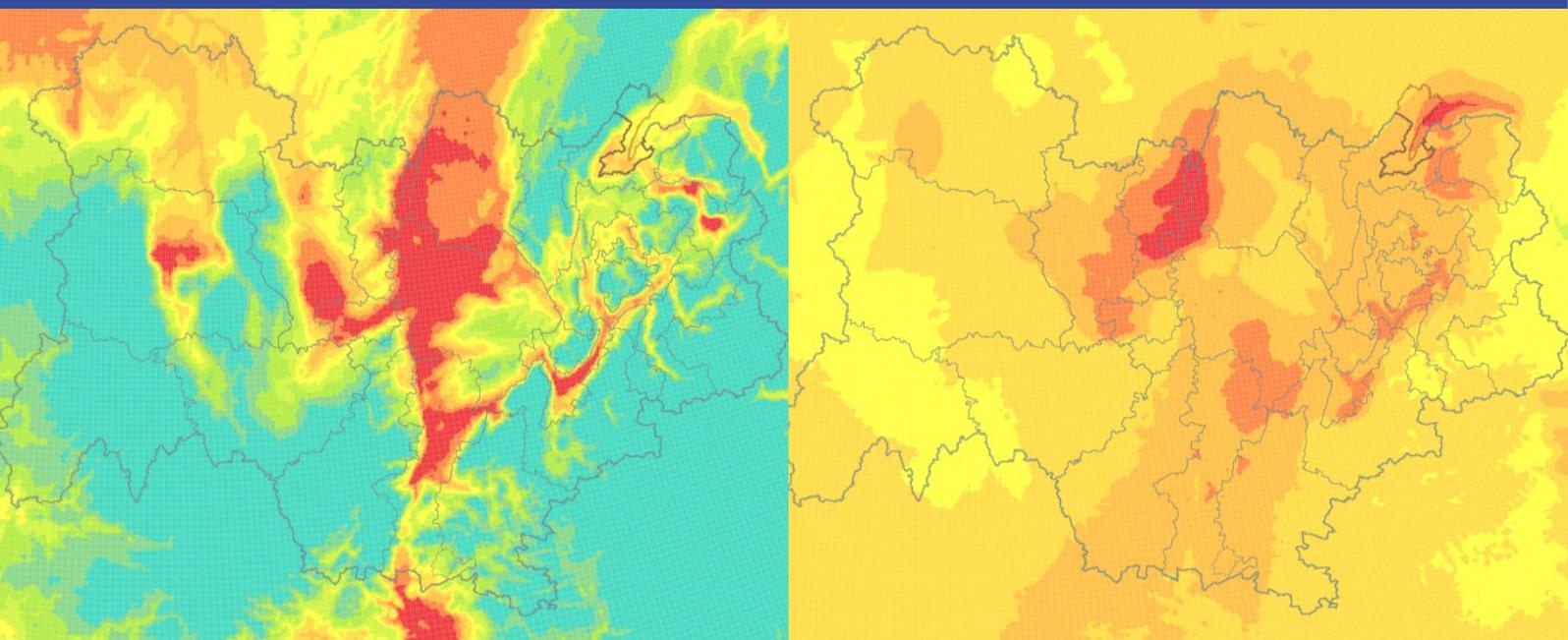


Evaluation des Performances de Prévision de la Qualité de l'Air en Auvergne-Rhône-Alpes

Bilan statistique global pour l'année 2024



Auteur : Unité Prévision

Diffusion : Juin 2025 www.atmo-auvergnerrhonealpes.fr

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



Conditions de diffusion

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes est une association de type « loi 1901 » agréée par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (décret 98-361 du 6 mai 1998) au même titre que l'ensemble des structures chargées de la surveillance de la qualité de l'air, formant le réseau national ATMO.

Ses missions s'exercent dans le cadre de la loi sur l'air du 30 décembre 1996. La structure agit dans l'esprit de la charte de l'environnement de 2004 adossée à la constitution de l'Etat français et de l'article L.220-1 du Code de l'environnement. Elle gère un observatoire environnemental relatif à l'air et à la pollution atmosphérique au sens de l'article L.220-2 du Code de l'Environnement.

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes communique publiquement sur les informations issues de ses différents travaux et garantit la transparence de l'information sur le résultat de ses travaux.

A ce titre, les rapports d'études sont librement disponibles sur le site www.atmo-auvergnerhonealpes.fr.

Les données contenues dans ce document restent la propriété intellectuelle d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes.

Toute utilisation partielle ou totale de ce document (extrait de texte, graphiques, tableaux, ...) doit faire référence à l'observatoire dans les termes suivants : « © Atmo Auvergne-Rhône-Alpes (2025), Evaluation des performances de prévision de la qualité de l'air en Auvergne-Rhône-Alpes. »

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

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

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

- par mail : contact@atmo-aura.fr
- par téléphone : 09 72 26 48 90

Synthèse

Ce rapport étudie la performance de la chaîne de prévision d'ATMO Auvergne-Rhône-Alpes à l'aide d'indicateurs statistiques comparant les résultats de modélisation aux observations enregistrées par le réseau de mesure permanent d'ATMO AURA. L'évaluation des performances du système de prévision est réalisée avec les résultats de la modélisation avant et après la phase d'expertise du prévisionniste. Le calcul des scores est effectué selon les recommandations du [référentiel technique national pour l'évaluation des performances des prévisions de la qualité de l'air](#).

Il en ressort que, **pour les PM₁₀ et l'Ozone, les performances de la modélisation d'Atmo AURA sont conformes aux préconisations nationales**. Pour la première fois cette année, la performance de la chaîne a **aussi été évaluée sur sa prévision de concentrations de particules PM_{2,5}**. Malgré l'absence de critères fixés de manière définitive pour ce polluant, il en ressort quand même que la prévision effectuée à Atmo AURA est bonne, malgré des situations plus complexes et des alertes plus fréquentes. Ces résultats sont valables aux échéances J0 et J+1, et si certains bassins d'air sont en difficulté sur certaines métriques, les objectifs fixés sont eux toujours atteints à l'échelle de la région.

On voit plus spécifiquement ressortir dans ces résultats **l'importance des techniques d'adaptation statistiques** développées pour améliorer les prévisions des modèles de chimie de l'atmosphère. Qu'il s'agisse des modèles de Prév'air, ajoutés pour comparaison, ou de ceux d'Atmo AURA, les performances sont systématiquement meilleures grâce aux adaptations statistiques. Ce rapport inclut aussi les performances du modèle d'Atmo AURA après correction par les prévisionnistes. L'étude de ces performances permet d'observer l'impact positif de ces corrections, notamment concernant le déclenchement des dispositifs de gestion des épisodes de pollution.

Cette année 2024 peut être considérée comme une année relativement épargnée en termes de qualité de l'air en Auvergne Rhône-Alpes, un seul dépassement lié aux niveaux d'ozone, et au total 130 dépassements cumulés pour les PM₁₀ (répartis sur 28 jours) ont été observés. Les niveaux de pollution étant globalement à la baisse, le processus de prévision de la qualité de l'air nécessite encore des améliorations, pour mieux prévoir ces concentrations plus faibles, et à terme s'aligner avec les contraintes décrites dans la nouvelle directive européenne sur la qualité de l'air.



Sommaire

1. Introduction.....	9
2. Présentation de la plateforme de prévision	10
2.1. Synoptique de la chaîne de prévision	10
2.2. Description des modèles.....	11
2.2.1. Modèles déterministes.....	11
2.2.2. Modèles statistiques.....	12
2.2.3. Expertise du prévisionniste.....	13
2.3. Taux de disponibilité des modèles	13
2.4. Description des mesures.....	13
3. Evaluation de la plateforme de prévision	16
3.1. Prévision ozone (O₃)	17
3.1.1. Scores classiques (biais, RMSE et corrélation).....	17
3.1.1.1. Par rapport aux objectifs de qualité	17
3.1.1.2. Par typologie.....	20
3.1.1.3. Par échéance de prévision	20
3.1.1.4. Par gamme de concentration	21
3.1.1.5. Sur plusieurs années	22
3.1.2. Performances sur les seuils réglementaires	23
3.1.2.1. Scores aux stations.....	24
3.1.2.1.1. Séries temporelles	24
3.1.2.1.2. Eléments de la table de contingence.....	25
3.1.2.2. Scores en lien avec les critères réglementaires de déclenchement d'épisode de pollution	27
3.2. Prévision particules fines (PM₁₀)	29
3.2.1. Scores classiques (Biais, RMSE, Corrélation)	29
3.2.1.1. Par rapport aux objectifs de qualité	29
3.2.1.2. Par typologie.....	32
3.2.1.3. Par échéance de prévision	32
3.2.1.4. Par gamme de concentration	33
3.2.1.5. Sur plusieurs années	35
3.2.2. Performances sur les seuils réglementaires	35
3.2.2.1. Scores aux stations.....	35
3.2.2.1.1. Séries temporelles	35
3.2.2.1.2. Eléments de la table de contingence.....	36
3.2.2.2. Scores en lien avec les critères réglementaires de déclenchement d'un épisode de pollution	38
3.3. Prévision particules fines (PM_{2,5}).....	40
3.3.1. Scores classiques (Biais, RMSE, Corrélation)	40
3.3.1.1. Par rapport aux objectifs de qualité	40
3.3.1.2. Par typologie.....	43
3.3.1.3. Par échéance de prévision	43
3.3.1.4. Par gamme de concentration	44
3.3.1.5. Sur plusieurs années	45
3.3.2. Performances sur les seuils réglementaires	46
3.3.2.1. Scores aux stations.....	46
3.3.2.1.1. Séries temporelles	46
3.3.2.1.2. Eléments de la table de contingence.....	47
3.3.2.2. Scores en lien avec les critères réglementaires de déclenchement d'un épisode de pollution	50
4. Conclusion	52



Table des figures

<i>Figure 1 : Synoptique général de la chaîne de prévision régionale d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes ..</i>	11
<i>Figure 2 : Cartographie des stations par typologie 2024 Auvergne Rhône-Alpes.....</i>	14
<i>Figure 3 : Ozone - Scores de RMSE, biais et corrélation par bassin d'air des prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), PREVAIR (orange), PREVAIR assimilé (marron) et de l'adaptation statistique (vert) d'avril à septembre 2024 sur l'échéance J0. La ligne en pointillé orange indique l'objectif de qualité.</i>	18
<i>Figure 4: Ozone - Scores de RMSE, biais et corrélation par bassin d'air des prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), PREVAIR (orange) et PREVAIR assimilé (marron) d'avril à septembre 2024 sur l'échéance J+1. La ligne en pointillé orange indique l'objectif de qualité.</i>	19
<i>Figure 5 : Ozone - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction de la typologie de station (urbaines, périurbaines, rurales) des prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), de PREVAIR (orange) et de PREVAIR assimilé (marron) d'avril à septembre 2024 sur l'échéance J0.</i>	20
<i>Figure 6 : Ozone - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction de la typologie de station (urbaines, périurbaines, rurales) des prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), de PREVAIR (orange) et de PREVAIR assimilé (marron) d'avril à septembre 2024 sur l'échéance J+1.....</i>	20
<i>Figure 7 : Ozone - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction du jour de prévision pour CARINE (bleu), CHIMÈRE (rouge), pour l'adaptation statistique (vert), pour PREVAIR (orange) et pour PREVAIR assimilé (marron) d'avril à septembre 2024</i>	21
<i>Figure 8 : Ozone - Scores de RMSE et biais par classe de concentrations des prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), de PREVAIR (orange) et PREVAIR assimilé (marron) d'avril à septembre 2024 sur l'échéance J0.</i>	21
<i>Figure 9 : Ozone - Scores de RMSE et biais par classe de concentration des prévisions CARINE (bleu), CHIMÈRE (rouge), de l'adaptation statistique Chimère (vert), le modèle PREVAIR et le modèle PREVAIR'AS d'avril à septembre 2024 sur l'échéance J+1.</i>	22
<i>Figure 10 : Ozone - Synthèse des scores de RMSE (barres colorées), biais moyen (points noirs) et corrélation (pointillés gris) entre avril et septembre depuis 2018 pour CHIMERE, pour son adaptation statistique pour le modèle CARINE (modèle expertisé), pour le modèle PREVAIR et pour le modèle PREVAIR assimilé.....</i>	23
<i>Figure 11 : Ozone - Superposition des dépassements enregistrés et prévus à J0 (en haut)) et à J+1 (en bas) sur la période avril – septembre. Modèle brut CHIMERE (en rouge), Chimère adapté statistiquement (ADAPSTAT - en vert) le modèle ajusté par le prévisionniste (CARINE – en bleu), Modèle PREVAIR brut (en Vert) et PREVAIR assimilé (en marron).....</i>	25
<i>Figure 12 : Ozone - Table de contingence sur la période d'avril à septembre 2024 à l'échéance J0 pour le seuil de 180 µg.m⁻³. Les bonnes détections sont en vert, les fausses détections en orange, et les détections manquées en rouge. Tables de contingence de CHIMERE (1^{er} groupe), ADAPSTAT (2^e groupe), de CARINE (3^e groupe), de PREVAIR (4^e groupe) et de PREVAIR assimilé (5^e groupe) pour la région Auvergne-Rhône-Alpes entière.....</i>	26
<i>Figure 13 : Ozone - Tables de contingence sur la période d'avril à septembre 2024 à l'échéance J+1 pour le seuil de 180µg.m⁻³. Les bonnes détections sont en vert, les fausses détections en orange, et les détections manquées en rouge. Table de contingence de CHIMERE (1er groupe), ADAPSTAT (2e</i>	

groupe), de CARINE (3e groupe), de PREVAIR (4e groupe) et de PREVAIR assimilé (5e groupe) pour la région Auvergne-Rhône-Alpes entière.....	26
<i>Figure 14 : Ozone - Diagramme de performance pour Chimère (rouge), ADAPSTAT (vert) CARINE (bleu), PREVAIR (orange), PREVAIR assimilé (marron) d'avril à septembre 2024 pour l'échéance J0 (à gauche) et celle de J+1 (à droite)</i>	27
<i>Figure 17 : PM₁₀ - Scores de RMSE, biais et corrélation par bassin d'air des prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), des prévisions PREV'AIR (orange) et de PREV'AIR assimilé (marron) pour l'échéance J0. La ligne en pointillé orange indique l'objectif de qualité.....</i>	30
<i>Figure 18 : PM₁₀ - Scores de RMSE, biais et corrélation par bassin d'air des prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), des prévisions PREV'AIR (orange) et de PREV'AIR assimilé (marron) pour l'échéance J0. La ligne en pointillé orange indique l'objectif de qualité.....</i>	31
<i>Figure 19 : PM₁₀ - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction de la typologie de station (urbaines, périurbaines, rurales) des prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), des prévisions PREVAIR (orange) et de PREV'AIR assimilé (marron) sur l'échéance J0</i>	32
<i>Figure 20 : PM₁₀ - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction de la typologie de station (urbaines, périurbaines, rurales) des prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), des prévisions PREV'AIR (orange) et de PREV'AIR assimilé (marron) sur l'échéance J+1</i>	32
<i>Figure 21 : PM₁₀ - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction du jour de prévision pour prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), des prévisions PREVAIR (orange) et de PREVAIR assimilé (marron) en 2024.</i>	33
<i>Figure 22 : PM₁₀ - Scores de RMSE et biais par classe de concentration des prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), des prévisions PREV'AIR (orange) et de PREV'AIR assimilé (marron) sur l'échéance J0.....</i>	34
<i>Figure 23 : PM₁₀ - Scores de RMSE et biais par classe de concentration des CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), des prévisions PREVAIR (orange) et de PREVAIR assimilé (marron) sur l'échéance J+1.</i>	34
<i>Figure 24 : PM₁₀ - Synthèse des scores de RMSE (barres colorées), biais moyen (points noirs) et corrélation (pointillés gris) depuis 2018 pour CHIMÈRE, pour son adaptation statistique, pour le modèle CARINE (modèle expertisé), pour le modèle PREV'AIR et le modèle PREV'AIR assimilé</i>	35
<i>Figure 25 : PM₁₀ - Superposition des dépassements enregistrés et prévus à J0 (en haut) et à J+1 (en bas) à différentes étapes de la chaîne de prévision : modèle brut (CHIMERE en rouge), modèle adapté statistiquement (ADAPSTAT - en vert) le modèle ajusté par le prévisionniste (CARINE – en bleu), le modèle PREV'AIR (en orange) et le modèle PREV'AIR assimilé (en marron)</i>	36
<i>Figure 26 : PM₁₀ - Tables de contingence pour l'année 2024 à l'échéance J0 pour le seuil de 50 µg.m⁻³. Tables de contingence de CHIMERE (1er groupe), ADAPSTAT (2e groupe), de CARINE (3e groupe), de PREVAIR (4e groupe) et de PREVAIR assimilé (5e groupe) pour la région Auvergne-Rhône-Alpes entière.....</i>	37
<i>Figure 27 : PM₁₀ - Tables de contingence calculée sur l'année 2024 à l'échéance J+1 pour le seuil de 50 µg.m⁻³. Tables de contingence de CHIMERE (1er groupe), ADAPSTAT (2e groupe), de CARINE (3e groupe), de PREVAIR (4e groupe) et de PREVAIR assimilé (5e groupe) pour la région Auvergne-Rhône-Alpes entière.....</i>	37
<i>Figure 28 : PM₁₀ - Diagramme de performance pour CHIMERE (rouge), ADAPSTAT (vert), CARINE (bleu), PREV'AIR (orange) et PREV'AIR assimilé (marron) en 2024 pour l'échéance J0 (à gauche) et celle de J+1 (à droite).....</i>	38

Figure 31 : PM₁₀ - Table de contingence des critères AMU (critères surfaciques et de population confondus) sur toute l'année 2024 à l'échéance J+0 (haut) et J+1 (bas) pour le modèle CARINE.....	39
Figure 32 : PM_{2.5} - Scores de RMSE, biais et corrélation par bassin d'air des prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), des prévisions PREV'AIR (orange) et de PREV'AIR assimilé (marron) pour l'échéance J0. La ligne en pointillé orange indique l'objectif de qualité.....	41
Figure 33 : PM_{2.5} - Scores de RMSE, biais et corrélation par bassin d'air des prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), des prévisions PREV'AIR (orange) et de PREV'AIR assimilé (marron) pour l'échéance J0. La ligne en pointillé orange indique l'objectif de qualité.....	42
Figure 34 : PM_{2.5} - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction de la typologie de station (urbaines, périurbaines, rurales) des prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), des prévisions PREV'AIR (orange) et de PREV'AIR assimilé (marron) sur l'échéance J0.....	43
Figure 35 : PM_{2.5} - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction de la typologie de station (urbaines, périurbaines, rurales) des prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), des prévisions PREV'AIR (orange) et de PREV'AIR assimilé (marron) sur l'échéance J+1	43
Figure 36 : PM_{2.5} - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction du jour de prévision pour prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), des prévisions PREV'AIR (orange) et de PREV'AIR assimilé (marron) en 2024.	44
Figure 37 : PM_{2.5} - Scores de RMSE et biais par classe de concentration des prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), des prévisions PREV'AIR (orange) et de PREV'AIR assimilé (marron) sur l'échéance J0.....	45
Figure 38 : PM_{2.5} - Scores de RMSE et biais par classe de concentration des CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), des prévisions PREV'AIR (orange) et de PREVAIR assimilé (marron) sur l'échéance J+1.	45
Figure 39 : PM_{2.5} - Synthèse des scores de RMSE (barres colorées), biais moyen (points noirs) et corrélation (pointillés gris) depuis 2018 pour CHIMÈRE, pour son adaptation statistique, pour le modèle CARINE (modèle expertisé), pour le modèle PREV'AIR et le modèle PREV'AIR assimilé	46
Figure 40 : PM_{2.5} - Superposition des dépassements enregistrés et prévus à J0 (en haut) et à J+1 (en bas) à différentes étapes de la chaîne de prévision : modèle brut (CHIMERE en rouge), modèle adapté statistiquement (ADAPSTAT - en vert) le modèle ajusté par le prévisionniste (CARINE – en bleu), le modèle PREV'AIR (en orange) et le modèle PREV'AIR assimilé (en marron)	47
Figure 41 : PM_{2.5} - Tables de contingence pour l'année 2024 à l'échéance J0 pour le seuil de 25 µg.m⁻³. En haut : Tables de contingence de CHIMERE (1er groupe), ADAPSTAT (2e groupe), de CARINE (3e groupe), de PREV'AIR (4e groupe) et de PREVAIR assimilé (5e groupe) pour la région Auvergne-Rhône-Alpes entière. En bas : Table de contingence de l'adaptation statistique déclinée par bassin d'air.....	48
Figure 42 : PM_{2.5} - Tables de contingence calculée sur l'année 2024 à l'échéance J+1 pour le seuil de 25 µg.m⁻³. En haut : Tables de contingence de CHIMERE (1er groupe), ADAPSTAT (2e groupe), de CARINE (3e groupe), de PREV'AIR (4e groupe) et de PREVAIR assimilé (5e groupe) pour la région Auvergne-Rhône-Alpes entière. En bas : Table de contingence de l'adaptation statistique déclinée par bassin d'air.	49
Figure 43 : PM_{2.5} - Diagramme de performance pour CHIMERE (rouge), ADAPSTAT (vert), CARINE (bleu), PREV'AIR (orange) et PREV'AIR assimilé (marron) en 2024 pour l'échéance J0 (à gauche) et celle de J+1 (à droite).....	50

Figure 46 : PM2.5 - Table de contingence des critères AMU (critères surfaciques et de population confondus) sur toute l'année 2024 aux échéances J+0 (haut) et J+1 (bas) pour le modèle CARINE. . 51

Liste des tableaux

Tableau 1 : Description des modèles déterministes mis à disposition des prévisionnistes par la plateforme de prévision d'ATMO Auvergne Rhône-Alpes	12
Tableau 2 : Description des modèles statistiques mis à disposition des prévisionnistes par la plateforme de prévision d'ATMO Auvergne Rhône-Alpes	12
Tableau 3 : Taux de disponibilité des prévisions en 2024.....	13
Tableau 4 : Répartition des stations par département et typologie	13
Tableau 5 : Détail du nombre de stations "de fond" par typologie pour les PM ₁₀ , l'O ₃ et les PM _{2,5}	15
Tableau 6 : Objectifs de qualité définis pour l'O ₃ s'appliquant aux performances des prévisions en région sur chaque bassin d'air aux échéances J0 et J+1.....	17
Tableau 7 : Table de contingence.....	24
Tableau 8 : Valeurs des seuils utilisées pour le calcul des critères statistiques	24
Tableau 9 : Objectif de qualité définis pour les particules fines PM ₁₀ s'appliquant aux performances des prévisions en région et sur chaque bassin d'air aux échéances J0 et J+1.	29
Tableau 9 : Objectif de qualité proposés pour les particules fines PM _{2,5} s'appliquant aux performances des prévisions en région et sur les bassins d'air aux échéances J0 et J+1.....	40

1. Introduction

Le système de prévision de qualité de l'air d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes a pour objectif la mise à disposition quotidienne de cartes de concentrations pour les polluants réglementés O₃, NO₂, SO₂ et PM₁₀ pour le jour même (J0), le lendemain (J+1) et le surlendemain (J+2). Outre ces polluants actuellement réglementés, la chaîne de prévision de qualité de l'air d'Atmo AURA intègre également les particules PM_{2,5}, qui entreront très prochainement dans le champ des polluants réglementés. L'ensemble est rendu disponible en ligne sur le site web d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes (<https://www.atmo-auvergnerhonealpes.fr/>).

Dans ce cadre est mis en place le dispositif de gestion des épisodes de pollution atmosphérique. Il s'agit d'un dispositif d'urgence ayant pour but de limiter l'exposition des populations à la pollution de l'air si le dépassement d'un seuil réglementaire de concentration est prévu. Il permet d'informer la population, de délivrer des recommandations sanitaires et comportementales et de mettre en place des actions de réduction des émissions sur les différentes sources concernées (trafic routier, mode de chauffage, pratiques industrielles et agricoles...). Initialement, ces dispositifs étaient conçus pour contribuer à respecter les valeurs réglementaires annuelles. Mais les attentes de l'Etat, des collectivités et du grand public vis-à-vis des missions concernant la qualité de l'air ont rapidement évolué ces dernières années. En effet, la demande sociale s'accroît et les citoyens attendent une information de plus en plus individualisée, prévisionnelle, en lien avec leur mode de vie, leurs activités. Ainsi, dans les dernières décennies, la prévision quotidienne de la qualité de l'air a dû évoluer et s'adapter à des enjeux divers ; environnementaux, économiques, politiques et sanitaires.

Il est par conséquent indispensable de disposer d'outils adaptés à une forte exigence d'expertise et à la diffusion d'une prévision quotidienne fiable et de bonne qualité. Cela nécessite une évaluation correcte et permanente des systèmes de prévision de qualité de l'air. Dans ce contexte, des nouveaux textes réglementaires sont apparus, notamment l'article 13 de l'arrêté du 19 avril 2017 abrogé par [l'article 13 de l'arrêté du 16 avril 2021](#) qui insiste sur la nécessité d'étudier la performance du système de prévision quotidienne et d'harmoniser les critères d'évaluation des prévisions de qualité de l'air à l'échelle nationale. Dans ce cadre et depuis de 2017, chaque Association Agréée de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) évalue son système de prévision en étudiant ses performances statistiques selon des critères préconisés par un référentiel technique national. Cette évaluation fait l'objet d'un rapport annuel adressé aux autorités au plus tard le 30 juin de l'année suivante.

Tous les ans, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes évalue ainsi sa plateforme de prévision en se référant à la méthode établie dans le cadre d'un groupe de travail national piloté par l'INERIS et portant sur la prévision de la qualité de l'air. Cette méthode est décrite explicitement dans le référentiel technique national élaboré en réponse à l'article 13 de l'arrêté du 16 avril 2021 relatif au dispositif national de surveillance de la qualité de l'air ambiant. Après avoir décrit la chaîne de prévision d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes (partie 2), ce rapport rend compte des résultats de cette évaluation sur l'année 2024 pour l'ozone (partie 3.1), les PM₁₀ (partie 3.2) et les PM_{2,5} (partie 3.3).

2. Présentation de la plateforme de prévision

2.1. Synoptique de la chaîne de prévision

La chaîne de prévision opérationnelle d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes vise à produire quotidiennement des cartes de champs de concentration sur la région. Ces données modélisées sont expertisées par un prévisionniste avant d'être diffusées au grand public sous la forme de cartes d'indice ATMO.

Pour produire les données modélisées, la chaîne de prévision se compose de plusieurs modèles imbriqués. La Figure 1 illustre le synoptique général de la chaîne de modélisation d'Atmo AURA, dont les étapes sont les suivantes :

1. Le calcul de l'évolution des champs météorologiques régionaux, qui repose sur le modèle numérique WRF (*Weather Research and Forecasting model*) développé par le NCAR (*National Center for Atmospheric Research*). Les principales données d'entrée de ce modèle sont les prévisions à l'échelle globale issues du modèle GFS (*Global Forecasting System*), la topographie et l'occupation du sol. Le calcul des grandeurs météorologiques (vent, température, humidité...) par le modèle WRF à l'échelle régionale prend en compte d'une manière implicite les effets induits par le relief.
2. La préparation du reste des données d'entrée nécessaires au modèle de chimie-transport utilisé par notre chaîne de modélisation (étape 3). Ces données sont : les émissions de polluants, les conditions aux limites du modèle et ses conditions initiales. Les émissions, c'est-à-dire la répartition maillée des flux de polluants de tous les secteurs d'activité, sont calculées avec un module développé en interne.
3. La dispersion et les transformations chimiques des polluants sont calculées avec le modèle CHIMERE. Il s'agit d'un modèle eulérien 3D de dispersion atmosphérique à méso-échelle, développé par l'IPSL (Institut Pierre-Simon Laplace) en collaboration avec l'INERIS. CHIMERE calcule de manière **déterministe** les concentrations des espèces gazeuses et particulaires. Il permet de prévoir la pollution atmosphérique en prenant en compte l'évolution de nombreux processus physico-chimiques dans l'atmosphère.
4. Le raffinement de la résolution spatiale via un module de descente d'échelle de 3km à 1km, fondé sur une simple interpolation bilinéaire.
5. Un calcul **statistique** de prévision des concentrations aux stations de mesures permanentes de la qualité de l'air. Cette étape consiste à prévoir les concentrations en chaque site de mesure par une méthode statistique (forêts aléatoires). Ces prévisions aux stations sont utilisées dans l'étape suivante pour corriger les cartes « brutes » (cartes non corrigées issues directement du modèle déterministe CHIMERE).
6. Le couplage des concentrations calculées aux stations et de la carte de prévision brute par une **correction géostatistique** (krigeage).

Pour exécuter l'ensemble de ces processus, plusieurs scripts codés en Shell et en R permettent de manipuler et convertir les données d'entrées et post-traitées.

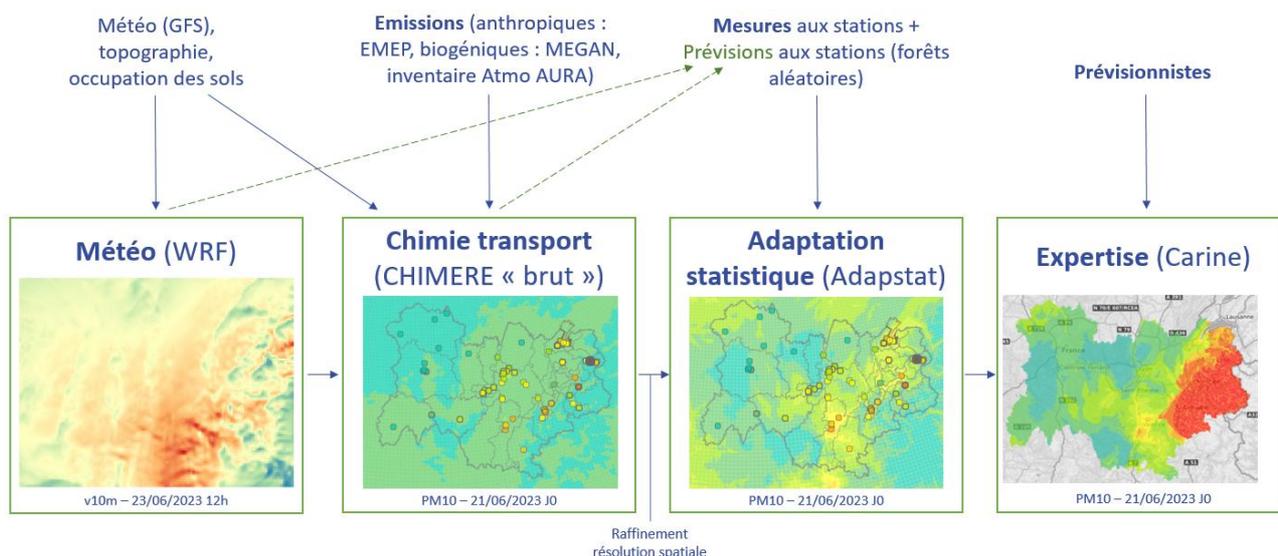


Figure 1 : Synoptique général de la chaîne de prévision régionale d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes

La fiabilité de la chaîne de prévision est fortement liée à la qualité des paramètres d'entrée, notamment les caractéristiques du terme source (émissions) qui sont encore difficilement quantifiables par des mesures directes. En effet, les débits d'émissions de polluants sont en général calculés par des méthodes génériques en utilisant des facteurs d'émissions qui ont une certaine incertitude ou des cadastres d'émissions qui restent perfectibles. De plus, le système n'intègre pas d'une manière explicite la topographie dans le calcul des écoulements, les reliefs sont pris en compte uniquement pour établir les profils de vitesse de vent. Il en résulte certaines difficultés à reproduire les écoulements et les processus thermiques dans les vallées, dont la topographie est particulièrement marquée sur l'est de la région, avec les Alpes. Malgré cela, les performances de prévision restent bonnes, comme nous le verrons dans les sections suivantes.

2.2. Description des modèles

Il existe deux catégories de modèles utilisés par Atmo AURA dans sa plateforme de prévision :

- Les modèles déterministes : ils résolvent les équations physiques et chimiques qui régissent la qualité de l'air, sur la base de données météorologiques et d'émissions de polluants.
- Les modèles statistiques : ils établissent des liens statistiques plus ou moins complexes entre plusieurs variables explicatives (température, concentrations passées, vent...) pour anticiper le comportement de variables expliquées (concentrations futures). Il est fréquent que les sorties de modèles déterministes soient les entrées de modèles statistiques.

2.2.1. Modèles déterministes

Si CHIMERE est l'unique modèle de qualité de l'air déterministe dont Atmo AURA gère intégralement la mise en œuvre, des sorties semblables sont récupérées auprès de la plateforme Prév'air et alimentent également les outils mis à disposition du prévisionniste pour que celui-ci puisse affiner son expertise. Les caractéristiques de ces modèles sont décrites dans le tableau suivant.

Tableau 1 : Description des modèles déterministes mis à disposition des prévisionnistes par la plateforme de prévision d'ATMO Auvergne Rhône-Alpes

Nom	Météorologie	Version	Résolution horizontale	Domaine de prévision	Conditions aux limites	Polluants	Echéances disponibles
PREV'AIR	IFS	Chimere v2020	4 km	France	?	O ₃ , PM ₁₀ , PM _{2.5} , NO ₂	J-1 à J+3
CHIMERE Prevalp	WRF	Chimere v2014b	27/9/3 km	Europe/France /Région AURA	EMEP	O ₃ , PM ₁₀ , PM _{2.5} , NO ₂ , SO ₂	J-1 à J+2
CHIMERE Icare	WRF	Chimere v2020r3	3 km	Région AURA	PREV'air	O ₃ , PM ₁₀ , PM _{2.5} , NO ₂ , SO ₂	J-1 à J+2

À la suite de la mise à jour de notre chaîne de prévision, deux versions de CHIMERE cohabitent donc actuellement dans la plateforme interne d'Atmo AURA. Cette mise à jour a notamment permis l'intégration des données PREV'air comme conditions initiales et aux limites de CHIMERE. Toutefois, la mise en production ayant eu lieu en cours d'année 2024, les données manquent pour intégrer les nouvelles sorties « ICARE » au présent rapport. Ces sorties font l'objet d'une étude séparée et intégreront le rapport 2026 sur les performances 2025.

2.2.2. Modèles statistiques

Les prévisions déterministes issues du modèle CHIMERE sont affinées via des méthodes statistiques regroupées au sein du module nommé « ADAPSTAT ». Dans un premier temps, une prévision de valeurs de concentration aux stations est effectuée par la méthode des forêts aléatoires. L'apprentissage a été fait sur une période de trois ans. Les prédicteurs utilisés par les forêts aléatoires comportent notamment les mesures passées, les concentrations prévues par CHIMERE et certaines grandeurs météorologiques prévues par WRF. Dans un second temps, ces prévisions aux stations sont couplées à la carte brute issue du modèle déterministe CHIMERE via une méthode géostatistique : le krigeage. Le module ADAPSTAT et l'adaptation statistique menée par PREV'air (nommée PREV'AIR_AS dans ce rapport) utilisent un krigeage en dérive externe. A la différence d'ADAPSTAT, PREV'AIR_AS effectue sa prévision aux stations par régression multilinéaire.

Tableau 2 : Description des modèles statistiques mis à disposition des prévisionnistes par la plateforme de prévision d'ATMO Auvergne Rhône-Alpes

Nom du modèle	Méthodologie	Résolution horizontale	Domaine de prévision	Polluants prévus	Echéances disponibles
PREV'AIR_AS	Prévision aux stations par régression multilinéaire, puis krigeage en dérive externe.	1 km	France	O ₃ , PM ₁₀ , PM _{2.5} , NO ₂	J-1 à J+3
ADAPSTAT	Prévision aux stations par forêts aléatoires puis krigeage en dérive externe.	1 km	Région AURA	O ₃ , PM ₁₀ , PM _{2.5} , NO ₂ , SO ₂	J-1 à J+2

2.2.3. Expertise du prévisionniste

Chaque jour, l'ensemble de ces modèles déterministes et statistiques est mis à disposition d'un prévisionniste. Il s'agit d'une personne à même d'analyser les cartes et parfois de les corriger avant diffusion, selon le résultat de son expertise. L'outil utilisé pour corriger les cartes est nommé CARINE, c'est pourquoi on fera référence aux scores après expertise sous ce nom.

2.3. Taux de disponibilité des modèles

Le taux de disponibilité sur une année est un indicateur parmi d'autres du bon fonctionnement d'une chaîne de prévision, exprimant le nombre de jours où le modèle est disponible au cours de l'année considérée. Le Tableau 3 représente le taux de disponibilité de tous les modèles présents sur la plateforme de prévision d'ATMO Auvergne Rhône-Alpes en 2024. Les jours d'indisponibilité de PREV'AIR sont liés à des difficultés de récupération des données. Le taux de disponibilité d'ADAPSTAT atteint quant à lui 99,5%, témoignant d'un fonctionnement robuste de la chaîne de prévision. Notons que le prévisionniste a la possibilité, si un modèle n'est pas disponible où s'il le juge pertinent, de choisir d'utiliser un modèle plutôt qu'un autre.

Tableau 3 : Taux de disponibilité des prévisions en 2024

Nom usuel	Nombre de jours indisponibles	Taux de disponibilité
PREV'AIR	5	98,6%
CHIMERE	1	99,7%
PREVAIR_AS	3	99,2%
ADAPSTAT	2	99,5%

2.4. Description des mesures

Les mesures utilisées pour évaluer les résultats de la chaîne de modélisation sont issues du réseau de stations fixes géré par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, représentant près de 80 stations. Ces stations ont été classées par typologie (urbaine, rurale, périurbaine, industrielle, trafic). Les stations de typologie industrielle et trafic ont été écartées de cette analyse statistique car elles sont largement influencées par les émissions locales et de proximité, alors que le modèle est dit de « fond ». La répartition et le nombre de stations par typologie et par bassin d'air sont présentés en détail dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4 : Répartition des stations par département et typologie

	Nombre de mesures	Urbaines	Périurbaines	Rurales
Région	53	32	13	8
Allier	4	3	0	1
Zone urbaine des Pays de Savoie	5	5	0	0
Bassin grenoblois	7	4	3	0
Bassin lémanique	2	2	0	0

Bassin lyonnais Nord-Isère	10	6	3	1
Bassin stéphanois	3	2	1	0
Cantal	2	1	0	1
Contreforts du Massif Central	1	1	0	0
Est Drôme	1	0	0	1
Haute Loire	2	1	0	1
Ouest Ain	2	1	1	0
Puy de Dôme	5	2	2	1
Vallée de l'Arve	3	1	2	0
Vallées de Maurienne et Tarentaise	1	1	0	0
Vallée du Rhône	3	2	1	0
Zone alpine Haute-Savoie	1	0	0	1
Zone alpine Savoie	0	0	0	0
Zone des Côtes	1	0	0	1

La répartition spatiale des stations et le type de mesure associé sont accessibles sur la figure suivante.

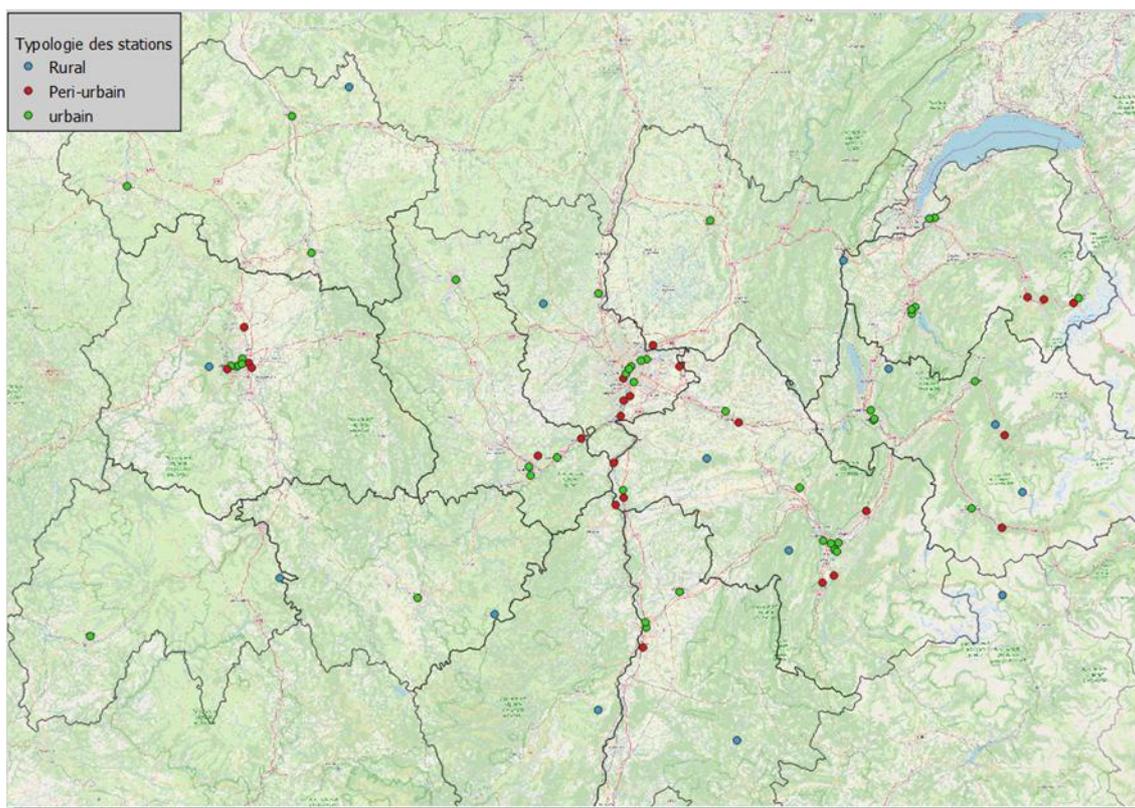


Figure 2 : Cartographie des stations par typologie 2024 Auvergne Rhône-Alpes

Seules les stations de typologie urbaine, périurbaine et rurale sont utilisées pour calculer les paramètres statistiques. De plus, pour évaluer les résultats de modélisation, on utilise seulement les stations pour lesquelles le taux de disponibilité quotidien et annuel de chaque couple modèle-

mesure est supérieur à 75% (cela est détaillé dans l'annexe 2). Pour l'année 2024, les mesures utilisées dans cette évaluation sont réparties comme suit :

	Urbaines	Périurbaines	Rurales
PM ₁₀	32	10	6
O ₃	32	12	8
PM _{2.5}	22	4	5

Tableau 5 : Détail du nombre de stations "de fond" par typologie pour les PM₁₀, l'O₃ et les PM_{2.5}

La performance du système de prévision est évaluée en comparant les concentrations prédites C_p de particules PM₁₀, PM_{2.5}, et d'ozone (O₃) aux concentrations mesurées (observées) C_m . La performance du système n'est pas évaluée pour le dioxyde de soufre (SO₂) et le dioxyde d'azote (NO₂), bien que faisant partie des polluants pris en compte pour les épisodes de pollution. En effet, ces deux polluants ne font pas l'objet d'exigence dans le référentiel technique national pour la prévision de la qualité de l'air. **Il convient de rappeler que les résultats de modélisation corrigés statistiquement (modèle « ADAPSTAT ») peuvent être ajustés manuellement par les prévisionnistes (modèle « CARINE »).** Ces ajustements sont réalisés sur la base de l'expertise du prévisionniste, en s'appuyant notamment sur la comparaison modèle/mesure des jours précédents, à la fois sur les modèles de prévision de météorologie et de qualité de l'air. La convergence ou la divergence de différents modèles sont également des paramètres pris en compte. Les ajustements peuvent dans certains cas entraîner des dépassements de seuils tels que définis dans les dispositifs de gestion des épisodes de pollution. Cette méthode permet d'assurer une cohérence entre les cartes de qualité de l'air diffusées au public et les dispositifs d'information ou d'alerte. Les déterminants pour chaque prévisionniste lors de la mise en œuvre d'un ajustement sont tracés dans un « rapport de prévision » rédigé quotidiennement par un prévisionniste. Un travail interne a permis l'harmonisation des pratiques de correction en fixant les critères et les règles d'ajustement des cartes.

3. Evaluation de la plateforme de prévision

Dans ce rapport, les scores statistiques calculés sont présentés pour les deux approches, avec et sans expertise humaine, sachant que l'ajustement des cartes n'est pas systématique. Ces scores sont calculés en utilisant le package Python « Evaltools¹ » codéveloppé par l'INERIS et Météo France. Pour évaluer la qualité globale de la simulation, différents indicateurs statistiques sont moyennés sur l'ensemble des capteurs de la région ou par zone géographique, selon les bassins d'air utilisés pour la gestion des épisodes de pollution (Annexe 1).

Afin de quantifier les résultats des prévisions, il est nécessaire d'utiliser des indicateurs statistiques permettant d'étudier les écarts entre le modèle et les mesures. La bibliographie relate de nombreux travaux ayant abordé cette question récurrente de la quantification de la performance des prévisions et ces travaux ont conduit à retenir certains paramètres statistiques parmi une multitude de paramètres existants : le biais, l'erreur relative, l'erreur quadratique moyenne, la fraction dans un facteur de 2, le coefficient de performance, le coefficient de corrélation...

Sur la base de ces travaux bibliographiques, et conformément à « l'état de l'art », trois indicateurs statistiques complémentaires ont été retenus pour évaluer la performance des prévisions :

- **Le biais moyen (Biais)** : permet d'estimer l'erreur globale du modèle en quantifiant l'écart entre les moyennes des valeurs observées et modélisées. La valeur optimale de ce critère est 0.
- **La racine carrée de l'erreur quadratique des estimations (RMSE)** : peut être assimilée à une erreur locale. La valeur optimale pour ce paramètre est également 0.
- **Le coefficient de corrélation (R)** : paramètre statistique qui permet d'évaluer la corrélation entre les variations de deux variables. La valeur du coefficient de corrélation varie entre -1 et 1. La valeur optimale correspondant à des variables parfaitement corrélées est de 1.

Les statistiques sont estimées à partir de la moyenne journalière pour les particules PM₁₀ et PM_{2,5} et de la valeur maximale horaire du jour pour l'ozone (O₃). Le calcul a été effectué à la fois pour les sorties brutes du modèle déterministe (CHIMERE), les sorties brutes adaptées statistiquement (ADAPSTAT) et les sorties expertisées, c'est-à-dire ajustées manuellement par le prévisionniste (CARINE). Les sections suivantes présentent les résultats pour l'ozone (section 3.1) puis les PM₁₀ (section 3.2), et enfin les PM_{2,5} (section 3.3).

¹ <https://opensource.umr-cnrm.fr/projects/evaltools>

3.1. Prévision ozone (O₃)

L’ozone est un polluant secondaire dont les concentrations sont étroitement liées à l’intensité du rayonnement solaire. Plus le rayonnement est élevé, plus valeurs observées ont de chance d’être élevées. Les concentrations en ozone montrent ainsi de grandes variations au cours de l’année, avec des valeurs plus fortes au printemps et en été que le reste de l’année. **La prévision d’ozone est ainsi critique d’avril à septembre, et c’est donc sur cette période que les scores ont été calculés.**

3.1.1. Scores classiques (biais, RMSE et corrélation)

3.1.1.1. Par rapport aux objectifs de qualité

Puisque les modèles de dispersion atmosphérique ne peuvent pas prédire parfaitement la réalité (ou les concentrations mesurées par les capteurs), le groupe de travail national a proposé des fourchettes de valeurs associées au biais, à la RMSE et à la corrélation pour évaluer les modèles : les résultats sont considérés comme acceptables lorsque ces critères sont vérifiés. Le *Tableau 6* illustre les objectifs de qualité définis pour l’ozone. Ces valeurs doivent s’appliquer aux performances des prévisions en région sur chaque bassin d’air aux échéances J0 et J+1.

Biais (µg.m ⁻³)	RMSE (µg.m ⁻³)	Corrélation
-10 < b < 10	RMSE < 25	c > 0,7

Tableau 6 : Objectifs de qualité définis pour l’O₃ s’appliquant aux performances des prévisions en région sur chaque bassin d’air aux échéances J0 et J+1.

Dans cette section, on s’intéresse à la performance de la chaîne de prévision par bassin d’air (au sens des dispositifs de gestion des épisodes de pollution). La *Figure 3* présente les performances statistiques (RMSE, biais et corrélation) calculées pour l’échéance J0. La *Figure 4* présente les mêmes performances statistiques calculées pour l’échéance J+1. **On voit que les objectifs qualité en termes de biais et de RMSE sont bien respectés à l’échelle de la région sur quasiment tous les bassins d’air, pour les modèles ADAPSTAT et CARINE (ADAPSTAT expertisé).** Seul le bassin d’air du « Puy de Dôme » est en dehors de ces objectifs, avec un biais de 11.75 µg.m⁻³ pour le modèle ADAPSTAT, corrigé à 11.18 µg.m⁻³ grâce à l’expertise. **Du côté de la corrélation, seule l’adaptation statistique de Prév’air respecte l’objectif de 0.7 à l’échelle de la région à J0, et aucun des modèles ne valide cet objectif à J+1, ce qui n’était pas le cas l’année dernière.**

On voit sur ces figures que la saison d’ozone 2024 a été plus difficile à prédire que celle de 2023, où tous les objectifs étaient largement satisfaits, et ce pour les modèles d’Atmo AURA ainsi que pour ceux de Prév’air. **L’intervention des prévisionnistes d’Atmo AURA a systématiquement amélioré les scores de la prédiction à l’échelle de la région, améliorations légères mais toujours positives.** On voit aussi l’utilité de l’adaptation statistique par rapport aux modèles bruts : le modèle CHIMERE (autant la version AURA que Prév’air) comporte un biais important, et des scores de RMSE généralement pires que les modèles adaptés. Ce biais est présent pour quasiment tous les modèles, et généralement positif (seul le modèle PREV’AIR brut a un biais négatif).

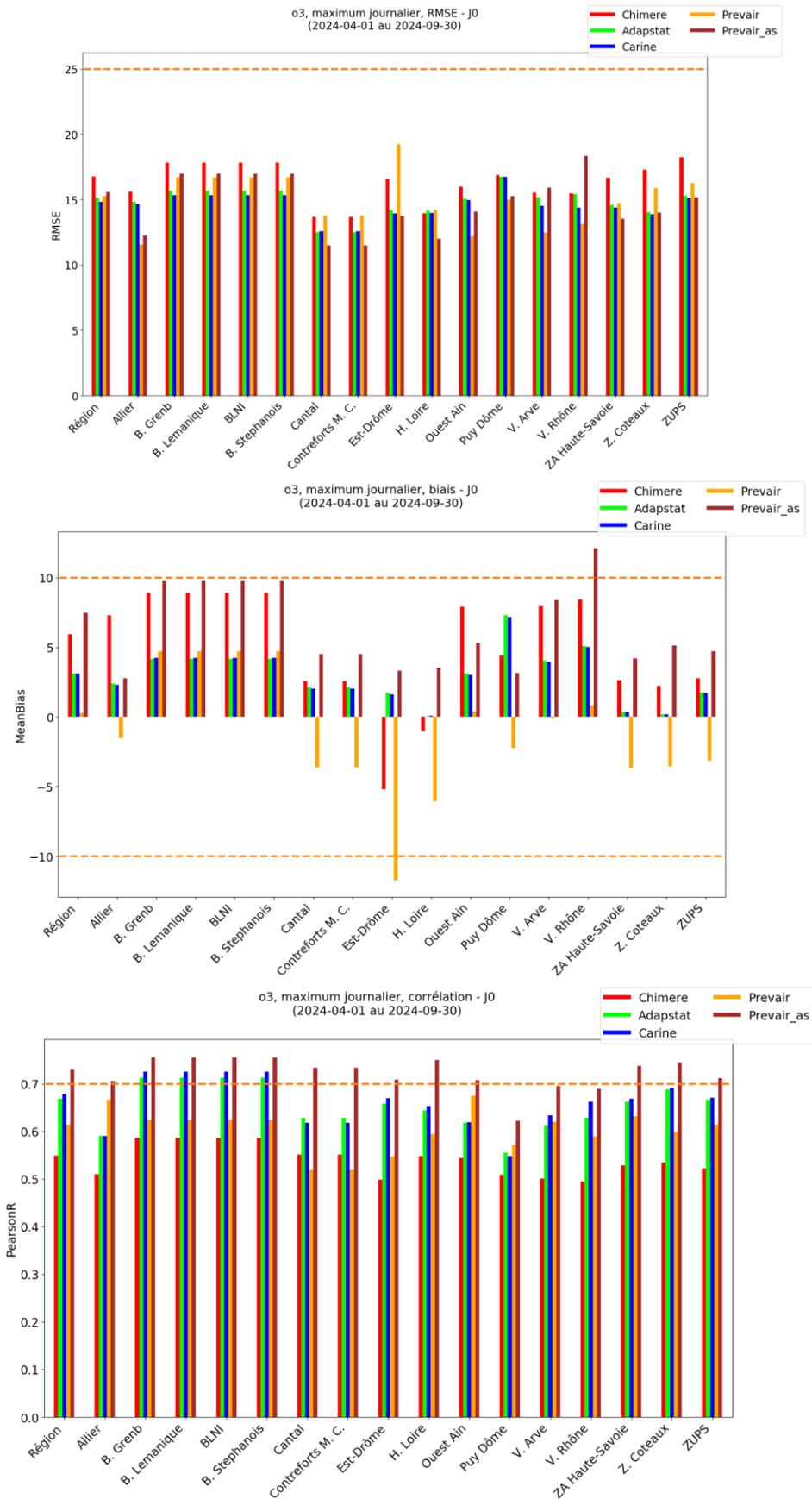


Figure 3 : Ozone - Scores de RMSE, biais et corrélation par bassin d'air des prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), PREVAIR (orange), PREVAIR assimilé (marron) et de l'adaptation statistique (vert) d'avril à septembre 2024 sur l'échéance J0. La ligne en pointillé orange indique l'objectif de qualité.

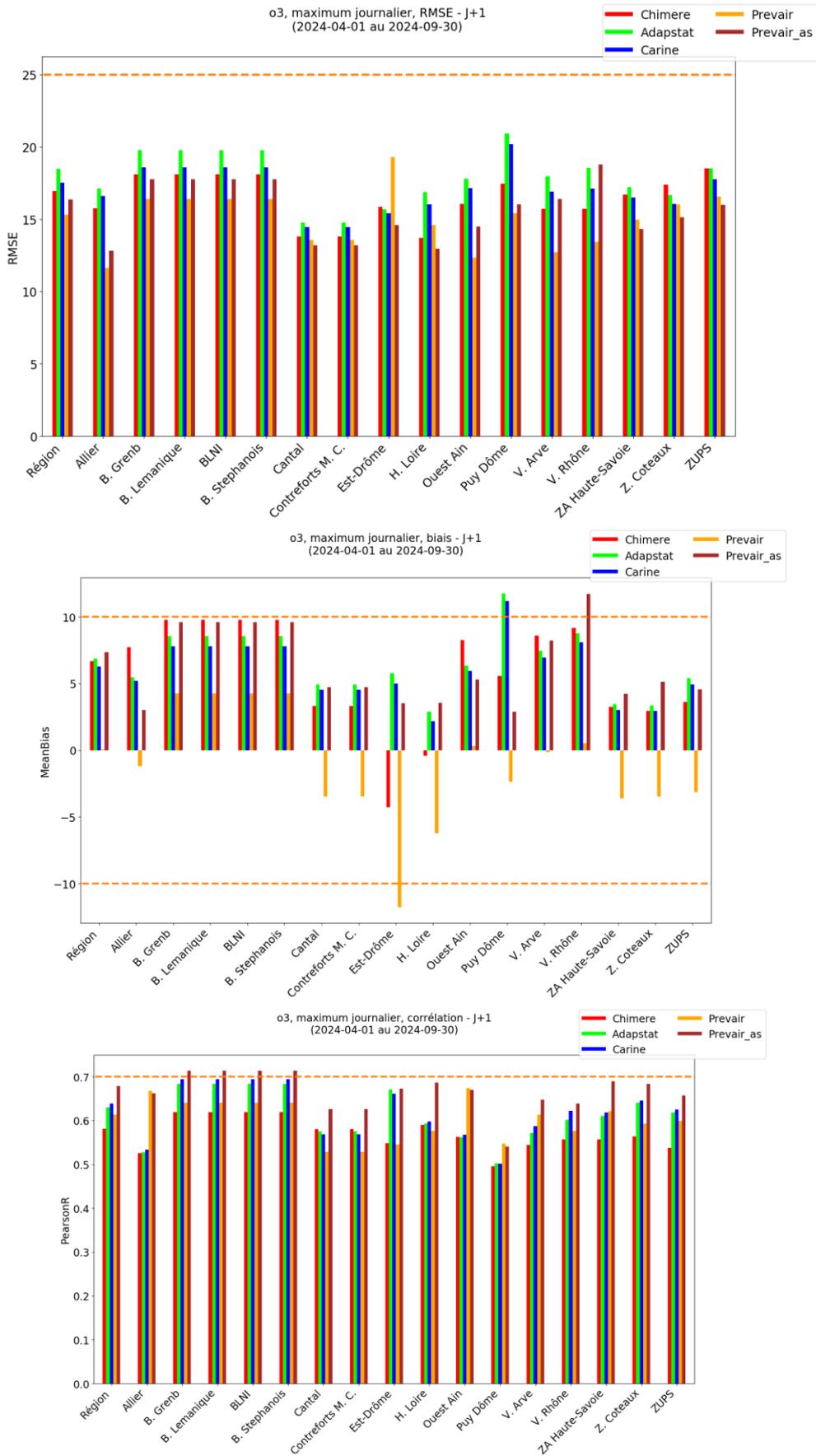


Figure 4: Ozone - Scores de RMSE, biais et corrélation par bassin d'air des prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), PREVAIR (orange) et PREVAIR assimilé (marron) d'avril à septembre 2024 sur l'échéance J+1. La ligne en pointillé orange indique l'objectif de qualité.

3.1.1.2. Par typologie

Les *Figure 5* et *Figure 6* illustrent les performances de la chaîne de prévision en fonction de la typologie des stations de mesures. Cette distinction par typologie fait apparaître une différence sur le biais de l'ensemble des modèles, qui a tendance à être positif sur les stations urbaines et périurbaines, et nul ou négatif pour les stations rurales, et ce pour les échéances J0 et J+1. Les métriques sont par ailleurs assez semblables pour toutes les typologies. On voit que la faiblesse des modèles ADAPSTAT et CARINE sur la RMSE à J+1 est largement expliquée par leur performance inférieure sur les stations périurbaines. La corrélation se comporte elle de manière très similaire pour toutes les typologies : le modèle PREVAIR_AS a des scores légèrement meilleurs que le reste des modèles évalués, et ce peu importe l'échéance ou le type de station.

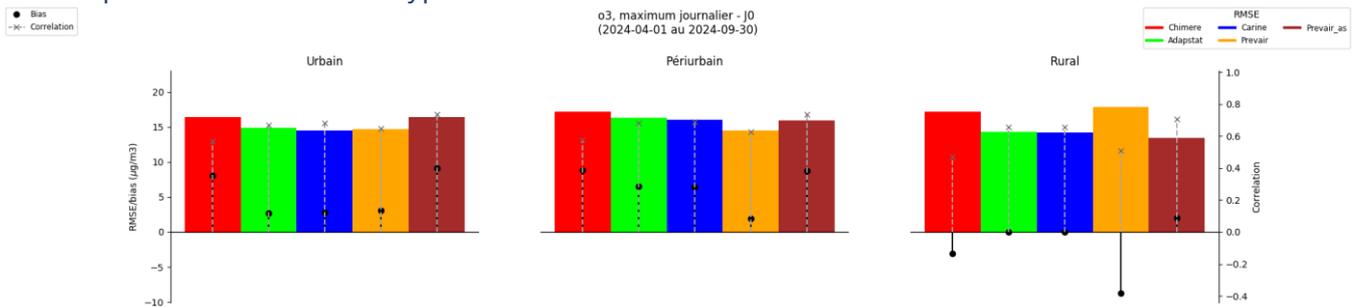


Figure 5 : Ozone - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction de la typologie de station (urbaines, périurbaines, rurales) des prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), de PREVAIR (orange) et de PREVAIR assimilé (marron) d'avril à septembre 2024 sur l'échéance J0.

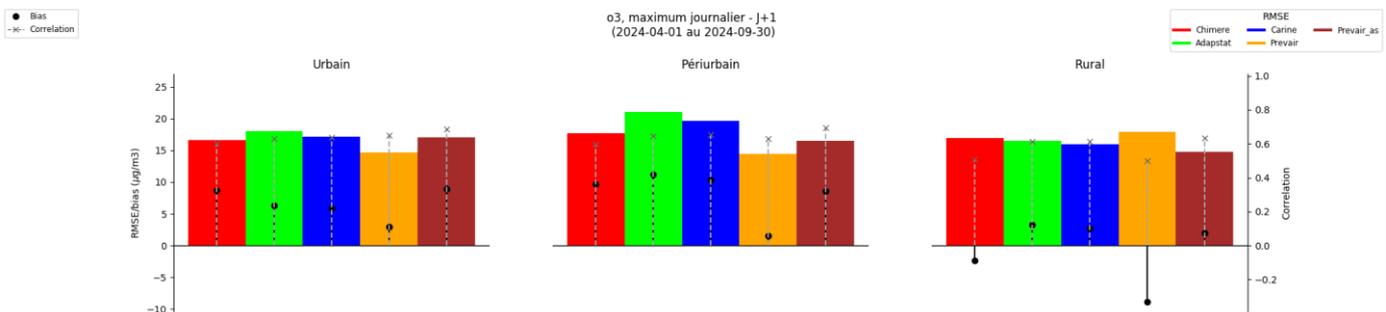


Figure 6 : Ozone - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction de la typologie de station (urbaines, périurbaines, rurales) des prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), de PREVAIR (orange) et de PREVAIR assimilé (marron) d'avril à septembre 2024 sur l'échéance J+1.

3.1.1.3. Par échéance de prévision

La *Figure 7* présente les performances statistiques calculées pour les différentes échéances de prévision (J0, J+1 et J+2) pour la période avril à septembre 2024, pour les résultats ajustés par les prévisionnistes (CARINE, en bleu), résultats adaptés statistiquement (ADAPSTAT, en vert) les résultats CHIMERE brut (en rouge), les résultats bruts PREVAIR (orange) et les résultats bruts PREVAIR assimilés (marron). On y remarque que l'ensemble des modèles voit ses performances dégradées lors du passage à des échéances plus lointaines. Cette dégradation est cependant plus marquée pour les modèles ADAPSTAT et CARINE, qui sont initialement meilleurs que tous les autres modèles pour les prévisions à J0, et qui passent derrière les autres modèles aux échéances futures (en RMSE). Ces adaptations statistiques sont particulièrement entraînées de manière à prévoir au mieux les concentrations du jour, mais cet entraînement se révèle moins performants sur les échéances suivantes. De la même manière qu'en 2023, et ce pour tous les modèles, les biais ont tendance à

augmenter au fil des échéances : les prévisions J0 sont légèrement surestimées, les J+1 et J+2 le sont un peu plus (d'environ $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).

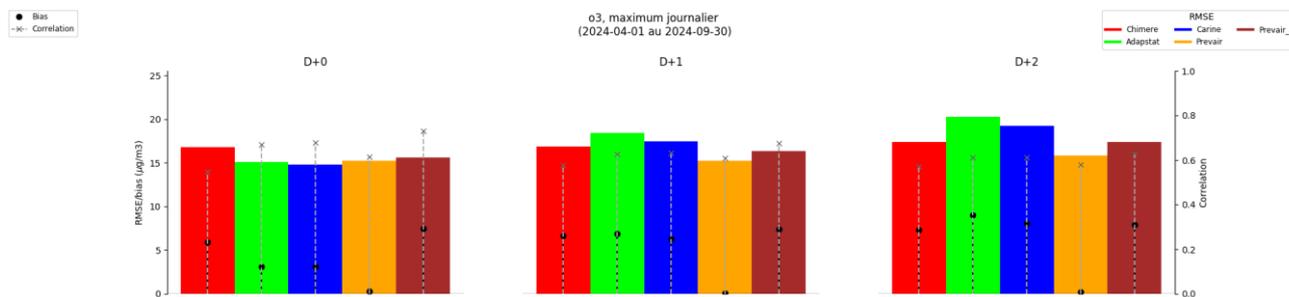


Figure 7 : Ozone - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction du jour de prévision pour CARINE (bleu), CHIMÈRE (rouge), pour l'adaptation statistique (vert), pour PREVAIR (orange) et pour PREVAIR assimilé (marron) d'avril à septembre 2024

3.1.1.4. Par gamme de concentration

La prévision se doit d'être aussi bonne que possible tout le temps, mais il est particulièrement important qu'elle le soit quand les concentrations de polluants sont élevées. Lors des épisodes de pollution, une prévision fiable est nécessaire afin que les vigilances ne soient pas déclenchées à tort. Pour évaluer les performances lors de ces moments critiques, on groupe ici les données journalières selon leur classe de concentration (par rapport aux observations). Pour chaque groupe, on calcule les scores moyens. Les Figure 8 et Figure 9 illustrent l'évolution des scores (RMSE et biais moyen) en fonction des classes de concentrations d'O₃ à J0 et J+1 respectivement.

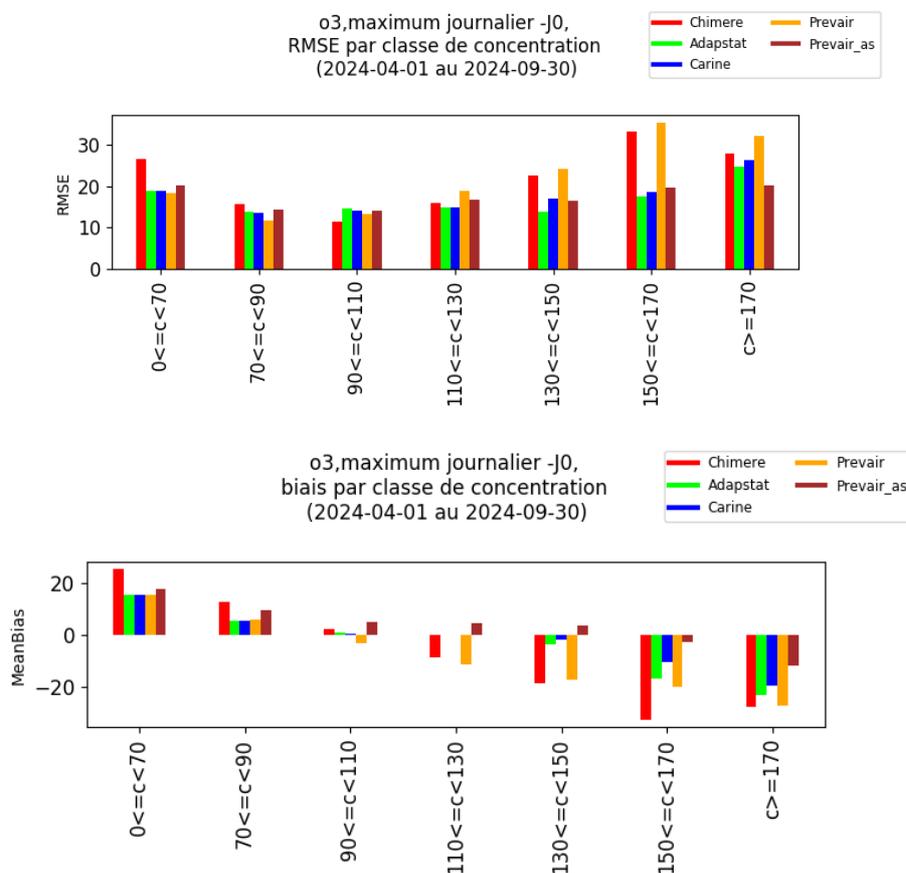


Figure 8 : Ozone - Scores de RMSE et biais par classe de concentrations des prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), de PREVAIR (orange) et PREVAIR assimilé (marron) d'avril à septembre 2024 sur l'échéance J0.

Il est à noter que même si ces groupes occupent la même place sur les graphiques, ils ne sont pas constitués d'autant d'échantillons. On a bien plus de mesures de concentrations moyennes (autour de $70 \mu\text{g.m}^{-3}$) que de très hautes concentrations. Des très bons scores sur une de ces classes ne vont donc pas forcément équilibrer de mauvais scores sur un autre, il faut les considérer séparément.

On voit tout d'abord au niveau des biais une tendance claire, pour toutes les échéances et tous les modèles : la surestimation des basses concentrations d'ozone, et inversement (sous-estimation des hautes concentrations). **Seuls les modèles adaptés de Atmo AURA évitent ce biais aux hautes concentrations à J+1, avec des moyennes proches de la réalité.**

Du côté des RMSE, on voit chez tous les modèles une meilleure performance autour des gammes de concentrations moyennes : les erreurs sont les plus faibles autour de $90 \mu\text{g.m}^{-3}$, et elles ont tendance à augmenter pour les très faibles et très fortes concentrations. Cette augmentation des RMSE est particulièrement marquée pour les modèles bruts (CHIMERE et PREVAIR brut), et plus raisonnable pour les modèles adaptés statistiquement, tout en suivant les mêmes ordres de grandeurs.

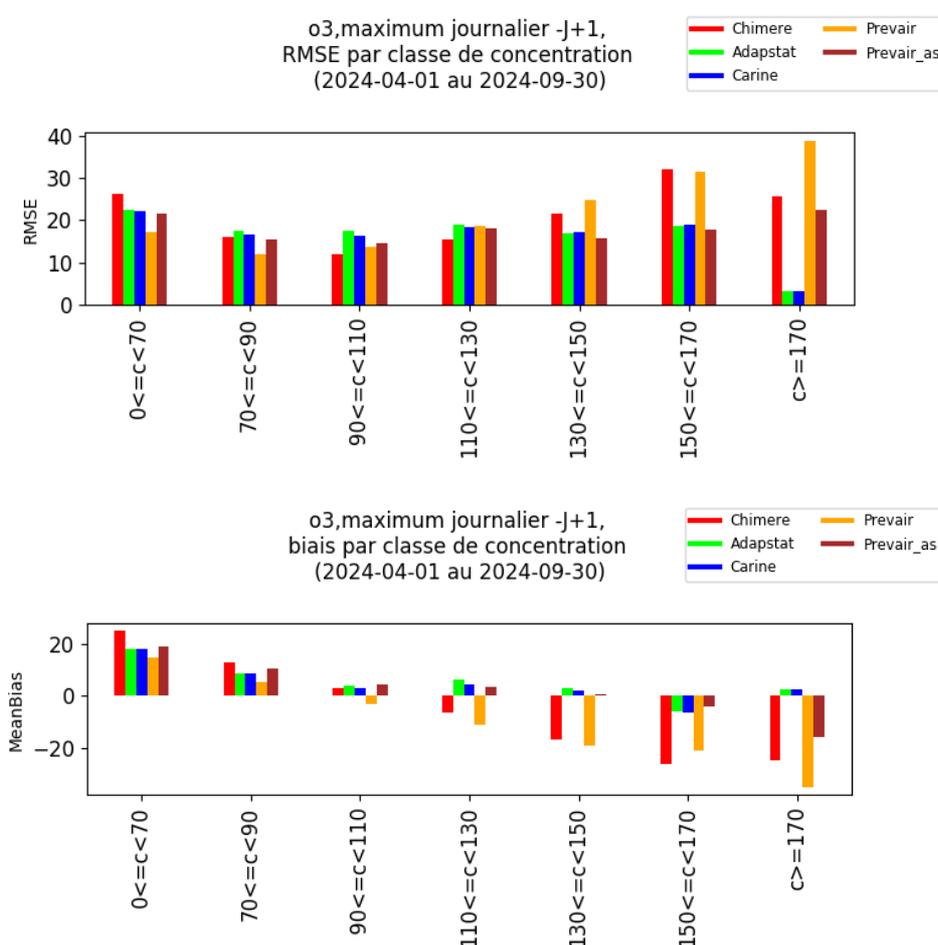


Figure 9 : Ozone - Scores de RMSE et biais par classe de concentration des prévisions CARINE (bleu), CHIMÈRE (rouge), de l'adaptation statistique Chimère (vert), le modèle PREVAIR et le modèle PREVAIR'AS d'avril à septembre 2024 sur l'échéance J+1.

3.1.1.5. Sur plusieurs années

L'objectif de cette partie est de comparer les performances 2024 par rapport aux années précédentes. La Figure 10 montre l'évolution interannuelle des scores de performances pour les cinq différents modèles. On peut notamment observer que :

- Pour la première année depuis le début de cet exercice, on observe un léger recul des scores de RMSE des modèles ADAPSTAT et CARINE, qui ont une erreur plus forte cette année que les dernières années.
- La corrélation a elle reculé pour l'ensemble des modèles par rapport à l'année 2023, et ce de manière assez homogène.
- Le CHIMERE brut de Atmo AURA a toujours tendance à s'améliorer d'année en année au niveau de la RMSE, tandis que sa corrélation semble stable dans le temps.
- Comme pour les quatre années précédentes, les biais calculés pour les modèles adaptés et ajustés sont positifs en 2023. Cela témoigne d'une tendance à surestimer les maximums des concentrations pour l'O₃ après adaptation statistique.

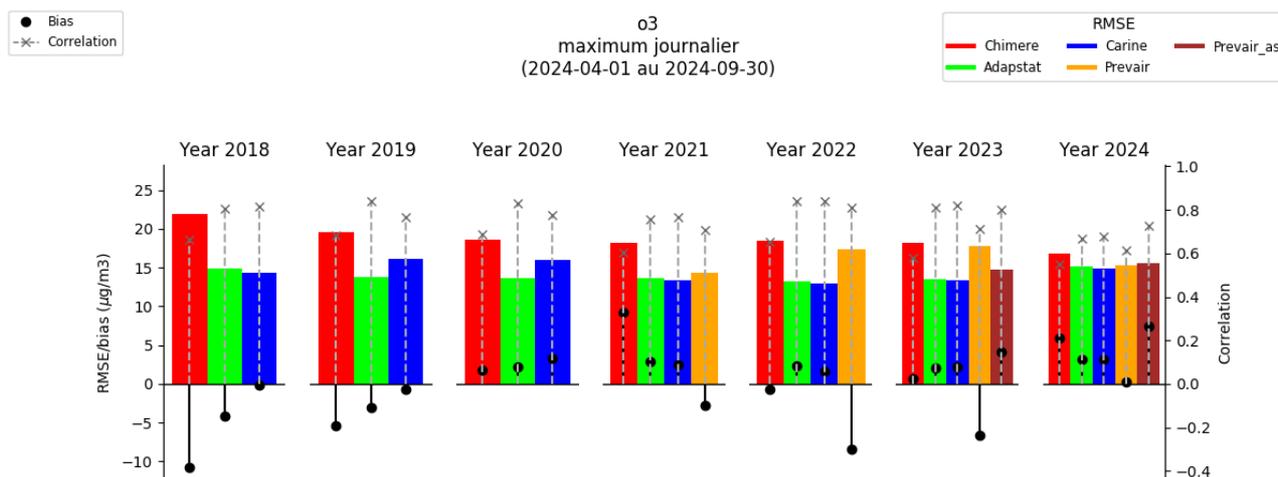


Figure 10 : Ozone - Synthèse des scores de RMSE (barres colorées), biais moyen (points noirs) et corrélation (pointillés gris) entre avril et septembre depuis 2018 pour CHIMERE, pour son adaptation statistique pour le modèle CARINE (modèle expertisé), pour le modèle PREVAIR et pour le modèle PREVAIR assimilé

3.1.2. Performances sur les seuils réglementaires

Les scores présentés dans cette partie sont issus des méthodes d'évaluation de prévision par dichotomie. Celles-ci sont fondées sur une table de contingence indiquant le nombre de « oui » et de « non » prévus et mesurés (Tableau 7). Les quatre combinaisons de prévisions et d'observations permettent de calculer des probabilités conjointes et conditionnelles. Le tableau de contingence compte les éléments suivants :

- Bonne détection (ou good detection) : événement prévu et observé.
- Détection manquée (ou miss) : événement non prévu mais observé.
- Fausse détection (ou false alarm) : événement prévu mais non observé.
- Bonne non-détection (ou correct negative) : événement non prévu et non observé.

		Observation		
		Oui	Non	Total
Prévision	Oui	Bonne détection (a)	Fausse détection (b)	Prévu (a+b)
	Non	Détection manquée (c)	Bonne non-détection (d)	Non observé (c+d)
Total		Où (a+c)	Non où (b+d)	Total (a+b+c+d)

	Non	Détection manquée (c)	Bonne non-détection corrects (d)	Non prévu (c+d)
Total		Observé (a+c)	Non observé (b+d)	

Tableau 7 : Table de contingence

Cette table permet de visualiser quel type d'erreur a été commis. Une bonne prévision devrait logiquement ne contenir que des succès et des rejets corrects, autrement dit tous les dépassements et non dépassements sont validés par les mesures. Inversement, une mauvaise prévision correspond à des dépassements ou non-dépassements non validés par les mesures. Le nombre total d'évènements prévus et observés est également étudié et est appelé distribution marginale. Une grande variété d'indicateurs statistiques sont calculés à partir des éléments de cette table de contingence.

Le comptage des occurrences se fait par rapport à un seuil prédéfini. Il s'agit ici des seuils de dépassement des valeurs réglementaires (seuils d'informations ou d'alerte). Les seuils utilisés comme critères de dépassement sont décrits ci-dessous :

Polluant	Seuil
O ₃ : maximum horaire	180 µg.m ⁻³
PM ₁₀ : moyenne journalière	50 µg.m ⁻³
PM _{2.5} : moyenne journalière	25 µg.m ⁻³

Tableau 8 : Valeurs des seuils utilisées pour le calcul des critères statistiques

3.1.2.1. Scores aux stations

Dans cette partie est étudiée la capacité de la chaîne de prévision à reproduire les dépassements du seuil d'informations aux stations pour l'O₃, soit 180 µg.m⁻³. Il convient de rappeler que ces dépassements aux stations n'expliquent pas systématiquement les vigilances de pollution activées sur la région en 2024. En effet, l'épisode de pollution se caractérise par le dépassement d'un seuil d'Informations ou d'alerte dans le respect d'autres critères définis dans [l'arrêté cadre zonal N°PREF-DIA-BCI-2018-05-22-01](#)² (par exemple, nombre d'habitants ou surface concernés). La période d'avril à octobre compte 1 unique dépassement aux stations du seuil de 180 µg.m⁻³.

3.1.2.1.1. Séries temporelles

La *Figure 11* illustre le nombre de dépassements pour chaque jour de la période étudiée du seuil d'information et de recommandation pour le polluant O₃. Elle représente à la fois le nombre de dépassements observés (en gris) et ceux prévus (en couleur) cumulés sur toutes les stations de fond. 3 dépassements seulement ont eu lieu en 2024, toutes stations confondues, qui n'ont été détectés par aucun des modèles. Avec un nombre aussi faible de dépassements, il s'avère difficile de tirer des conclusions définitives quant aux causes de non-détection. Notons toutefois que ces dépassements ont été des cas relativement isolés, les concentrations des stations environnantes s'étant montrées

²http://www.prefectures-regions.gouv.fr/auvergne-rhone-alpes/content/download/35211/238621/file/5-7-2018_recueil-84-2018-096-recueil-des-actes-administratifs-special.pdf

significativement plus basses, ce qui laisse penser qu'ils ont été provoqués par des phénomènes localisés.

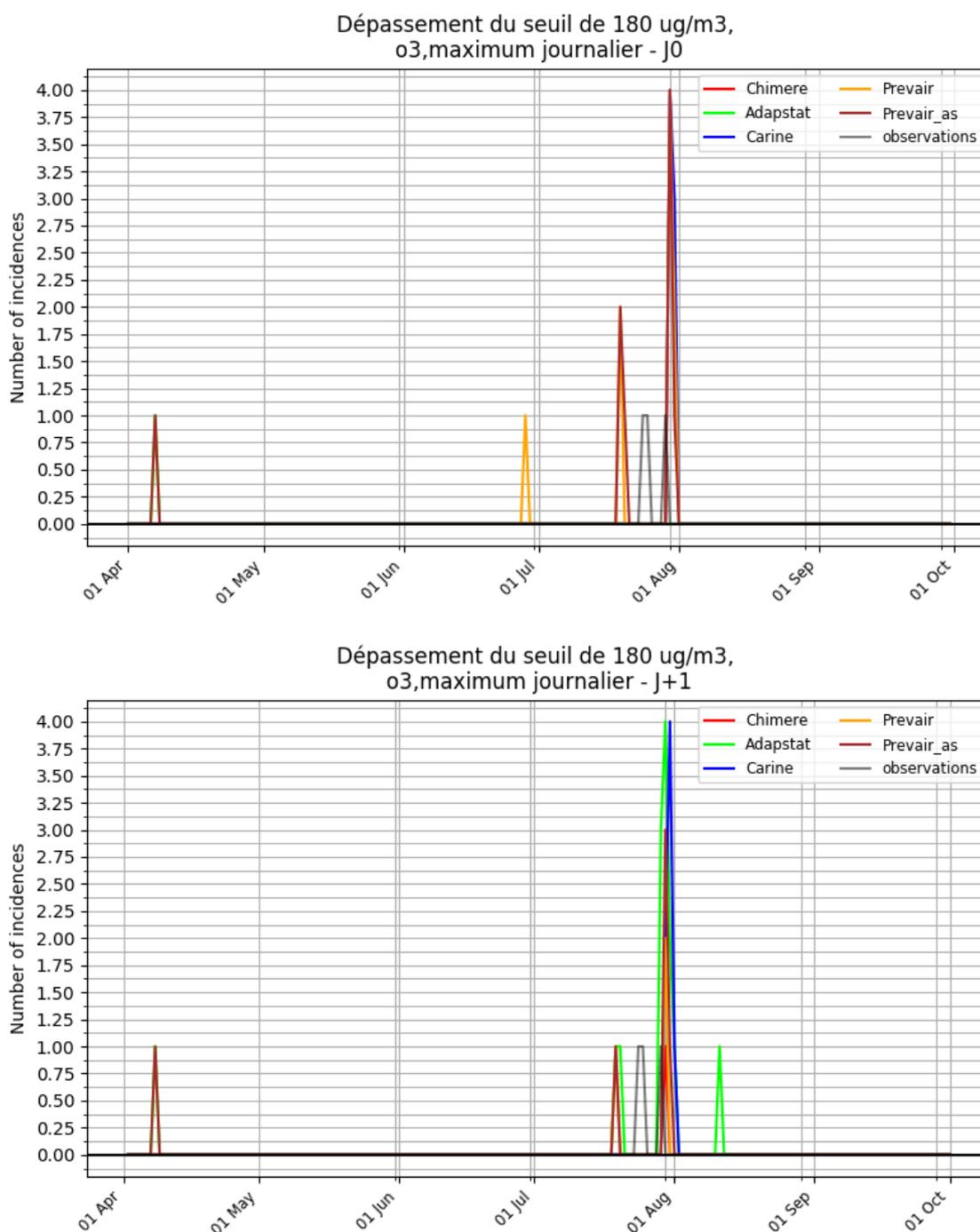


Figure 11 : Ozone - Superposition des dépassements enregistrés et prévus à J0 (en haut) et à J+1 (en bas) sur la période avril – septembre. Modèle brut CHIMERE (en rouge), Chimère adapté statistiquement (ADAPSTAT - en vert) le modèle ajusté par le prévisionniste (CARINE – en bleu), Modèle PREVAIR brut (en Vert) et PREVAIR assimilé (en marron)

3.1.2.1.2. Éléments de la table de contingence

Les Figure 12 et Figure 13 illustrent les valeurs des tables de contingence (bonnes détections, détections manquées et fausses détections) cumulées sur les stations de fond pour la région.

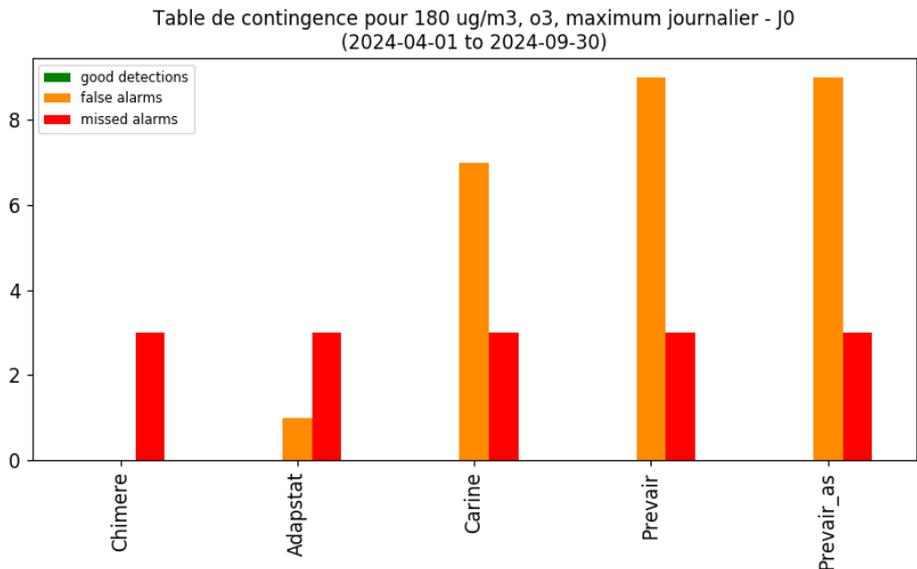


Figure 12 : Ozone - Table de contingence sur la période d'avril à septembre 2024 à l'échéance J0 pour le seuil de $180 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Les bonnes détections sont en vert, les fausses détections en orange, et les détections manquées en rouge. Tables de contingence de CHIMERE (1^{er} groupe), ADAPSTAT (2^e groupe), de CARINE (3^e groupe), de PREVAIR (4^e groupe) et de PREVAIR assimilé (5^e groupe) pour la région Auvergne-Rhône-Alpes entière.

On constate qu'aucun modèle n'a détecté les trois dépassements de l'année 2024. Les « fausses détections » reflètent la mise en application du « principe de précaution » lorsque les niveaux s'approchent des seuils d'activation, ceci afin de limiter le nombre d'évènements non prévus. On adopte une approche plus précautionneuse à l'approche des seuils réglementaires, ce qui peut conduire à une augmentation du nombre de fausses alertes, comme cela est notable à l'échéance J0. En effet, lorsque le modèle adapté statistiquement (ADAPSTAT) anticipe un seul dépassement, la prévision expertisée par les prévisionnistes en prévoit 7. A l'échéance J+1, un grand nombre de fausses alertes est prévu par les modèles assimilés. Respectivement, on compte 14, 7 et 6 fausses alertes pour les modèles ADAPSTAT, la prévision expertisée (CARINE) et PREVAIR_AS.

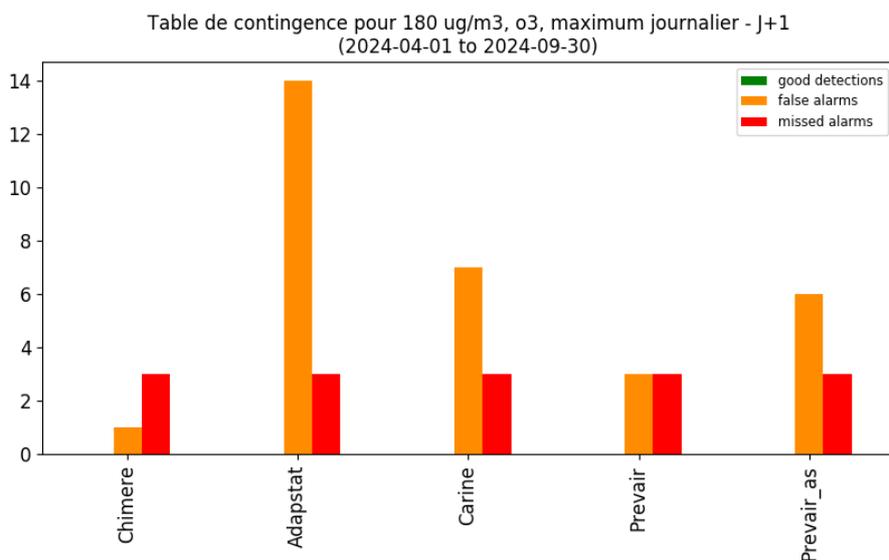


Figure 13 : Ozone - Tables de contingence sur la période d'avril à septembre 2024 à l'échéance J+1 pour le seuil de $180 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Les bonnes détections sont en vert, les fausses détections en orange, et les détections manquées en rouge. Table de contingence de CHIMERE (1^{er} groupe), ADAPSTAT (2^e groupe), de CARINE (3^e groupe), de PREVAIR (4^e groupe) et de PREVAIR assimilé (5^e groupe) pour la région Auvergne-Rhône-Alpes entière.

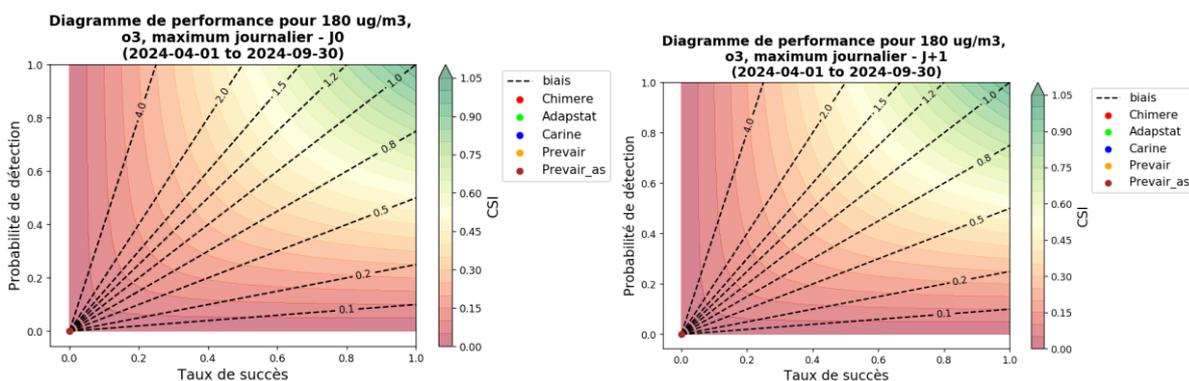


Figure 14 : Ozone - Diagramme de performance pour Chimère (rouge), ADAPSTAT (vert) CARINE (bleu), PREVAIR (orange), PREVAIR assimilé (marron) d'avril à septembre 2024 pour l'échéance J0 (à gauche) et celle de J+1 (à droite)

La Figure 14 a été réalisée afin de représenter une vue complète des performances des prévisions par rapport à la détection des seuils réglementaires, l'objectif du modèle étant de se situer au plus proche du coin supérieur droit). Les axes sont les suivants :

- Axe horizontal : capacité du modèle à faire de bonnes prévisions parmi les détections.
- Axe vertical : capacité du modèle à prévoir des dépassements.
- Axe transverse : proportion de fausses détections par rapport aux détections manquées.
- Axe couleur : capacité du modèle à faire de bonnes prévisions sans évènements parasites (fausses détections, détections manquées).

Cette année, les 3 dépassements enregistrés n'ont été détectés par aucun des modèles, et cela entraîne nécessairement un taux de détection et de succès de 0 % pour l'ensemble des modèles.

3.1.2.2. Scores en lien avec les critères réglementaires de déclenchement d'épisode de pollution

Le précédent paragraphe étudie la capacité de la chaîne de prévision à reproduire les dépassements du seuil d'informations aux stations. Dans ce paragraphe, l'étude porte uniquement sur les journées d'épisodes de pollution, au sens de [l'Arrêté Cadre Zonal du 12 février 2024](#). En effet, l'activation d'une vigilance de pollution n'est pas déterminée par des dépassements ponctuels des valeurs du seuil par une station de mesure mais elle se caractérise par d'autres critères définis dans l'arrêté cité précédemment. L'activation d'une vigilance de pollution dans un bassin d'air doit satisfaire d'au moins un de deux critères suivants :

- a. Critère de déclenchement associé à la superficie : au moins 25 km² du même bassin d'air sont concernés par un dépassement du seuil d'information et de recommandations ou/et du seuil d'alerte.
- b. Critère de déclenchement associé à la population :
 - o Dans les bassins d'air de plus de 500 000 habitants (dans les zones Puy-de-Dôme, bassin grenoblois, bassin lyonnais nord-Isère et vallée du Rhône) : lorsqu'au moins 10% de la population du bassin d'air est concernée par un dépassement de seuils.
 - o Dans les bassins d'air de moins de 500 000 habitants : lorsqu'au moins une population de 50 000 habitants au total est concernée par un dépassement de seuils.

Ici, on calcule donc les occurrences de dépassements au sens des critères d'activation d'une vigilance de pollution. Chaque jour de l'année correspond exclusivement à un des évènements suivants :

1. Pas de dépassement prévu, pas de dépassement constaté.
2. Dépassement prévu et constaté – Bonne détection.

3. Dépassement prévu et non confirmé a posteriori – Fausse alerte.
4. Dépassement avéré mais non prévu – Alerte manquée.

L'évaluation des performances de prévision des épisodes de pollution consiste à calculer uniquement les occurrences des éléments type (2,3 et 4) pour chaque bassin d'air. Contrairement aux évaluations précédentes, qui portaient sur les dépassements observés à l'échelle d'une station de mesure, l'analyse des critères AMU se fait ici à l'échelle d'un bassin d'air, en tenant compte à la fois des critères surfaciques et de l'exposition de la population. **Pour l'année 2024, aucun dépassement des critères AMU n'a été enregistré, ce qui ne permet pas de produire de table de contingence pour cette période.**

3.2. Préviation particules fines (PM₁₀)

Contrairement à l’ozone, les particules PM₁₀ sont des polluants dont la variabilité intra-annuelle est relativement faible. La période étudiée ici est donc l’année complète. Les scores sont cette fois calculés sur les moyennes journalières, alors qu’ils l’étaient sur les maxima horaires journaliers pour l’ozone.

3.2.1. Scores classiques (Biais, RMSE, Corrélation)

3.2.1.1. Par rapport aux objectifs de qualité

Le Tableau 9 illustre les objectifs de qualité définis pour les particules fines PM₁₀. Ces valeurs doivent s’appliquer aux performances des prévisions en région sur chaque bassin d’air aux échéances J0 et J+1. Les prévisions de la qualité élaborées par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes doivent satisfaire ces critères.

Biais (µg.m ⁻³)	RMSE (µg.m ⁻³)	Corrélation
-7,5 > biais > +7,5	RMSE < 15	c > 0,6

Tableau 9 : Objectif de qualité définis pour les particules fines PM₁₀ s’appliquant aux performances des prévisions en région et sur chaque bassin d’air aux échéances J0 et J+1.

Les résultats statistiques par zone d’activation de dispositif sont présentés sur les *Figure 15* et *Figure 16*, pour les échéances J0 et J+1 respectivement. **On constate que les interventions des prévisionnistes sont bénéfiques, menant à de meilleurs scores que les simples modèles adaptés statistiquement (CARINE vs ADAPSTAT). Pour les 2 échéances, les interventions des prévisionnistes ont fait baisser les erreurs, et augmenter la corrélation entre prévisions et mesures.**

Relativement aux objectifs rappelés dans le tableau ci-dessus, **la prévision expertisée atteint ces objectifs, pour toute métrique, toute échéance, et tout bassin d’air.** C’est le seul modèle parvenant à accomplir ceci, les autres modèles statistiques étant en dessous du seuil de 0.6 pour la corrélation à J+1 pour de nombreux bassins d’air.

Les modèles bruts sont considérablement moins bons pour la prévision de PM₁₀ que les modèles adaptés, et on voit également que là où CHIMERE a une RMSE meilleure à celle de PREV’AIR brut, la corrélation est meilleure pour le modèle brut de PREV’AIR. Les comportements de ces modèles non ajustés sont plus variables d’un bassin d’air à un autre, avec quasiment 10 µg.m⁻³ d’écart en RMSE, tandis que les modèles ajustés se comportent de manière plus stable, leurs scores étant plus resserrés.



Figure 15 : PM₁₀ - Scores de RMSE, biais et corrélation par bassin d'air des prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), des prévisions PREV'AIR (orange) et de PREV'AIR assimilé (marron) pour l'échéance J0. La ligne en pointillé orange indique l'objectif de qualité.

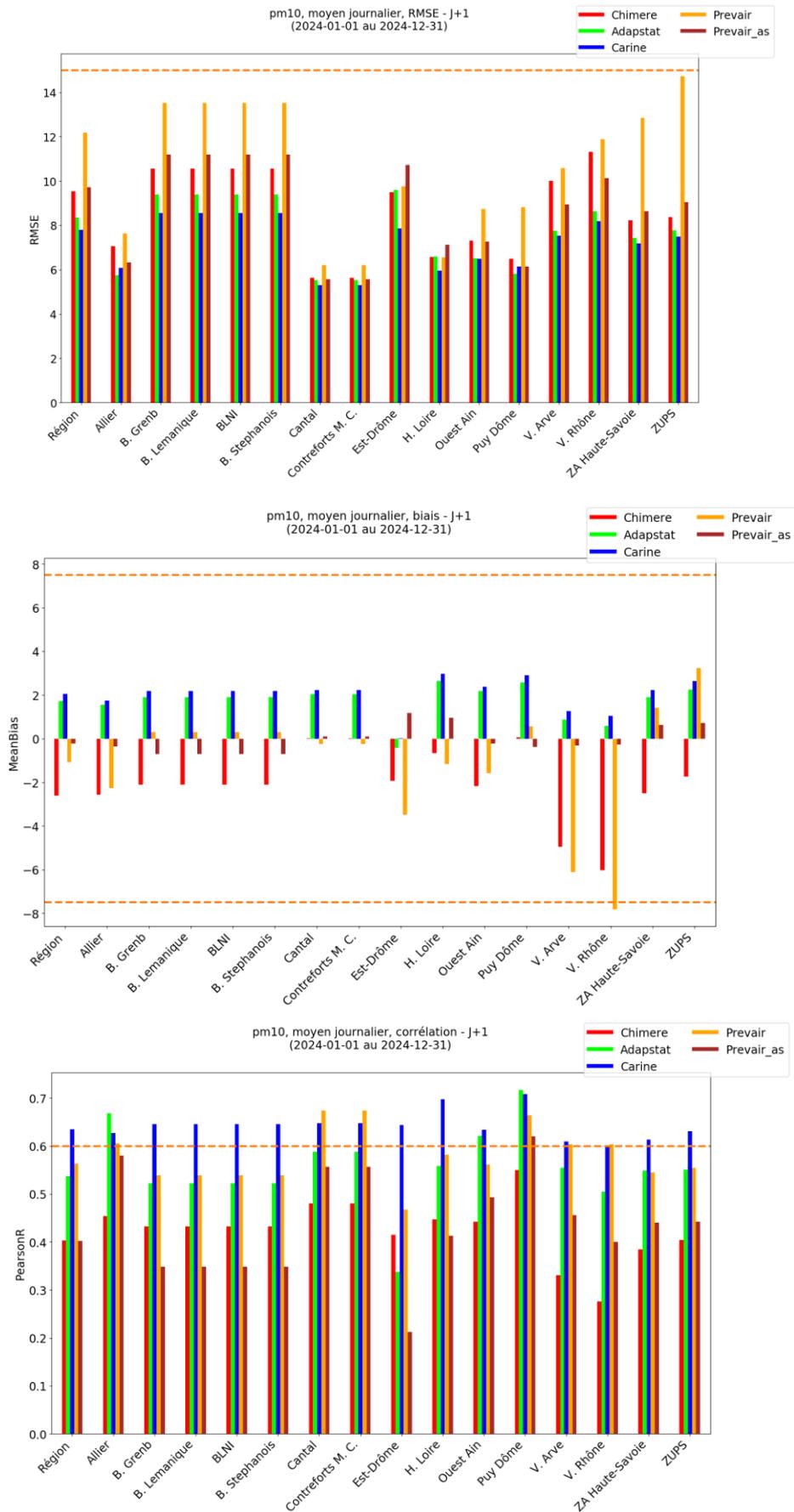


Figure 16 : PM₁₀ - Scores de RMSE, biais et corrélation par bassin d'air des prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), des prévisions PREV'AIR (orange) et de PREV'AIR assimilé (marron) pour l'échéance J0. La ligne en pointillé orange indique l'objectif de qualité.

On voit enfin que parmi les modèles ajustés statistiquement, sans intervention d'un prévisionniste, le modèle ADAPSTAT et le modèle PREVAIR_AS sont très proches, le premier ayant une RMSE meilleure, en particulier à J+1, et le second étant légèrement devant en termes de corrélation.

3.2.1.2. Par typologie

Les Figure 17 et Figure 18 illustrent les performances de la chaîne de prévision en fonction de la typologie des stations de mesures. Comme pour l'ozone, les meilleures performances statistiques sont globalement associées aux stations rurales, dont la RMSE et le biais sont plus faibles que pour les stations urbaines et périurbaines. Les bonnes performances observées sur les sites ruraux sont liées à l'aptitude de la chaîne de modélisation à reproduire les faibles et moyennes concentrations.

On voit que les modèles bruts sont particulièrement moins bons sur les stations urbaines et périurbaines, avec des comportements locaux durs à reproduire sans adaptation spécifique grâce aux données des stations. Aux stations rurales, cet écart est moins fort, et les performances de CHIMERE brut se rapprochent même des autres modèles à J+1.

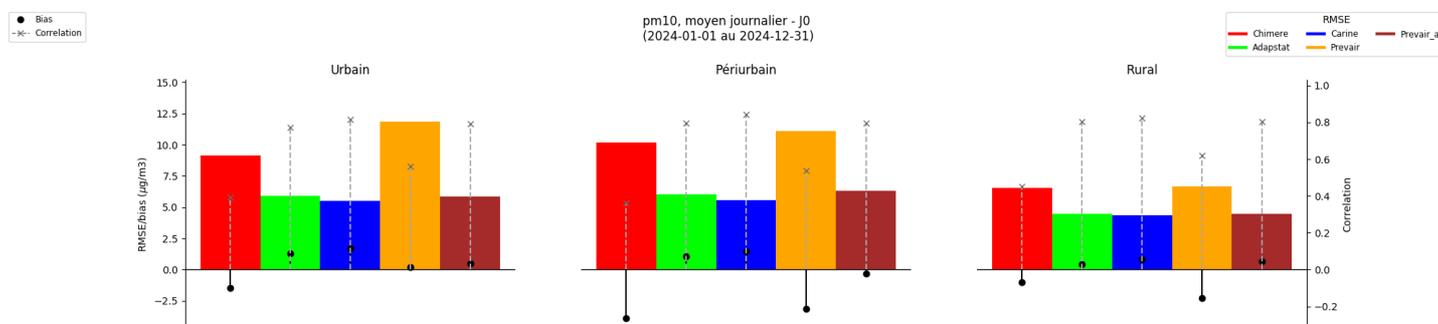


Figure 17 : PM₁₀ - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction de la typologie de station (urbaines, périurbaines, rurales) des prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), des prévisions PREVAIR (orange) et de PREVAIR assimilé (marron) sur l'échéance J0

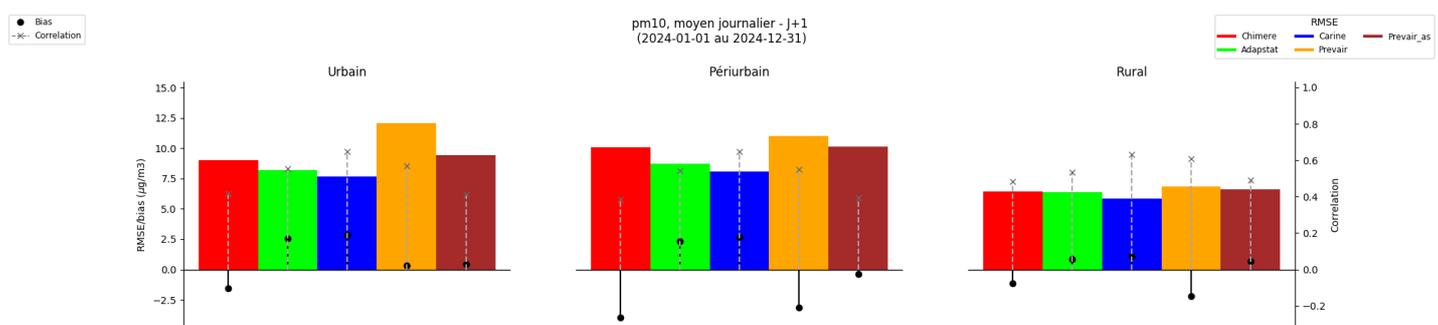


Figure 18 : PM₁₀ - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction de la typologie de station (urbaines, périurbaines, rurales) des prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), des prévisions PREVAIR (orange) et de PREVAIR assimilé (marron) sur l'échéance J+1

3.2.1.3. Par échéance de prévision

La Figure 19 représente les performances statistiques calculées pour les différentes échéances de prévision (J0, J+1 et J+2) pour l'année 2024. Cette figure montre que les résultats de prévision adaptés et ajustés sont plus fiables pour J0 (prévision pour le jour-même) que pour le lendemain (J+1) et le surlendemain (J+2). En effet, les corrélations sont plus élevées, les biais et les RMSE sont plus faibles à J0 qu'aux autres échéances, et ce particulièrement pour les modèles statistiquement ajustés, qui bénéficient plus des informations récentes. Les modèles bruts CHIMERE et PREVAIR, eux,

ont une performance plus stable au fil du temps. On observe toujours une propension de ces modèles bruts à sous-estimer les concentrations (biais négatif) quelle que soit l'échéance.

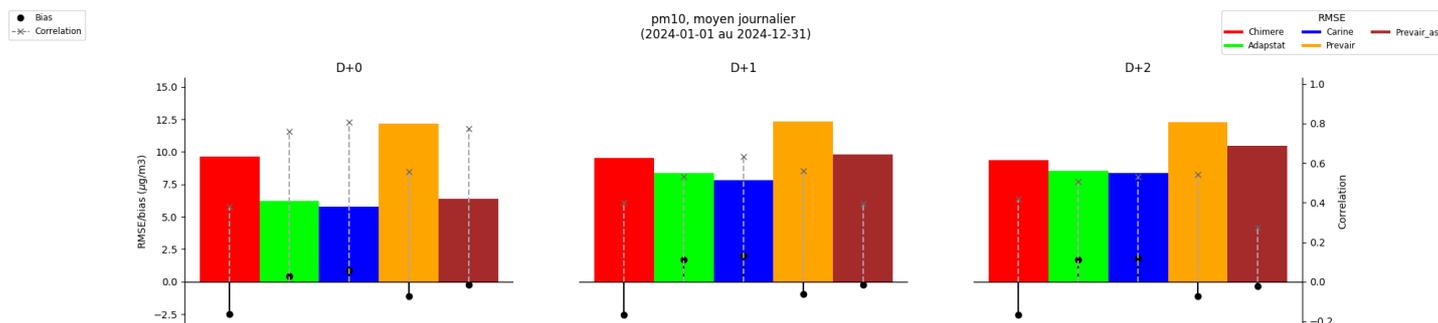


Figure 19 : PM₁₀ - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction du jour de prévision pour prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), des prévisions PREVAIR (orange) et de PREVAIR assimilé (marron) en 2024.

3.2.1.4. Par gamme de concentration

A l'instar de la méthodologie utilisée dans la section 3.1.1.4, on groupe les données journalières selon leur classe de concentration (par rapport aux observations). Pour chaque groupe, on calcule les scores moyens sur les stations de fond. Les Figure 20 et Figure 21 illustrent l'évolution des scores (RMSE et biais moyen) en fonction des classes de concentrations des particules PM₁₀. Elles montrent que l'évolution des performances des modèles en fonction des gammes de concentrations est quasi-identique pour tous les modèles : chacun voit ses performances se dégrader lorsque la concentration en particule augmente. Ce comportement est valable à la fois pour les prévisions de l'échéance J0 et celles de J+1. Les biais fortement négatifs observés pour les gammes des concentrations supérieures à 50 µg.m⁻³ traduisent une difficulté de la chaîne de prévision à bien reproduire les plus fortes concentrations de particules PM₁₀, sous-estimant de manière significative ces concentrations, moins fréquentes dans les données. Un élément notable pour l'année 2024 est la plus fréquente occurrence d'intrusion de poussières désertiques dans la région. Ces incursions ne sont pas anticipées dans la version de la chaîne étudiée ici, mais sont maintenant prises en compte dans la chaîne mise en production en cours d'année 2024. Cette nouvelle version devrait impacter positivement les scores dans les hautes concentrations.

Ces figures mettent à nouveau en évidence la capacité de l'adaptation statistique à améliorer les résultats bruts de prévision pour les particules PM₁₀. En effet, les modèles bruts CHIMERE et PREVAIR sous-estiment largement les concentrations de particules PM₁₀, le modèle PREVAIR présentant toutefois une dérive moins importante dans les hautes concentrations. Le biais considérablement plus faible des modèles statistiquement adaptés, et en particulier une fois l'expertise humaine ajoutée, témoigne de la plus grande capacité de ces modèles à prédire correctement les pics de pollution. L'intervention humaine est donc bien nécessaire, d'autant plus que les situations d'alertes sont plus fréquentes pour les PM₁₀ que pour l'ozone.

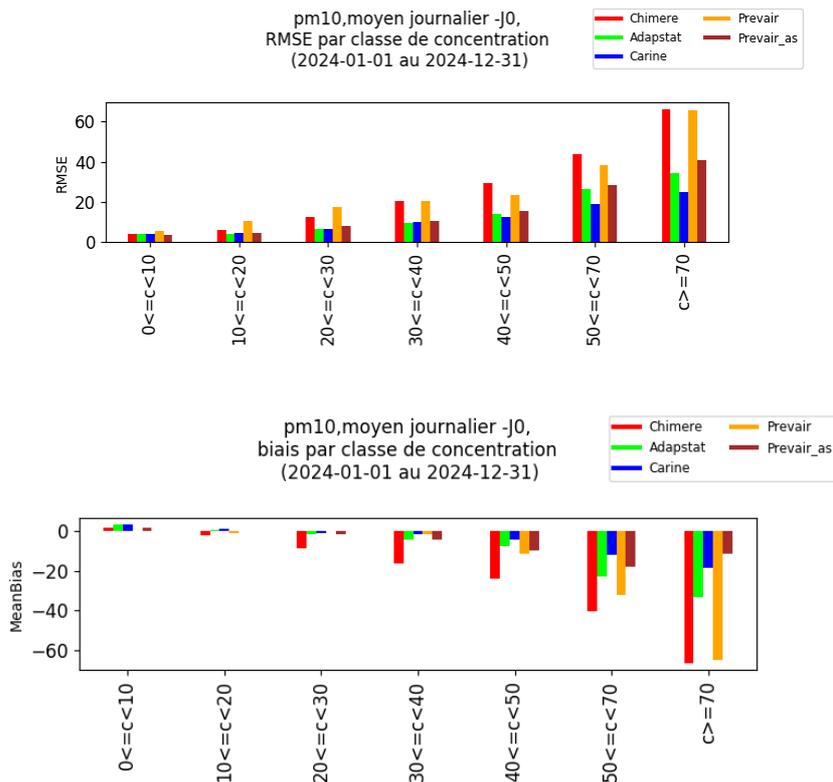


Figure 20 : PM₁₀ - Scores de RMSE et biais par classe de concentration des prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), des prévisions PREVAIR (orange) et de PREVAIR assimilé (marron) sur l'échéance J0.

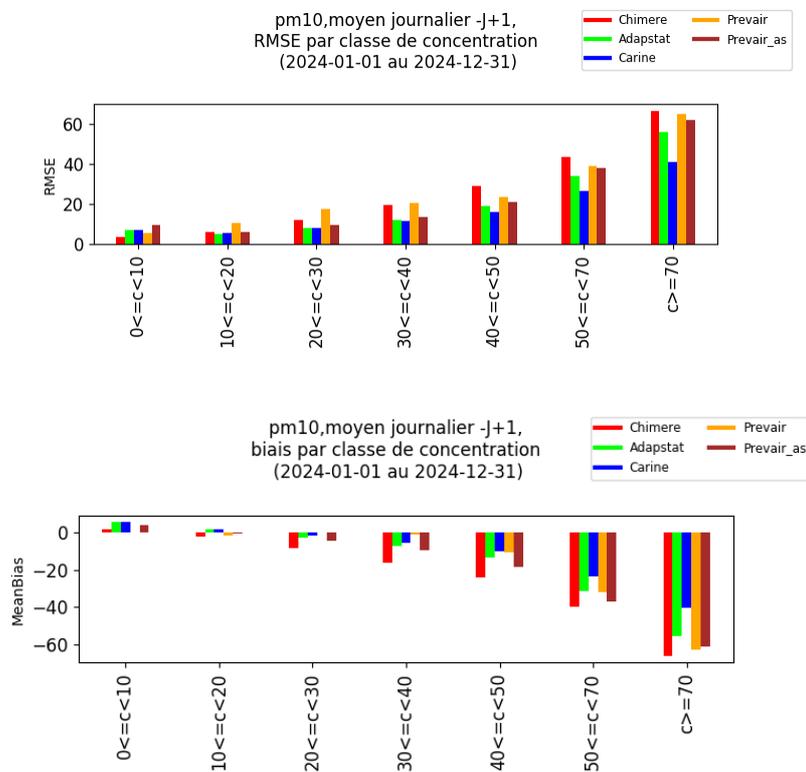


Figure 21 : PM₁₀ - Scores de RMSE et biais par classe de concentration des CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), des prévisions PREVAIR (orange) et de PREVAIR assimilé (marron) sur l'échéance J+1.

3.2.1.5. Sur plusieurs années

On compare maintenant les performances 2024 à celles des années précédentes pour les PM₁₀. La Figure 22 présente l'évolution interannuelle des scores de performances pour les différents modèles. On observe que l'année 2024 n'a pas été une année facile pour la prévision des PM₁₀. La RMSE de tous les modèles augmente par rapport aux années précédentes, de manière légère pour les modèles statistiquement adaptés, et assez importante pour les modèles bruts. Cependant, la corrélation se maintient aux mêmes niveaux, tandis que le biais baisse légèrement. Cette augmentation générale des RMSE peut potentiellement être expliquée par la baisse générale des niveaux de polluants : on voit que la performance des modèles bruts baisse en conséquence. Les modèles adaptés statistiquement étant basés sur ces modèles bruts, il est cohérent de voir leur performance légèrement baisser aussi.

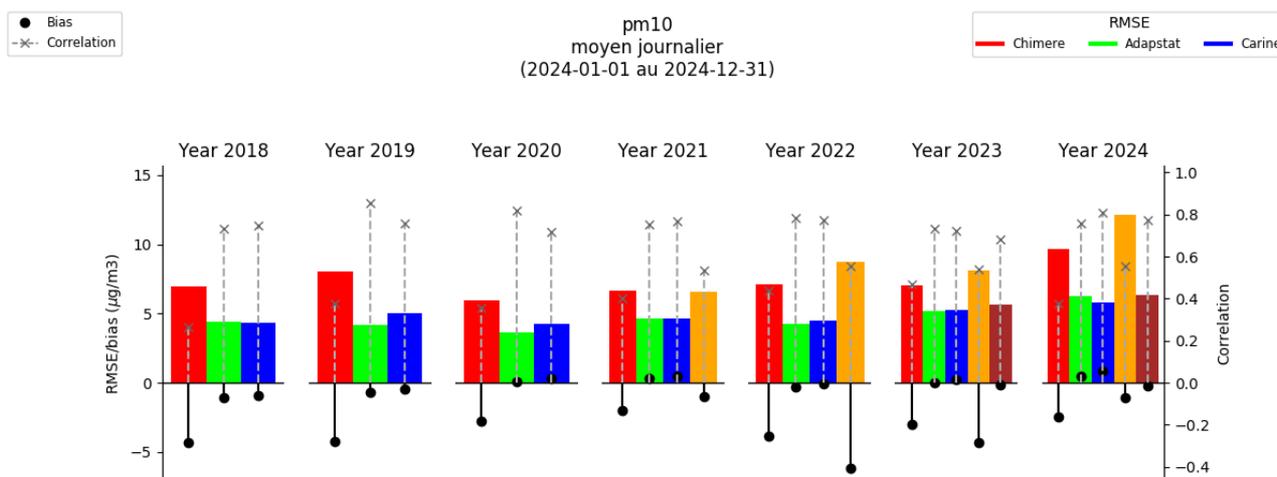


Figure 22 : PM₁₀ - Synthèse des scores de RMSE (barres colorées), biais moyen (points noirs) et corrélation (pointillés gris) depuis 2018 pour CHIMÈRE, pour son adaptation statistique, pour le modèle CARINE (modèle expertisé), pour le modèle PREV'AIR et le modèle PREV'AIR assimilé

3.2.2. Performances sur les seuils réglementaires

3.2.2.1. Scores aux stations

Dans cette partie est étudiée la capacité de la chaîne de prévision à reproduire les dépassements du seuil d'information aux stations pour les particules PM₁₀. Il convient de rappeler que ces dépassements aux stations n'impliquent pas systématiquement les vigilances de pollution activées sur la région en 2024. En effet, l'épisode de pollution se caractérise par le dépassement d'un seuil de recommandation ou d'alerte avec le respect d'autres critères définis dans [l'Arrêté Cadre Zonal du 12 février 2024](#)³.

3.2.2.1.1. Séries temporelles

La Figure 23 illustre le nombre de dépassements journaliers du seuil d'information et de recommandation pour les particules PM₁₀ sur l'année 2024. Elle représente à la fois le nombre de dépassements observés (en gris) et ceux prévus (en couleur) cumulés sur toutes les stations de fond pour chaque journée de la période considérée. En 2024, 130 dépassements cumulés ont été observés, toutes stations confondues, répartis sur 28 jours. Ce graphique tend à démontrer

³http://www.prefectures-regions.gouv.fr/auvergne-rhone-alpes/content/download/35211/238621/file/5-7-2018_recueil-84-2018-096-recueil-des-actes-administratifs-special.pdf

qu'ADAPSTAT et CARINE ont réussi à détecter et anticiper efficacement l'occurrence des épisodes de pollution. Le modèle PREV'AIR a eu tendance à générer de nombreuses fausses alertes. Cependant, quelques dépassements ponctuels n'ont pas été prévus par les différents modèles de prévision. Il s'agit majoritairement des épisodes occasionnés par les retombées de poussières désertiques. En fin d'année, les modèles ont anticipé plusieurs dépassements n'ayant pas eu lieu.

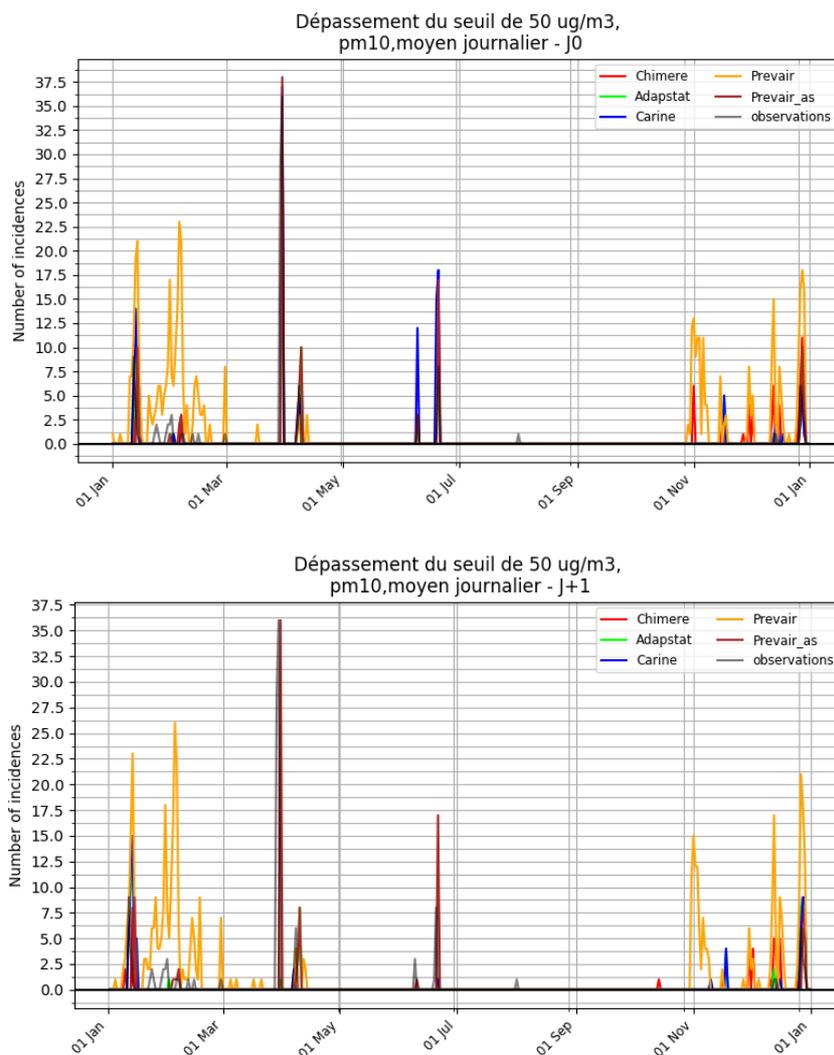


Figure 23 : PM₁₀ - Superposition des dépassements enregistrés et prévus à J0 (en haut) et à J+1 (en bas) à différentes étapes de la chaîne de prévision : modèle brut (CHIMERE en rouge), modèle adapté statistiquement (ADAPSTAT - en vert) le modèle ajusté par le prévisionniste (CARINE – en bleu), le modèle PREV'AIR (en orange) et le modèle PREV'AIR assimilé (en marron)

3.2.2.1.2. Éléments de la table de contingence

Les Figure 24 et Figure 25 illustrent les valeurs des tables de contingence (bonne détection, détection manquée et fausse détection) cumulées sur les stations de fond pour la région et déclinées par bassin d'air disposant d'un arrêté de mesures d'urgence.

La comparaison entre les résultats adaptés statistiquement et ajustés par le prévisionniste montre que l'expertise humaine améliore le taux de détection du seuil d'information à J0. En effet, là où ADAPSTAT manque 80 alarmes, la prévision expertisée n'en manque que 64, soit 16 de moins. Ceci s'accompagne de fausses alertes supplémentaires (55 pour ADAPSTAT, 77 pour CARINE). Les prévisionnistes ont pour consigne de favoriser le « principe de précaution », afin de limiter le nombre d'évènements non prévus. Le modèle PREV'AIR_AS affiche également de bonnes performances à J0, avec 73 alarmes manquées, et seulement 52 fausses alertes, soit le score le plus bas.

A J+1, on observe que le nombre de bonnes détections diminue drastiquement, pour descendre au mieux à 16, pour le modèle expertisé CARINE. Les différents modèles n'anticipent que peu de dépassements et certains ne dépassent quasiment jamais le seuil des $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, (58 fausses alarmes pour CARINE), tandis que d'autres prédisent beaucoup de dépassements, mais pas aux bons moments ou aux bons endroits (475 fausses alarmes pour PREVAIR brut).

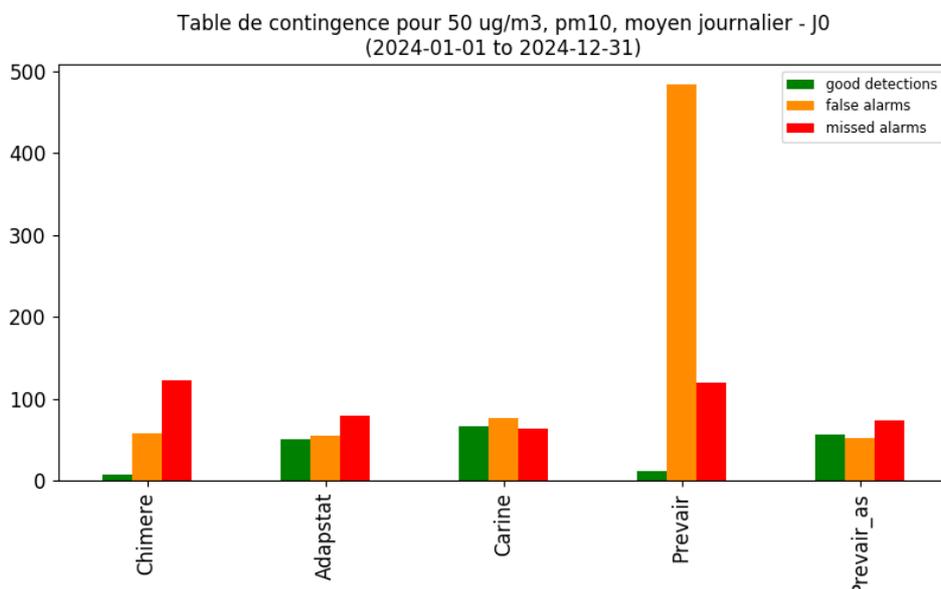


Figure 24 : PM_{10} - Tables de contingence pour l'année 2024 à l'échéance J0 pour le seuil de $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Tables de contingence de CHIMERE (1er groupe), ADAPSTAT (2e groupe), de CARINE (3e groupe), de PREVAIR (4e groupe) et de PREVAIR assimilé (5e groupe) pour la région Auvergne-Rhône-Alpes entière.

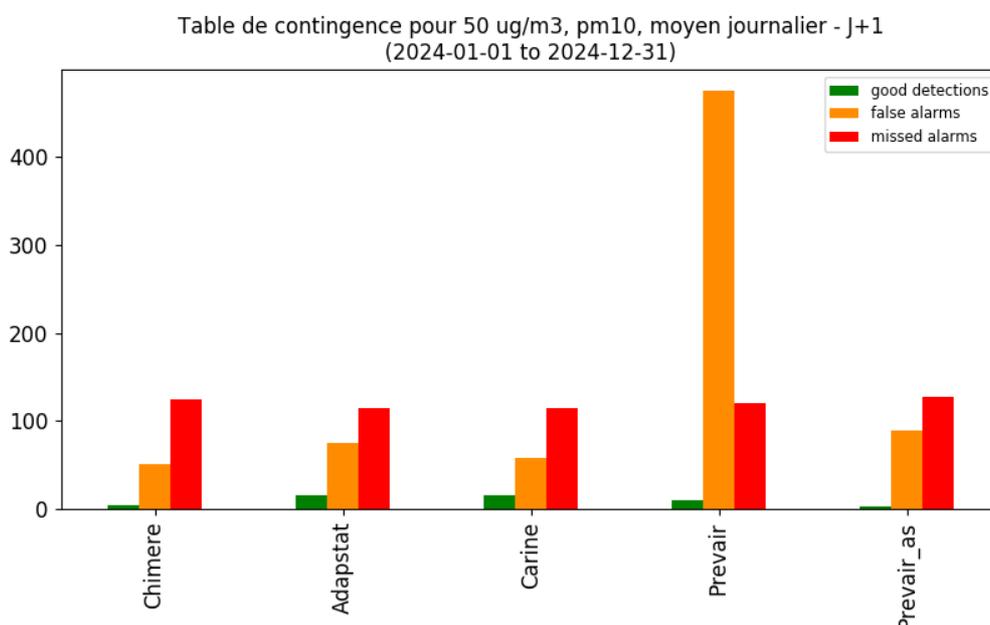


Figure 25 : PM_{10} - Tables de contingence calculée sur l'année 2024 à l'échéance J+1 pour le seuil de $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Tables de contingence de CHIMERE (1er groupe), ADAPSTAT (2e groupe), de CARINE (3e groupe), de PREVAIR (4e groupe) et de PREVAIR assimilé (5e groupe) pour la région Auvergne-Rhône-Alpes entière.

La Figure 26 représente une vue complète des performances des prévisions par rapport à la détection des seuils réglementaires (l'objectif est de se situer au plus proche du coin supérieur droit) :

- Axe horizontal : capacité du modèle à faire de bonnes prévisions parmi les détections
- Axe vertical : capacité du modèle à prévoir des dépassements
- Axe transverse : proportion de fausses détections par rapport aux détections manquées

- Axe couleur : capacité du modèle à faire de bonnes prévisions sans évènements parasites (fausses détections, détections manquées).

Cette figure illustre que si aucun modèle n'a de très hautes performances dans l'absolu, le modèle qui affiche les meilleures performances est bien celui corrigé par les prévisionnistes d'Atmo AURA, aussi bien à J0 qu'à J+1. Le modèle PREVAIR_AS est proche à J0, un peu devant le modèle ADAPSTAT. A J+1, les performances de PREVAIR_AS sont moindres, tandis qu'ADAPSTAT reste performant. On voit bien la mauvaise capacité des modèles bruts à prévoir les dépassements sur ces graphiques : leurs taux de succès et probabilités de détections sont tous deux proches de 0.

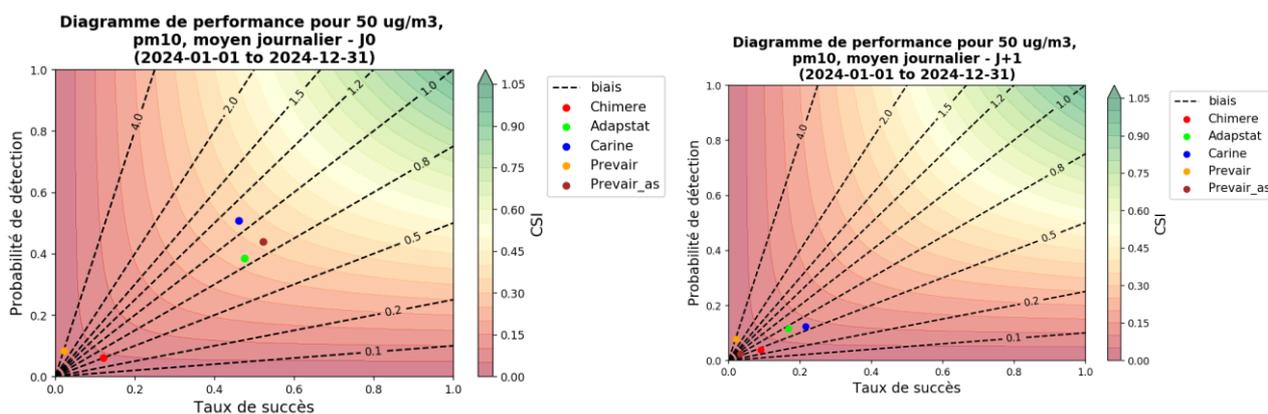


Figure 26 : PM₁₀ - Diagramme de performance pour CHIMERE (rouge), ADAPSTAT (vert), CARINE (bleu), PREV'AIR (orange) et PREV'AIR assimilé (marron) en 2024 pour l'échéance J0 (à gauche) et celle de J+1 (à droite)

3.2.2.2. Scores en lien avec les critères réglementaires de déclenchement d'un épisode de pollution

Le précédent paragraphe étudie la capacité de la chaîne de prévision à reproduire les dépassements du seuil d'information aux stations. Dans ce paragraphe, l'étude porte uniquement sur les journées d'épisodes de pollution, au sens de [l'Arrêté Cadre Zonal du 12 février 2024](#). En effet, l'activation d'une vigilance de pollution n'est pas déterminée par des dépassements ponctuels des valeurs du seuil dans une station de mesure mais elle se caractérise par d'autres critères définis dans l'arrêté cité précédemment.

Dans ce paragraphe, l'évaluation de performance de notre système de prévision consiste à calculer les occurrences de dépassements au sens des critères d'activation d'une vigilance de pollution. Chaque jour de l'année correspond exclusivement à un des évènements suivants :

1. Pas de dépassement prévu, pas de dépassement constaté.
2. Dépassement prévu et constaté – Bonne détection.
3. Dépassement prévu et non confirmé a posteriori – Fausse alerte.
4. Dépassement avéré mais non prévu – Alerte manquée.

L'évaluation des performances de prévision des épisodes de pollution consiste à calculer uniquement les occurrences des éléments type (2, 3 et 4) pour chaque bassin d'air.

La *Figure 27* : PM₁₀ - Table de contingence des critères AMU (critères surfaciques et de population confondus) sur toute l'année 2024 à l'échéance J+0 (haut) et J+1 (bas) pour le modèle CARINE présente les tables de contingence construite pour évaluer la qualité des prévisions des dépassements des critères AMU. Contrairement aux évaluations précédentes centrées sur les dépassements à l'échelle d'une station de mesure, il est question ci-dessous des dépassements des

critères AMU à l'échelle d'un bassin d'air en croisement avec les critères surfaciques et de populations. Les prévisions réalisées à J0 sont confrontées à l'analyse effectuée a posteriori à l'échéance J-1 du jour suivant pour le modèle ADAPSTAT.

En centrant l'analyse aux critères AMU, on observe une réduction marquée du nombre de cas identifiés, avec moins d'une cinquantaine de dépassements enregistrés au cours de l'année 2024. Les performances du modèle demeurent comparables : le nombre de bonnes prévisions et celui des dépassements non détectés restent du même ordre de grandeur, à J0 comme à J+1. Aucun bassin d'air ne ressort particulièrement. Le faible nombre de détections manquées dans le bassin lyonnais et la vallée de l'Arve à J0 (au prix de nombreuses fausses alertes). Le faible nombre d'alertes manquées dans la vallée de l'Arve est particulièrement notable, ce bassin étant notoirement pollué, et les conditions de pollution atmosphérique étant assez uniques (relief et trafic routier) et compliqué à prédire.

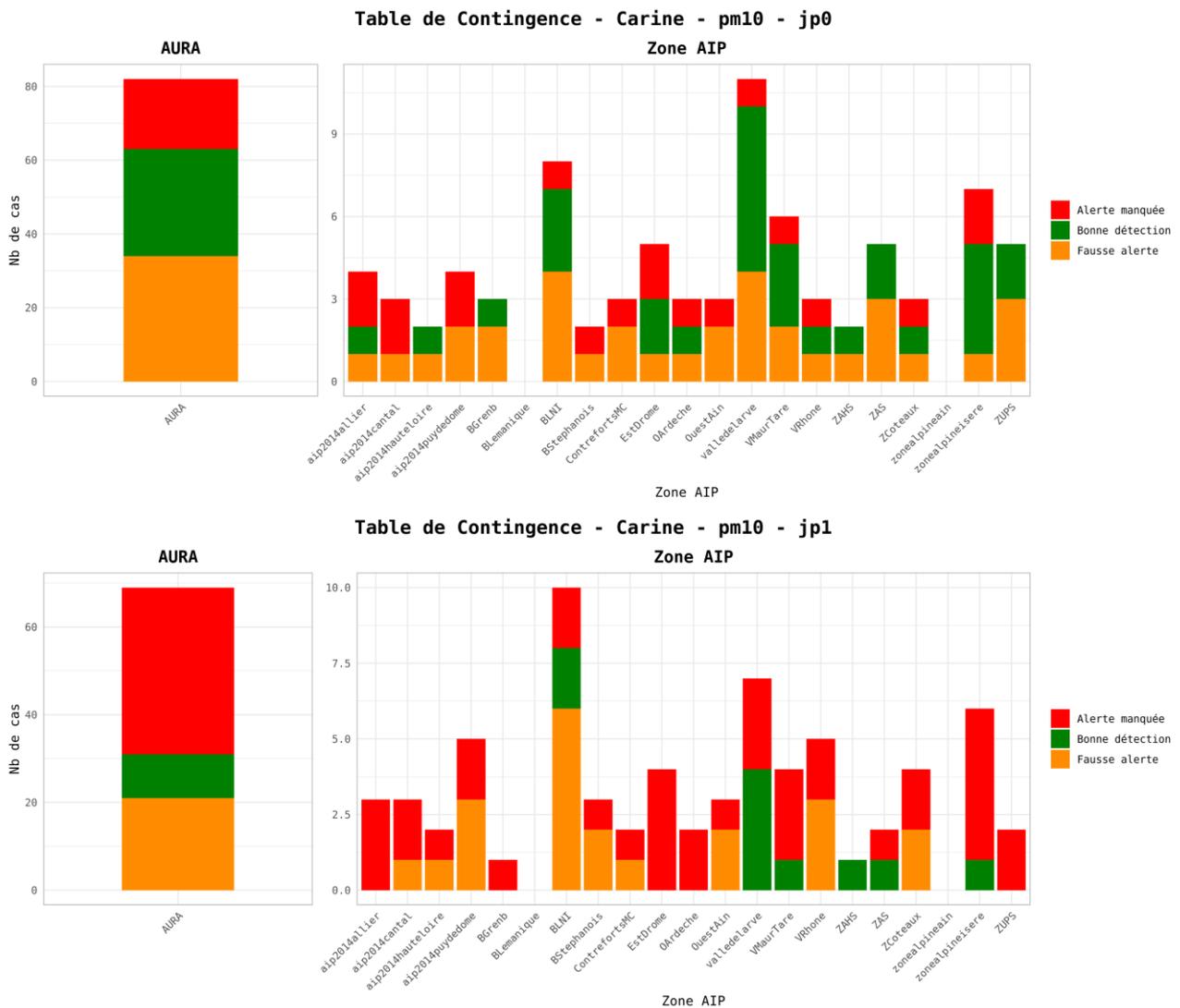


Figure 27 : PM₁₀ - Table de contingence des critères AMU (critères surfaciques et de population confondus) sur toute l'année 2024 à l'échéance J+0 (haut) et J+1 (bas) pour le modèle CARINE.

3.3. Prévision particules fines (PM_{2.5})

Les PM_{2.5} représentant une fraction des PM₁₀, leur prévision est similaire et les pics surviennent dans des circonstances semblables. De même que pour les PM₁₀, les scores ont été calculés sur l'ensemble de l'année.

3.3.1. Scores classiques (Biais, RMSE, Corrélation)

3.3.1.1. Par rapport aux objectifs de qualité

Le *Tableau 9* illustre les objectifs de qualité proposés par l'INERIS pour les particules fines PM_{2.5}. Ces objectifs ne sont pas encore fixés et validés, ils constituent simplement une proposition pour pouvoir déjà évaluer la qualité de la prévision des PM_{2.5}. Ces valeurs s'appliqueraient aux performances des prévisions en région et sur les bassins d'air aux échéances J0 et J+1. Les prévisions de la qualité élaborées par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes doivent satisfaire ces critères.

Biais (µg.m ⁻³)	RMSE (µg.m ⁻³)	Corrélation
-3 > biais > +3	RMSE < 8	c > 0,7

Tableau 10 : Objectif de qualité proposés pour les particules fines PM_{2.5} s'appliquant aux performances des prévisions en région et sur les bassins d'air aux échéances J0 et J+1.

Les résultats statistiques par zone d'activation de dispositif sont présentés sur les *Figure 28* et *Figure 29* et, pour les échéances J0 et J+1. A l'échelle de la région entière, on voit que seul le modèle CHIMERE brut ne respecte pas tous les objectifs, avec des corrélations trop faibles. Les autres modèles respectent en moyenne tous les objectifs, et ce assez largement. Bassin d'air par bassin d'air, on observe une certaine variabilité : si les objectifs de biais et de RMSE sont toujours respectés, ceux de corrélation ne le sont pas partout. A J0, seul le modèle PREV'AIR_AS est au-dessus du seuil de 0.7 points de corrélation dans tous les bassins d'air. Les modèles adaptés statistiquement d'Atmo AURA ne sont néanmoins pas loin, passant sous les 0.7 dans la Haute-Loire seulement. A J+1, aucun modèle ne respecte ce seuil dans le bassin Est Drôme. Le modèle PREV'AIR Brut atteint cet objectif dans tous les autres bassins. Cependant, en moyenne, on a de meilleures corrélations pour les modèles ADAPSTAT et CARINE, ayant des très bons scores dans de nombreuses régions.

Du côté des RMSE, le constat est le même : elles sont en moyenne meilleures pour les modèles d'Atmo AURA, de manière assez significative, et assez homogènes entre les régions. Le seuil de 8 µg.m⁻³ est toujours respecté, les meilleurs modèles affichant des RMSE environ 2 fois plus basses.

Enfin des biais très faibles sont observables, souvent positifs pour les modèles statistiquement adaptés, et parfois plus forts pour les modèles bruts, en positif pour PREV'AIR brut, en négatif pour CHIMERE brut.



Figure 28 : PM_{2.5} - Scores de RMSE, biais et corrélation par bassin d'air des prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), des prévisions PREV'AIR (orange) et de PREV'AIR assimilé (marron) pour l'échéance J0. La ligne en pointillé orange indique l'objectif de qualité.



Figure 29 : PM_{2.5} - Scores de RMSE, biais et corrélation par bassin d'air des prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), des prévisions PREV'AIR (orange) et de PREV'AIR assimilé (marron) pour l'échéance J0. La ligne en pointillé orange indique l'objectif de qualité.

3.3.1.2. Par typologie

Les *Figure 30* et *Figure 31* illustrent les performances de la chaîne de prévision en fonction de la typologie des stations de mesures. On observe une nouvelle fois de meilleures performances statistiques aux stations rurales, dont la RMSE et le biais sont plus faibles que pour les stations urbaines et périurbaines. A noter que les concentrations sont plus basses dans les stations rurales, les modèles sont donc plus performants. Ce constat est d'autant plus vrai pour les modèles bruts, dont les performances approchent celles des modèles adaptés dans les stations rurales, autant en RMSE qu'en corrélation, tout en étant assez loin dans les stations urbaines et périurbaines. Enfin on peut voir que la dégradation des performances entre l'échéance J0 et J+1 se fait de manière assez homogène entre les différentes stations et modèles.

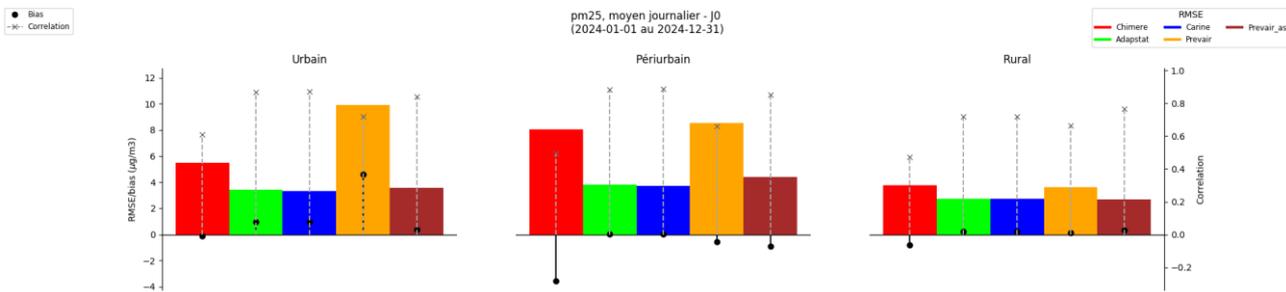


Figure 30 : $PM_{2.5}$ - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction de la typologie de station (urbaines, périurbaines, rurales) des prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), des prévisions PREV'AIR (orange) et de PREV'AIR assimilé (marron) sur l'échéance J0

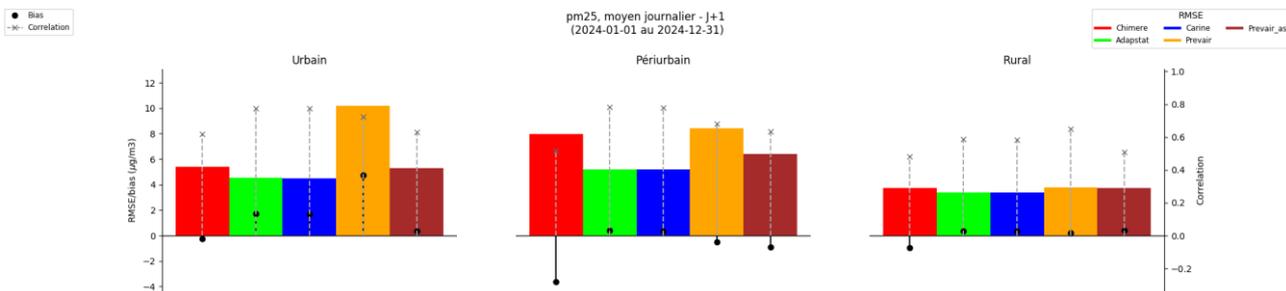


Figure 31 : $PM_{2.5}$ - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction de la typologie de station (urbaines, périurbaines, rurales) des prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), des prévisions PREV'AIR (orange) et de PREV'AIR assimilé (marron) sur l'échéance J+1

3.3.1.3. Par échéance de prévision

La *Figure 32* représente les performances statistiques calculées pour les différentes échéances de prévision (J0, J+1 et J+2) pour l'année 2024. On y voit, comme attendu, une meilleure fiabilité le jour même que pour les échéances futures, peu importe la métrique ou le modèle. Cependant, certains modèles sortent mieux leur épingle du jeu que d'autres : là où les performances de PREV'AIR_AS sont proches de celles d'ADAPSTAT et de CARINE à J0, elles se dégradent plus fortement à J+1 et à J+2, atteignant des performances pires que le modèle CHIMERE brut d'Atmo AURA à J+2. Les biais sont eux assez stables dans le temps.

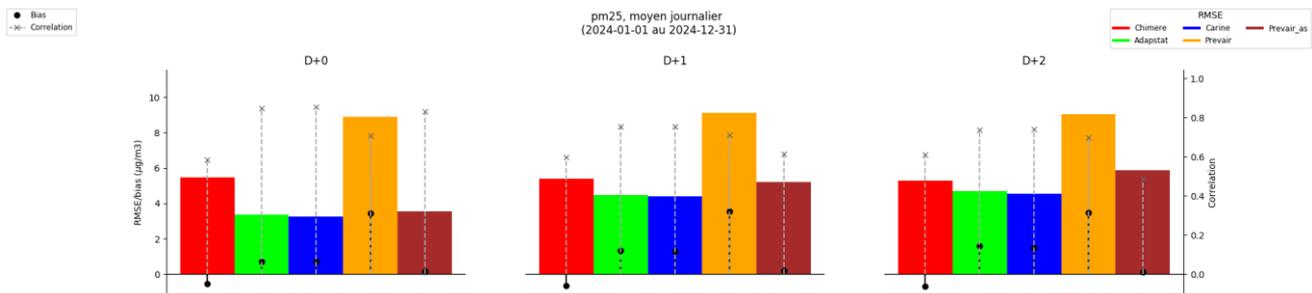
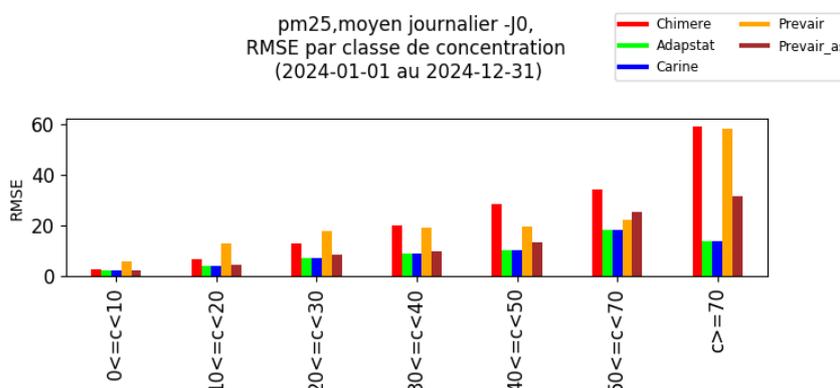


Figure 32 : PM_{2.5} - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction du jour de prévision pour prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), des prévisions PRE'VAIR (orange) et de PRE'VAIR assimilé (marron) en 2024.

3.3.1.4. Par gamme de concentration

Comme précédemment, on groupe les données journalières selon leur classe de concentration (par rapport aux observations). Pour chaque groupe de concentration mesurée, on calcule les scores moyens sur les stations de fond. Les Figure 33 et Figure 34 illustrent l'évolution des scores (RMSE et biais moyen) en fonction des classes de concentrations des particules PM_{2.5}. On y voit la même tendance générale que pour les PM₁₀ : des performances meilleures aux concentrations basses, se dégradant lorsque l'on monte dans les gammes de concentrations. Les RMSE augmentent, passant d'environ 2 µg.m⁻³ à plus de 10 µg.m⁻³ pour les meilleurs modèles, et les biais s'éloignent de 0, dans le négatif pour l'ensemble des modèles, qui sous-estiment tous les niveaux de PM_{2.5}, en particulier pendant les pics de concentrations.

Les performances des modèles ne dérivent toutefois pas toutes de la même manière : 2 modèles démontrent de belles performances même aux plus hautes concentrations : le modèle ADAPSTAT, et sa version expertisée. Ces deux modèles conservent une capacité correcte à prédire les hautes concentrations, là où les modèles bruts sont à la peine, et où PRE'VAIR_AS a des performances plus mitigées. Les modèles d'Atmo AURA affichent la meilleure RMSE et le biais le plus bas à J0, et ce dès que les concentrations sont supérieures à 30 µg.m⁻³. On a le même constat à J+1, excepté pour la gamme de concentrations la plus haute (> 70 µg.m⁻³) où PRE'VAIR_AS affiche des performances légèrement meilleures.



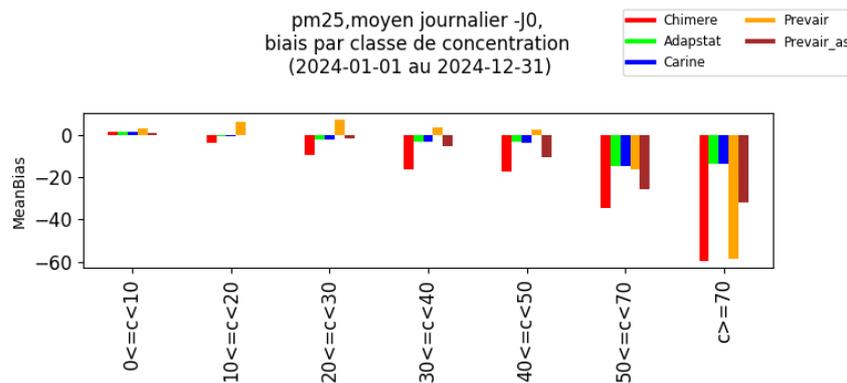


Figure 33 : $PM_{2.5}$ - Scores de RMSE et biais par classe de concentration des prévisions CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), des prévisions PRE'VAIR (orange) et de PRE'VAIR assimilé (marron) sur l'échéance J0.

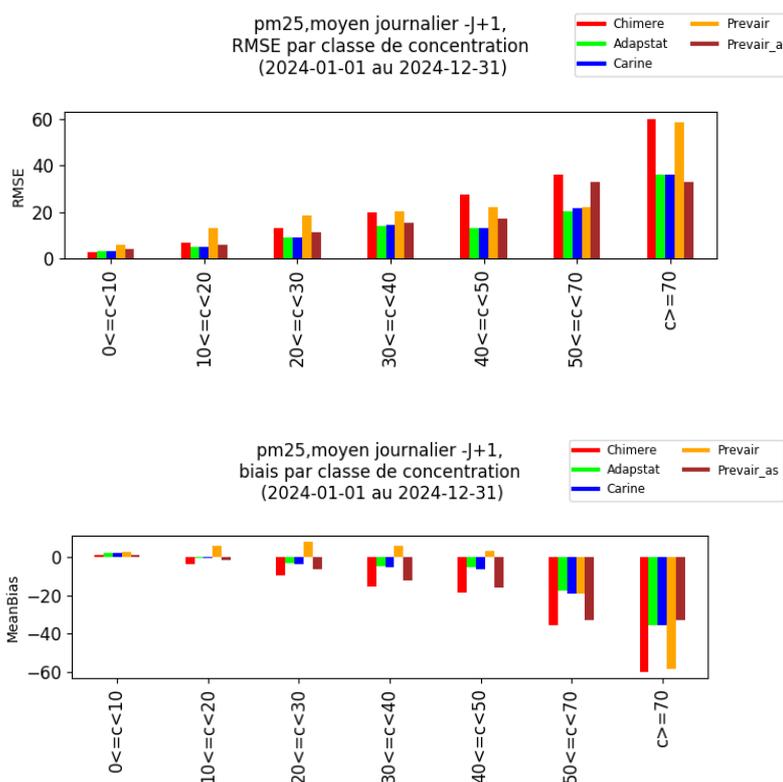


Figure 34 : $PM_{2.5}$ - Scores de RMSE et biais par classe de concentration des CARINE (bleu), CHIMERE (rouge), de l'adaptation statistique (vert), des prévisions PRE'VAIR (orange) et de PRE'VAIR assimilé (marron) sur l'échéance J+1.

3.3.1.5. Sur plusieurs années

Bien que cette année soit la première où les performances des modèles sur la prévision de $PM_{2.5}$ est évaluée, on peut tout de même calculer les performances des années précédentes, et faire la comparaison, pour les modèles disponibles sur cette plage de temps : les années 2021 à 2024.

On observe sur la Figure 35 la même tendance que sur la comparaison interannuelle des PM_{10} , Figure 22 : une augmentation en 2024 des RMSE des modèles, légère mais notable, pour les modèles statistiquement adaptés, assez forte pour les modèles bruts. Si les corrélations restent stables, les biais augmentent aussi légèrement.

Cette année est la première où, sur ces 3 indicateurs, l'expertise des prévisionnistes augmente les performances de la prédiction : le modèle CARINE a de meilleurs scores de RMSE et de corrélation que ADAPSTAT, avec un biais similaire. Tous ces indicateurs étaient plus proches les uns des autres les années précédentes.

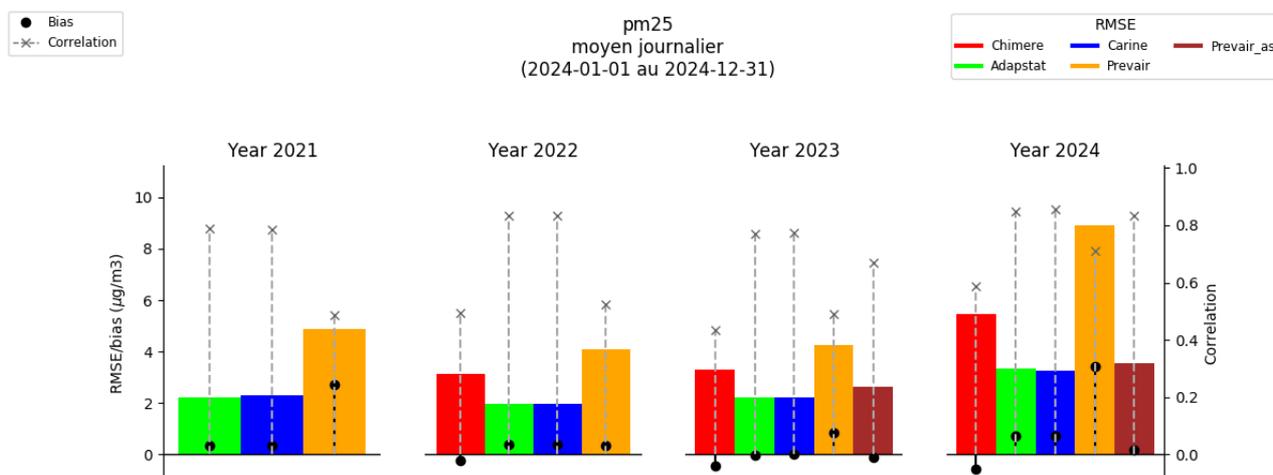


Figure 35 : $PM_{2.5}$ - Synthèse des scores de RMSE (barres colorées), biais moyen (points noirs) et corrélation (pointillés gris) depuis 2018 pour CHIMÈRE, pour son adaptation statistique, pour le modèle CARINE (modèle expertisé), pour le modèle PREVAIR et le modèle PREVAIR assimilé

3.3.2. Performances sur les seuils réglementaires

3.3.2.1. Scores aux stations

Dans cette partie est étudiée la capacité de la chaîne de prévision à reproduire les dépassements du seuil d'information aux stations pour les particules $PM_{2.5}$. Il convient de rappeler que ces dépassements aux stations n'expliquent pas systématiquement les vigilances de pollution activées sur la région en 2024. En effet, l'épisode de pollution se caractérise par le dépassement d'un seuil de recommandation ou d'alerte avec le respect d'autres critères définis dans [l'Arrêté Cadre Zonal du 12 février 2024](#)⁴.

3.3.2.1.1. Séries temporelles

La Figure 36 illustre le nombre de dépassements journaliers du seuil d'information et de recommandation pour les particules $PM_{2.5}$ sur l'année 2024. Elle représente à la fois le nombre de dépassements observés (en gris) et ceux prévus (en couleur), cumulés sur toutes les stations de fond pour chaque journée de la période considérée. En 2024, 353 dépassements ont été observés, toutes stations confondues, très majoritairement en début et fin d'année. Ce graphique montre qu'ADAPSTAT et CARINE ont réussi à détecter et anticiper efficacement l'occurrence des épisodes de pollution, particulièrement en début et en fin d'année. Cependant, quelques dépassements ponctuels n'ont pas été prévus par les différents modèles de prévision.

⁴http://www.prefectures-regions.gouv.fr/auvergne-rhone-alpes/content/download/35211/238621/file/5-7-2018_recueil-84-2018-096-recueil-des-actes-administratifs-special.pdf

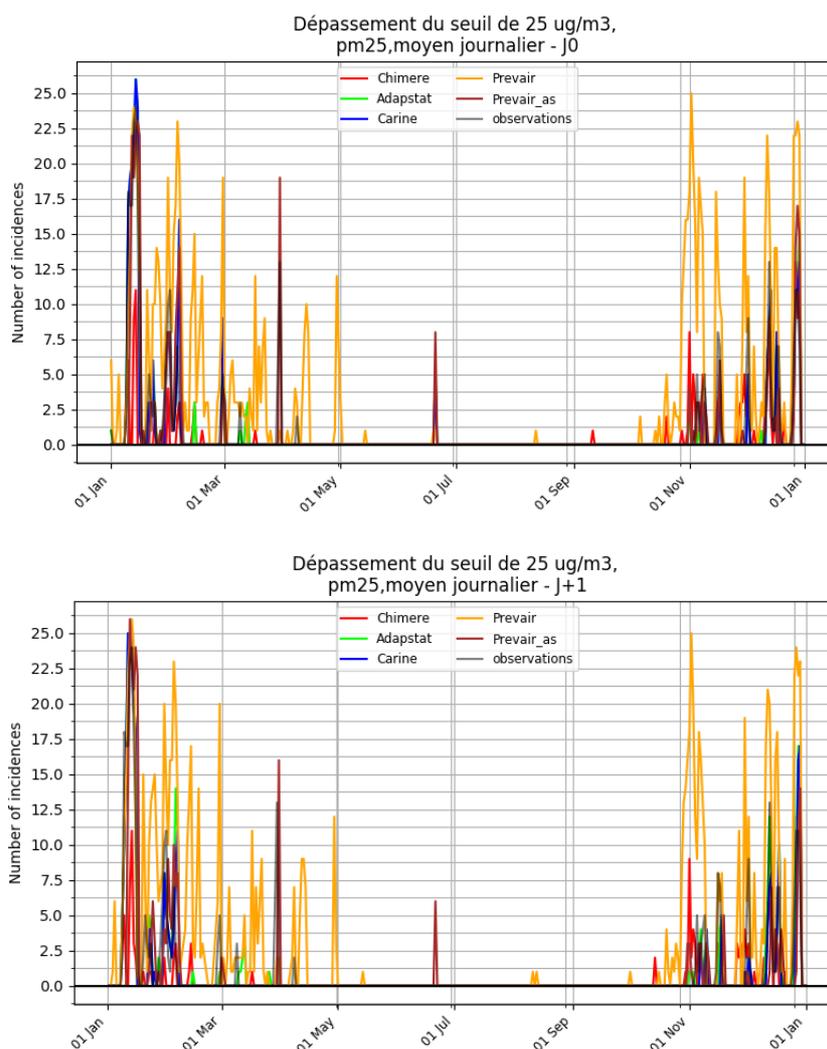


Figure 36 : $PM_{2.5}$ - Superposition des dépassements enregistrés et prévus à J0 (en haut) et à J+1 (en bas) à différentes étapes de la chaîne de prévision : modèle brut (CHIMERE en rouge), modèle adapté statistiquement (ADAPSTAT - en vert) le modèle ajusté par le prévisionniste (CARINE – en bleu), le modèle PREV’AIR (en orange) et le modèle PREV’AIR assimilé (en marron)

3.3.2.1.2. Éléments de la table de contingence

Les Figure 37 et Figure 38 illustrent les valeurs des tables de contingence (bonnes détections, détections manquées et fausses détections) cumulées sur les stations de fond pour la région à gauche et déclinées par bassin d’air disposant d’un arrêté mesure d’urgence. Le graphique du bas de chaque figure affiche la table de contingence pour le modèle de référence (ici CARINE pour ATMO Auvergne-Rhône-Alpes). Sur ces figures, on affiche uniquement les bassins d’air où des mesures ont été réalisées.

On y voit tout d’abord des détections assez imprécises pour les modèles bruts, pour des raisons différentes. Le modèle CHIMERE brut de Atmo AURA manque la plupart des alertes, avec 289 détections manquées à J0, le plus haut nombre de tous les modèles. De son côté, PREV’AIR est trop prompt au déclenchement, avec 933 faux positifs à J0.

Les meilleurs modèles sont ceux adaptés statistiquement, et en particulier ceux de Atmo AURA : on atteint plus de 200 bonnes détections (contre 187 pour PREVAIR_AS à J0), tout en ayant moins de fausses alertes : 94 pour CARINE, 116 pour ADAPSTAT, contre 134 pour PREVAIR_AS. Le constat est le même à J+1 : **les modèles d’Atmo AURA détectent mieux les vrais cas de dépassement, sans pour autant avoir plus de faux positifs.**

Enfin, entre le modèle ADAPSTAT et sa version expertisée, les écarts sont faibles et la version expertisée permet essentiellement de réduire les faux positifs : on en observe 22 de moins à J0, 35 de moins à J+1. Cette intervention, même si elle n'est pas parfaite, permet quand même d'améliorer le comportement du modèle pour les PM_{2.5}.

Table de contingence pour 25 ug/m3, pm25, moyen journalier - J0
(2024-01-01 to 2024-12-31)

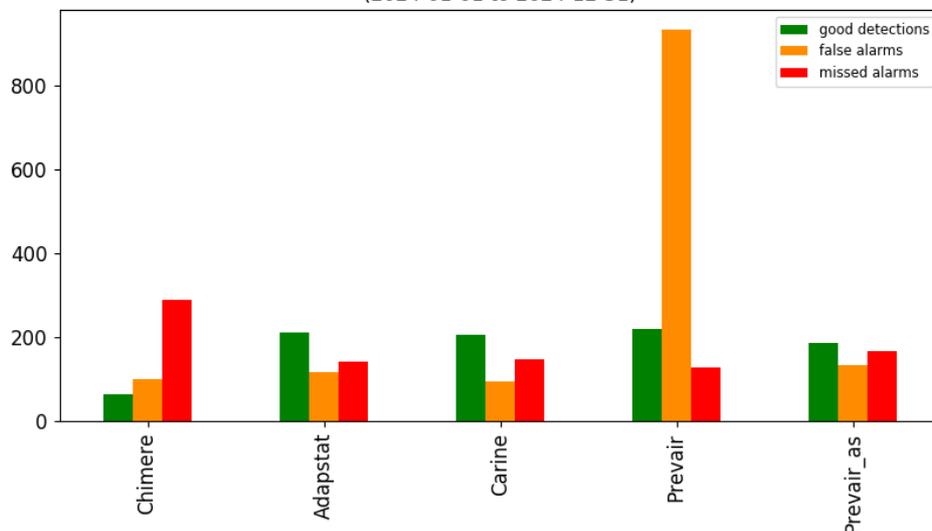


Table de contingence du modèle Carine pour 25 ug/m3,
pm25, moyen journalier - J0
(2024-01-01 to 2024-12-31)

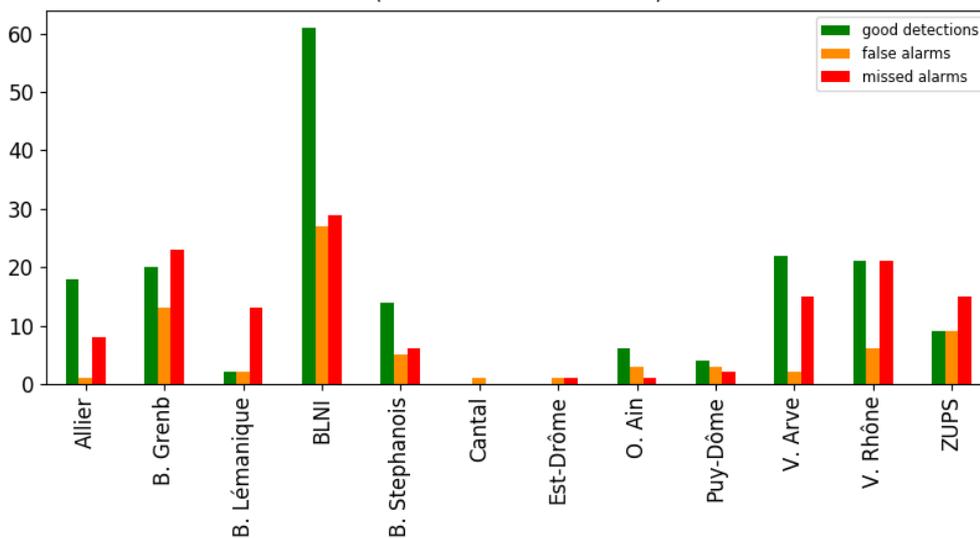


Figure 37 : PM_{2.5} - Tables de contingence pour l'année 2024 à l'échéance J0 pour le seuil de 25 µg.m⁻³. En haut : Tables de contingence de CHIMERE (1er groupe), ADAPSTAT (2e groupe), de CARINE (3e groupe), de PREV'AIR (4e groupe) et de PREVAIR assimilé (5e groupe) pour la région Auvergne-Rhône-Alpes entière. En bas : Table de contingence de l'adaptation statistique déclinée par bassin d'air.

Table de contingence pour 25 ug/m3, pm25, moyen journalier - J+1
(2024-01-01 to 2024-12-31)

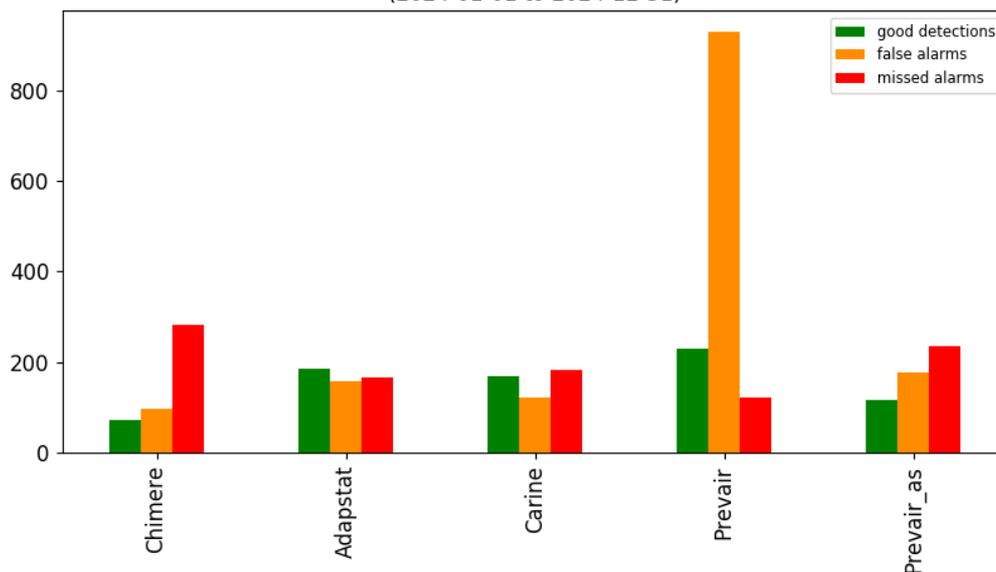


Table de contingence du modèle Carine pour 25 ug/m3,
pm25, moyen journalier - J+1
(2024-01-01 to 2024-12-31)

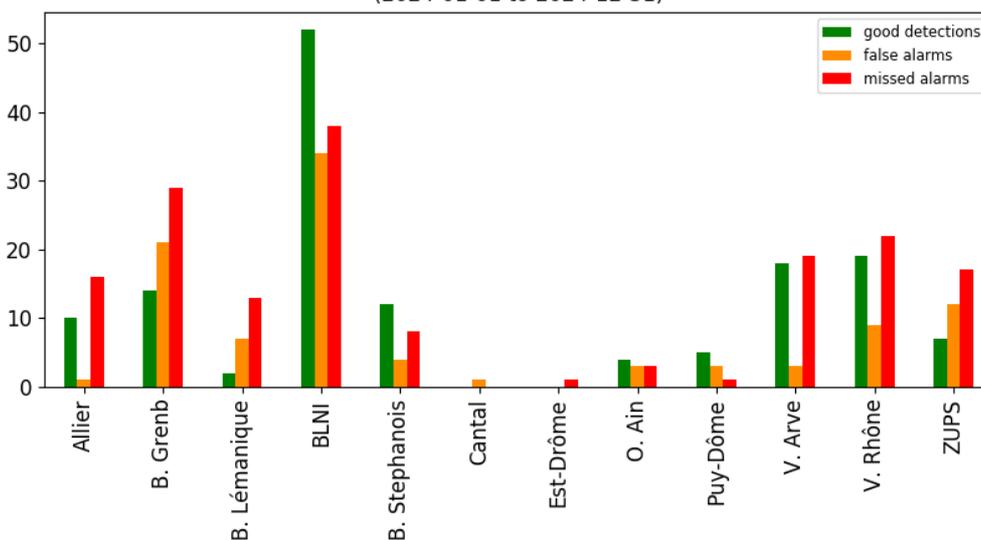


Figure 38 : PM_{2,5} - Tables de contingence calculée sur l'année 2024 à l'échéance J+1 pour le seuil de 25 µg.m⁻³. En haut : Tables de contingence de CHIMERE (1er groupe), ADAPSTAT (2e groupe), de CARINE (3e groupe), de PREV'AIR (4e groupe) et de PREVAIR assimilé (5e groupe) pour la région Auvergne-Rhône-Alpes entière. En bas : Table de contingence de l'adaptation statistique déclinée par bassin d'air.

La Figure 39 représente une vue complète des performances des prévisions par rapport à la détection des seuils réglementaires (l'objectif est de se situer au plus proche du coin supérieur droit) :

- Axe horizontal : capacité du modèle à faire de bonnes prévisions parmi les détections
- Axe vertical : capacité du modèle à prévoir des dépassements
- Axe transverse : proportion de fausses détections par rapport aux détections manquées
- Axe couleur : capacité du modèle à faire de bonnes prévisions sans évènements parasites (fausses détections, détections manquées).

Cette figure permet de confirmer ce que l'on observait ci-dessus sur les tables de contingences : la performance est la meilleure avec les modèles ADAPSTAT et CARINE, les deux étant très proches entre eux. Arrive ensuite le modèle PREVAIR_AS, qui, autant à J0 qu'à J+1, montre un taux de succès et une probabilité de détection plus faibles que les modèles d'Atmo AURA. Les modèles bruts, eux, sont bien loin en termes de performance sur ces indicateurs également. Nos modèles adaptés

statistiquement sont plus qualifiés pour la détection d'incidents à J+1 pour les PM_{2.5} que pour les PM₁₀, avec des métriques autour des 50%, là où elles étaient sous les 30% pour les PM₁₀.

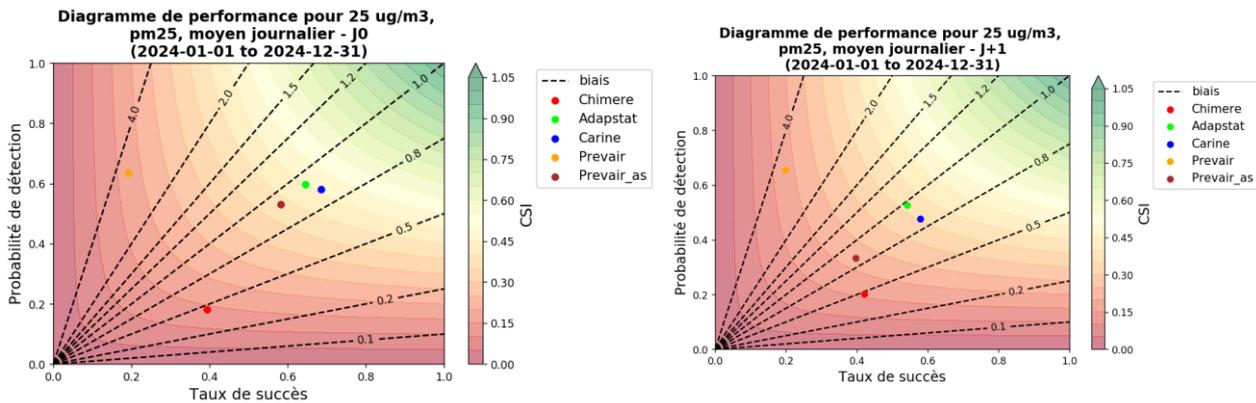


Figure 39 : PM_{2.5} - Diagramme de performance pour CHIMERE (rouge), ADAPSTAT (vert), CARINE (bleu), PREV'AIR (orange) et PREV'AIR assimilé (marron) en 2024 pour l'échéance J0 (à gauche) et celle de J+1 (à droite)

3.3.2.2. Scores en lien avec les critères réglementaires de déclenchement d'un épisode de pollution

Le précédent paragraphe étudie la capacité de la chaîne de prévision à reproduire les dépassements du seuil d'information aux stations. Dans ce paragraphe, l'étude porte uniquement sur les journées d'épisodes de pollution, au sens de [l'Arrêté Cadre Zonal du 12 février 2024](#). En effet, l'activation d'une vigilance de pollution n'est pas déterminée par des dépassements ponctuels des valeurs du seuil dans une station de mesure mais elle se caractérise par d'autres critères définis dans l'arrêté cité précédemment.

Dans ce paragraphe, l'évaluation de performance de notre système de prévision consiste à calculer les occurrences de dépassements au sens des critères d'activation d'une vigilance pollution. Chaque jour de l'année correspond exclusivement à un des événements suivants :

1. Pas de dépassement prévu, pas de dépassement constaté.
2. Dépassement prévu et constaté – Bonne détection.
3. Dépassement prévu et non confirmé a posteriori – Fausse alerte.
4. Dépassement avéré mais non prévu – Alerte manquée.

L'évaluation des performances de prévision des épisodes de pollution consiste à calculer uniquement les occurrences des éléments type (2,3 et 4) pour chaque bassin d'air.

La *Figure 40* présente les tables de contingence construites pour évaluer la qualité des prévisions des dépassements des critères AMU. Contrairement aux évaluations précédentes centrées sur les dépassements à l'échelle d'une station, il est question ci-dessous des dépassements des critères AMU à l'échelle d'un bassin d'air en croisement avec les critères surfaciques et de populations. Les prévisions réalisées à J0 sont confrontées à l'analyse effectuée a posteriori à l'échéance J-1 du jour suivant pour le modèle CARINE.

En concentrant l'analyse sur les critères AMU, on remarque les bonnes performances globales de la prévision des PM_{2.5}, particulièrement à J0. **Dans la grande majorité des bassins d'air, la plupart des dépassements de seuil sont prévus correctement. Cette capacité de détection reste relativement bonne à J+1.**

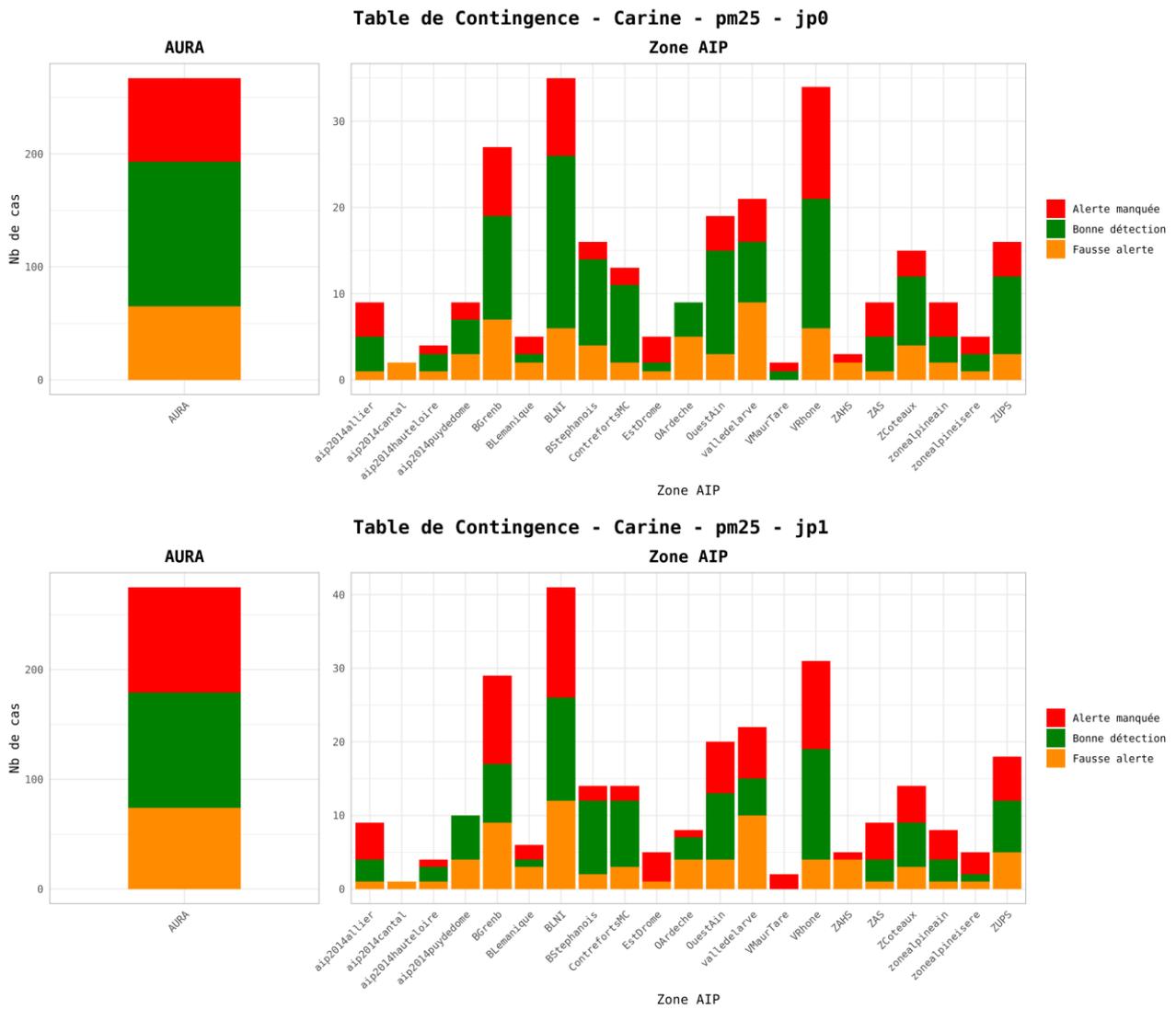


Figure 40 : PM2.5 - Table de contingence des critères AMU (critères surfaciques et de population confondus) sur toute l'année 2024 aux échéances J+0 (haut) et J+1 (bas) pour le modèle CARINE.

4. Conclusion

Les performances du système de prévision de la qualité de l'air d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes ont été étudiées à différentes étapes : résultats fournis par le modèle brut, résultats adaptés statistiquement et résultats expertisés par les prévisionnistes. Les performances des modèles fournis par la plateforme PREV'AIR ont été inclus dans la comparaison. **Pour la première fois cette année, les performances ont été évaluées non seulement sur l'Ozone et les PM₁₀, mais également sur les PM_{2.5}.** L'importance de ce polluant va se renforcer dans les prochaines années, sous l'influence des exigences réglementaires de la nouvelle directive européenne sur la surveillance de la qualité de l'air. Ce rapport tend à démontrer que sa prévision par les modèles de la région est déjà performante et capable d'anticiper un bon nombre des épisodes de pollution de l'année.

L'année 2024 fut **une année relativement épargnée par les épisodes de pollution en région Auvergne-Rhône-Alpes**. Un seul dépassement lié aux niveaux d'ozone, et au total 130 dépassements cumulés pour les PM₁₀ (répartis sur 28 jours) ont été observés. Ces faibles niveaux ont entraîné une légère baisse des performances des modèles, en particulier pour les particules fines. Que ce soient les modèles bruts ou adaptés statistiquement, de Prév'air ou de notre région, une légère hausse des erreurs est observable par rapport à l'année dernière, expliquée par cette relative baisse des niveaux globaux, qui rendent les pics plus rares, courts, et durs à prédire de manière fiable.

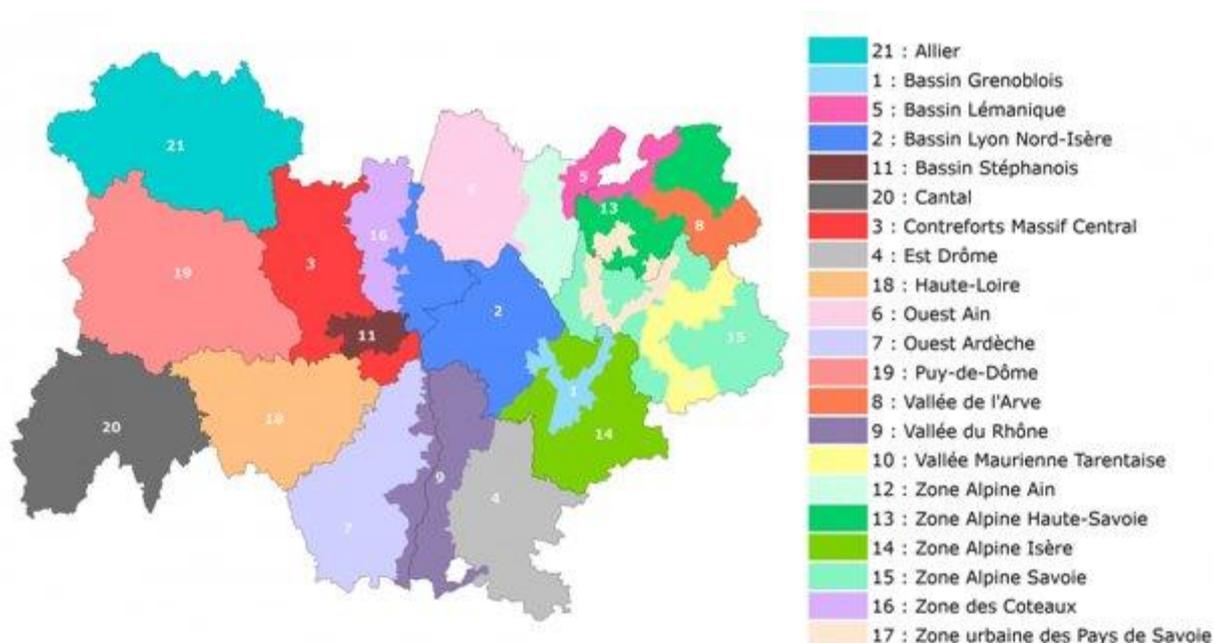
Néanmoins, les modèles d'Atmo AURA ont globalement été plus performants que les autres modèles considérés, au vu des critères décrits dans le RTN, pour la prévision de ces dépassements, quel que soit le polluant ou l'échéance. Cette performance, qu'on observe sur les critères d'erreurs bruts des modèles, est particulièrement présente sur les indicateurs les plus critiques pour les prévisionnistes : les tables de contingence indiquant le nombre de dépassements bien anticipés, par rapport aux alertes manquées.

Si les modèles de chimie-transport bruts n'ont pas de performances très élevées, **la correction statistique appliquée aux sorties de ces modèles a pour effet d'améliorer considérablement les prévisions**. On observe ceci aussi bien pour les modèles de Prév'air que ceux développés par les modélisateurs d'Atmo Aura. L'addition en fin de chaîne **d'une expertise humaine, par les prévisionnistes, vient encore améliorer ces performances**, et permet une meilleure gestion des épisodes de pollution, réduisant les impacts sanitaires de ces épisodes en concentrant les adaptations possibles aux moments où elles sont les plus nécessaires.

Si les épisodes de pollution ont tendance à se raréfier, ils n'en deviennent pas pour autant plus faciles à prédire. Les tendances changent par rapport aux situations connues des modèles et des prévisionnistes. On a par exemple des saisons d'ozone plus longues, mais avec des niveaux plus faibles : la vigilance sur ce point est nécessaire sur une plus longue période, et de faibles variations des modèles peuvent entraîner de nombreuses erreurs. C'est pourquoi les modèles utilisés chez Atmo Auvergne-Rhône-Alpes ont pour vocation de continuer à être améliorés, afin de pouvoir anticiper ces situations, et de continuer à bien effectuer la surveillance de la qualité de l'air à l'avenir.

Annexe 1

La région est découpée en 21 zones, les critères AMU sont vérifiés quotidiennement dans chaque zone.



L'activation d'une vigilance de pollution n'est pas déterminée par des dépassements ponctuels des valeurs du seuil par une station de mesure mais elle se caractérise par d'autres critères définis dans l'arrêté cité précédemment. L'activation d'une vigilance de pollution dans un bassin d'air doit satisfaire d'au moins un de deux critères suivants :

- Critère de déclenchement associé à la superficie : au moins 25 km² du même bassin d'air sont concernés par un dépassement du seuil d'information et de recommandations ou/et du seuil d'alerte.
- Critère de déclenchement associé à la population :
 - Dans les bassins d'air de plus de 500 000 habitants (dans les zones Puy-de-Dôme, bassin grenoblois, bassin lyonnais nord-Isère et vallée du Rhône) : lorsqu'au moins 10% de la population du bassin d'air est concernée par un dépassement de seuils.
 - Dans les bassins d'air de moins de 500 000 habitants : lorsqu'au moins une population de 50 000 habitants au total est concernée par un dépassement de seuils.

Annexe 2

Les scores utilisés dans ce rapport sont définis de la façon suivante (*extrait du Référentiel Technique National*) :

Taux de disponibilité des données fixé à 75%. Cela signifie qu'il faut que sur la période d'évaluation, 75% des couples journaliers (ou horaires) mesures-concentrations prévues soient disponibles pour qu'une station soit prise en compte dans le calcul des scores. L'ensemble des scores est calculé aux stations puis fait l'objet d'une moyenne selon les critères de la représentation (par zones géographiques, par typologies, par année, ...)

- **Biais :** Estimateur des écarts entre prévisions et observations :

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)$$

Où N est le nombre de stations de mesure, P_i la valeur de prévision à la station i et O_i la valeur observée à la station. Si le biais est établi pour le maximum journalier, alors le maximum journalier des 2 valeurs doit être pris, s'il s'agit d'un biais pour la moyenne journalière, alors la moyenne journalière des 2 valeurs doit être prise. Valeurs exprimées en $\mu\text{g.m}^{-3}$

- **RMSE :** Root Mean Squared Error (RMSE) donne une information sur la capacité du modèle à reproduire les niveaux de concentrations observés. Elle doit être la plus faible possible.

$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}$$

Où N est le nombre de stations, P_i correspond à la prévision à la station i et O_i l'observation à la station i . Valeurs exprimées en $\mu\text{g.m}^{-3}$.

- **Corrélation :** Corrélation r informe sur la cohérence des variabilités temporelle ou spatiale des concentrations observées et prévues. Plus celle-ci est proche de 1 plus la prévision est en mesure de reproduire les bonnes variations des concentrations observées.

$$r = \frac{\text{cov}(P, O)}{\sqrt{\text{var}(P)}\sqrt{\text{var}(O)}} = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}}$$

Où N est le nombre de stations, P_i correspond à la prévision à la station i et O_i l'observation à la station i . Valeurs sans dimension. (cov correspond à la covariance et var à la variance).