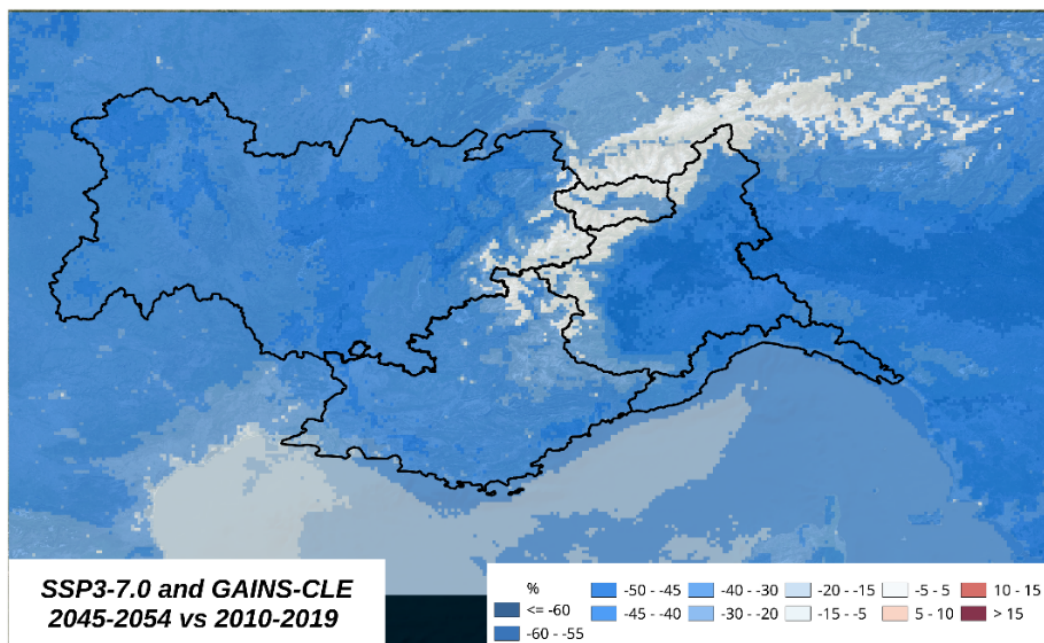
Figure 9 – Dioxyde d'azote, carte de l'anomalie du 50^e percentile (en haut) et du 90^e percentile (en bas) des moyennes journalières à l'horizon 2050 par rapport au scénario de référence 2010-2019. Les variations négatives (en nuances de bleu) indiquent des concentrations plus faibles en 2050 par rapport à la période de référence ; inversement pour les variations positives (en nuances de rouge).

L'analyse des projections à moyen terme des données mesurées de dioxyde d'azote met toutefois en évidence la possibilité que certains jours présentent encore des concentrations moyennes journalières supérieures à $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, seuil introduit par la Directive 2024/2881 comme nouvelle valeur limite journalière, qui ne devra pas être dépassée plus de 18 jours par année civile. Dans un nombre limité de stations urbaines, le 95^e percentile de la moyenne journalière — correspondant aux environ 180 jours présentant les concentrations les plus élevées de la décennie — reste supérieur à $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Le simple respect de la législation environnementale déjà planifiée au niveau européen pourrait donc ne pas être suffisant pour garantir une pleine conformité réglementaire en 2050 dans les contextes les plus critiques.

Pour les particules, aussi bien pour la fraction PM_{10} que pour la fraction plus fine $\text{PM}_{2.5}$, les simulations à l'horizon 2050 montrent des réductions généralisées sur l'ensemble du domaine ALCOTRA. Dans les zones montagneuses, ces diminutions ne sont visibles que pour les percentiles les plus élevés de la distribution des moyennes journalières (75^e, 90^e et 95^e percentiles). Les réductions sont observées au cours de toutes les saisons, mais elles apparaissent plus marquées en hiver et en automne (de septembre à février).

Toutefois, la projection des données mesurées par les stations de surveillance pour la période 2045-2054 montre que, malgré ces réductions importantes, un risque résiduel de dépassement des nouvelles valeurs limites journalières introduites par la Directive 2024/2881 demeure, en particulier pour les $\text{PM}_{2.5}$ et, dans une moindre mesure, pour les PM_{10} . Pour les PM_{10} , la valeur limite journalière est fixée à $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$: le 95^e percentile — correspondant à environ 180 jours sur la décennie — reste supérieur à ce seuil dans certaines stations du Piémont. Pour les $\text{PM}_{2.5}$, la valeur limite journalière de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ apparaît potentiellement dépassée de manière plus étendue : les 90^e et 95^e percentiles dépassent ce seuil dans de nombreuses stations du Piémont, et la problématique concerne également certaines stations de Ligurie et de la région PACA (Provence-Alpes-Côte d'Azur). Ces résultats suggèrent que les mesures déjà prévues par la législation en vigueur pourraient ne pas être suffisantes pour garantir le respect des nouveaux standards relatifs aux particules fines dans une partie non négligeable du territoire transfrontalier.

50th percentile anomaly of the daily mean PM₁₀



90th percentile anomaly of the daily mean PM₁₀

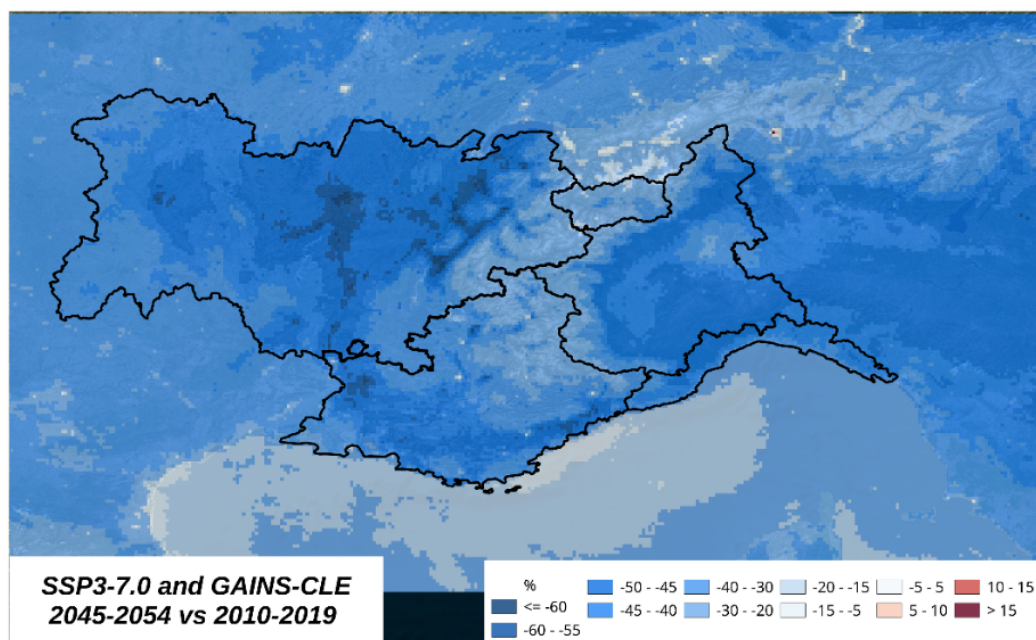
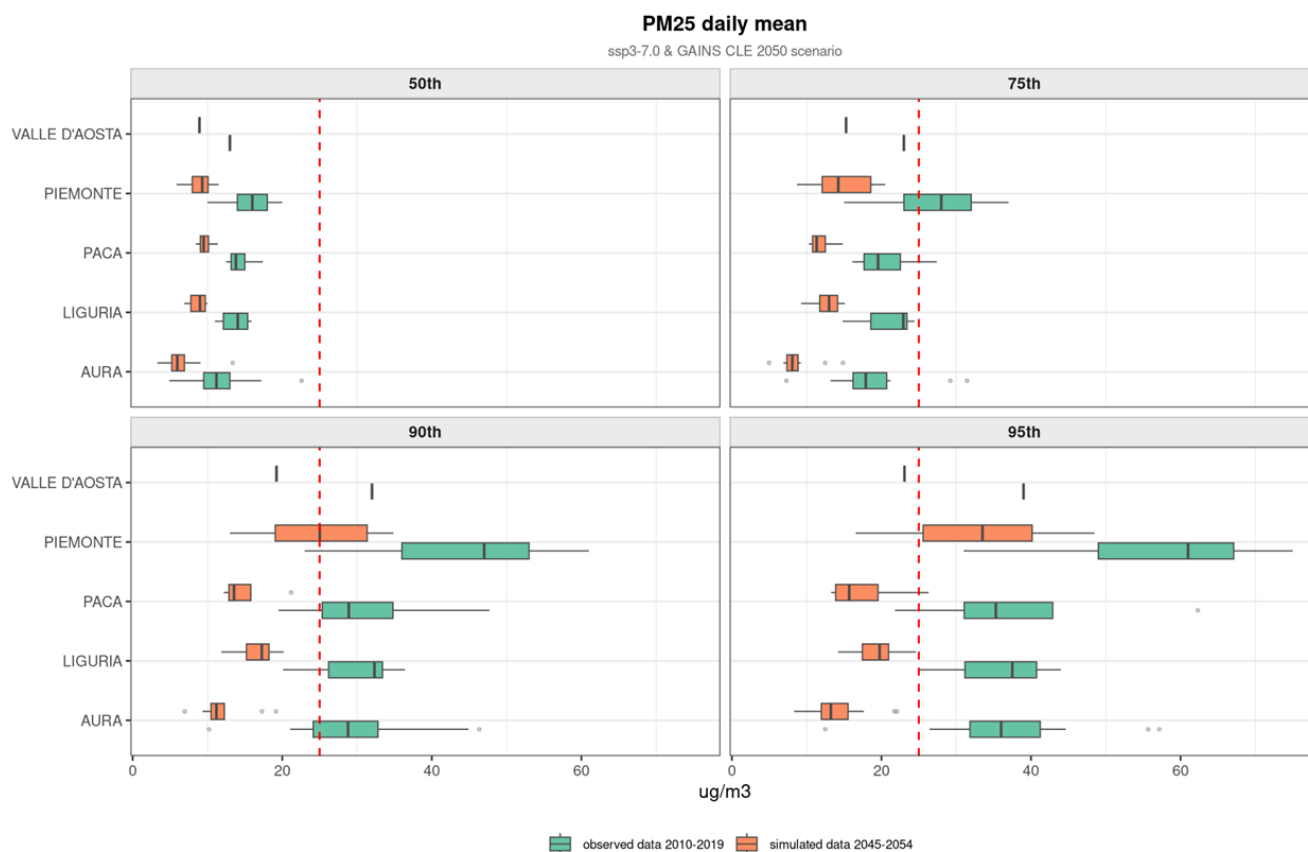


Figure 10 – Particules PM₁₀, carte de l'anomalie du 50^e percentile (en haut) et du 90^e percentile (en bas) des moyennes journalières à l'horizon 2050 par rapport au scénario de référence 2010-2019. Les variations négatives (en nuances de bleu) indiquent des concentrations plus faibles en 2050 par rapport à la période de référence ; inversement pour les variations positives (en nuances de rouge).



EEA data 2010-2019

Figure 11 – Particules $PM_{2.5}$, moyennes journalières : boxplots comparant¹² les percentiles des données mesurées sur le territoire ALCOTRA au cours de la période de référence 2010-2019 (en vert) et les percentiles des séries de mesures projetées dans le scénario à l'horizon 2050 (en orange).

L'ozone est le polluant pour lequel les résultats sont les plus complexes à interpréter. L'analyse met en évidence, pour le futur à moyen terme, un comportement contrasté : les concentrations médianes (50^e percentile) tendent à augmenter, en particulier dans les zones urbaines et surtout au cours des mois d'automne et d'hiver, tandis que les percentiles les plus élevés montrent une légère tendance à la diminution, à l'exception des zones montagneuses où l'augmentation se maintient au cours de toutes les saisons, y compris en été. Pour interpréter ces résultats, il est nécessaire de rappeler que l'ozone troposphérique est un polluant secondaire : il n'est pas émis directement par les sources, mais se forme dans l'atmosphère par des réactions photochimiques impliquant les oxydes d'azote (NO_x) et les composés organiques volatils. La chimie de

¹² La boîte à moustaches (boxplot) est un graphique qui représente la distribution d'un ensemble de données au moyen de cinq statistiques résumées : minimum, premier quartile (Q1), médiane, troisième quartile (Q3) et maximum. La « boîte » centrale couvre l'intervalle interquartile ($IQR = Q3 - Q1$), avec une ligne intérieure indiquant la médiane. Les « moustaches » s'étendent jusqu'aux valeurs extrêmes non aberrantes, tandis que les points situés au-delà des moustaches (généralement au-delà de $1,5 \times IQR$) sont représentés comme des valeurs aberrantes (outliers).

formation de l'ozone est telle que, dans les zones fortement urbanisées, une diminution des concentrations d'oxydes d'azote — attendue à l'horizon 2050, comme indiqué précédemment — peut favoriser une augmentation des concentrations d'ozone, tandis que le phénomène inverse se produit dans les zones rurales. Par ailleurs, l'ozone possède une durée de vie atmosphérique longue et une forte composante de transport à longue distance : une partie de ses concentrations sur le domaine ALCOTRA provient de l'extérieur, via les conditions aux limites du modèle.

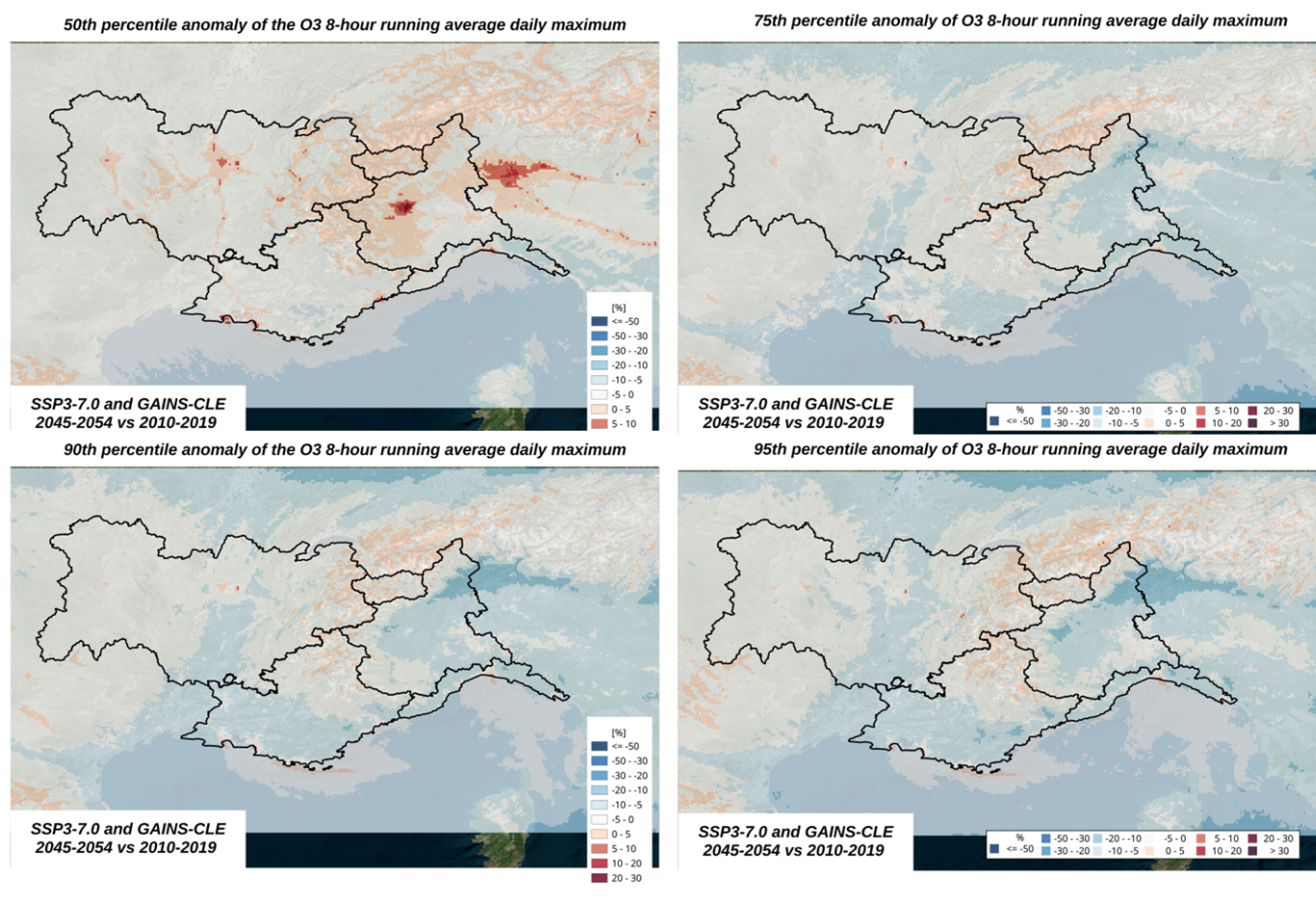


Figure 12 – Ozone (O₃), carte de l'anomalie du 50^e percentile (en haut à gauche), du 75^e percentile (en haut à droite), du 90^e percentile (en bas à gauche) et du 95^e percentile (en bas à droite) du maximum journalier de la moyenne glissante sur huit heures à l'horizon 2050 par rapport au scénario de référence 2010-2019. Les variations négatives (en nuances de bleu) indiquent des concentrations plus faibles en 2050 par rapport à la période de référence ; inversement pour les variations positives (en nuances de rouge).

Du point de vue réglementaire, la situation concernant l'ozone est celle qui suscite le plus d'inquiétude. L'analyse montre que les 90^e et 95^e percentiles du maximum journalier de la moyenne glissante sur 8 heures — indicateur utilisé par la réglementation pour la protection de la santé humaine — restent supérieurs à 100

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ dans l'ensemble des stations de fond considérées. Cela signifie que la valeur cible à long terme introduite par la Directive 2024/2881 est dépassée de manière généralisée sur l'ensemble du territoire, indépendamment de la localisation géographique. Cette situation ne peut pas être résolue uniquement par le contrôle des émissions locales, car, comme rappelé précédemment, l'ozone est fortement influencé par le transport à longue distance et par les concentrations de fond à l'échelle globale.

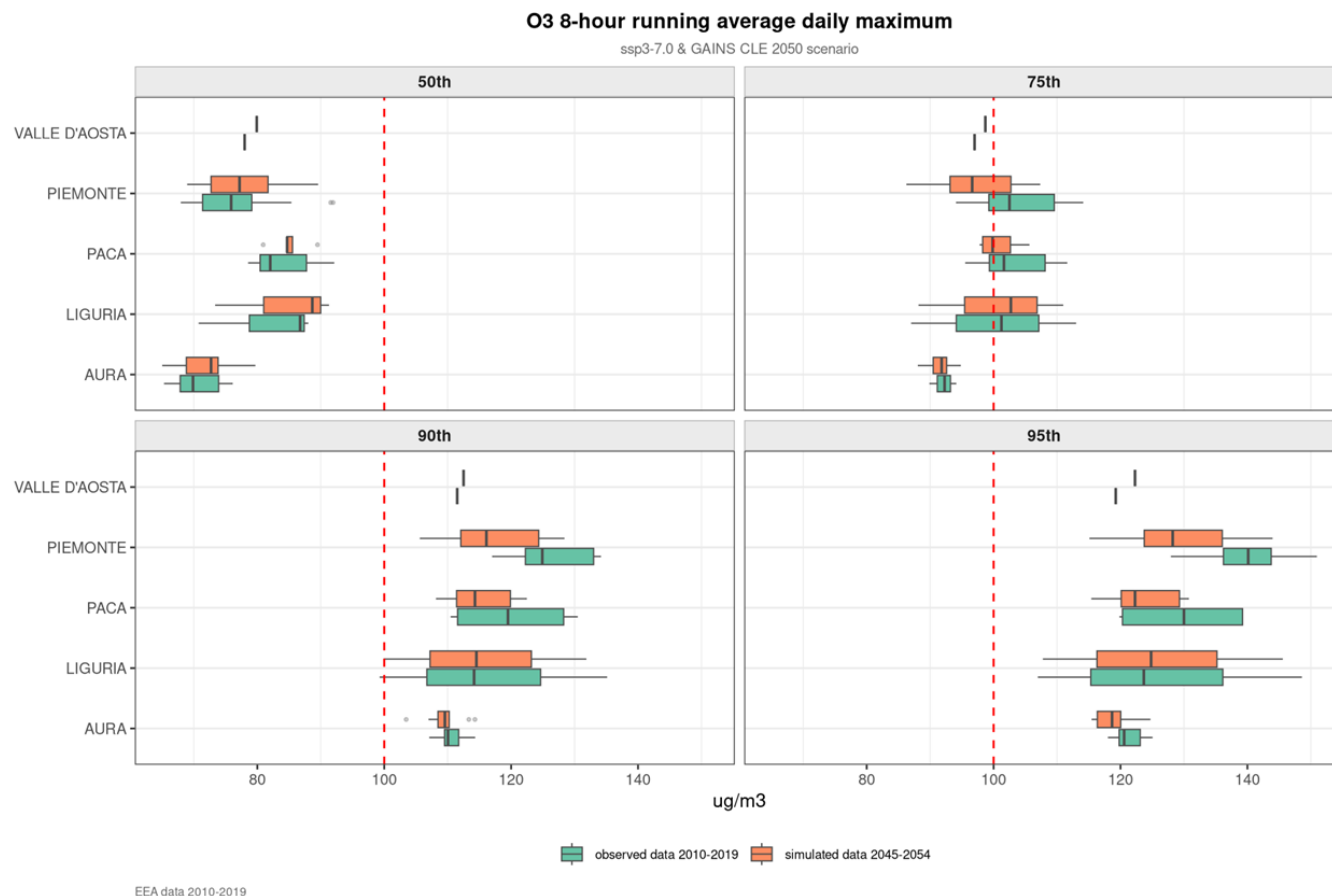


Figure 13 – Ozone (O₃), maximum journalier de la moyenne glissante sur huit heures : boxplots comparant¹³ les percentiles des données mesurées sur le territoire ALCOTRA au cours de la période de référence 2010-2019 (en vert) et les percentiles des séries de mesures projetées dans le scénario à l'horizon 2050 (en orange).

¹³ La boîte à moustaches (boxplot) est un graphique qui représente la distribution d'un ensemble de données au moyen de cinq statistiques résumées : minimum, premier quartile (Q1), médiane, troisième quartile (Q3) et maximum. La « boîte » centrale couvre l'intervalle interquartile (IQR = Q3 – Q1), avec une ligne intérieure indiquant la médiane. Les « moustaches » s'étendent jusqu'aux valeurs extrêmes non aberrantes, tandis que les points situés au-delà des moustaches (généralement au-delà de 1,5 × IQR) sont représentés comme des valeurs aberrantes (outliers).

Suivez-nous pour en savoir plus !

InterregCofinancé par
l'Union Européenne
Cofinanziato
dall'Unione Europea**France – Italia ALCOTRA**

Site web du projet

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.linkedin.com/showcase/alp-aera/>

<https://www.facebook.com/share/1BZEf7bHKR/?mibextid=wwXlfr>

www.youtube.com/@AlpAera

Pour plus d'informations, veuillez contacter :

ARPA Valle d'Aosta – Vallée d'Aoste

alpaera@arpa.vda.it

