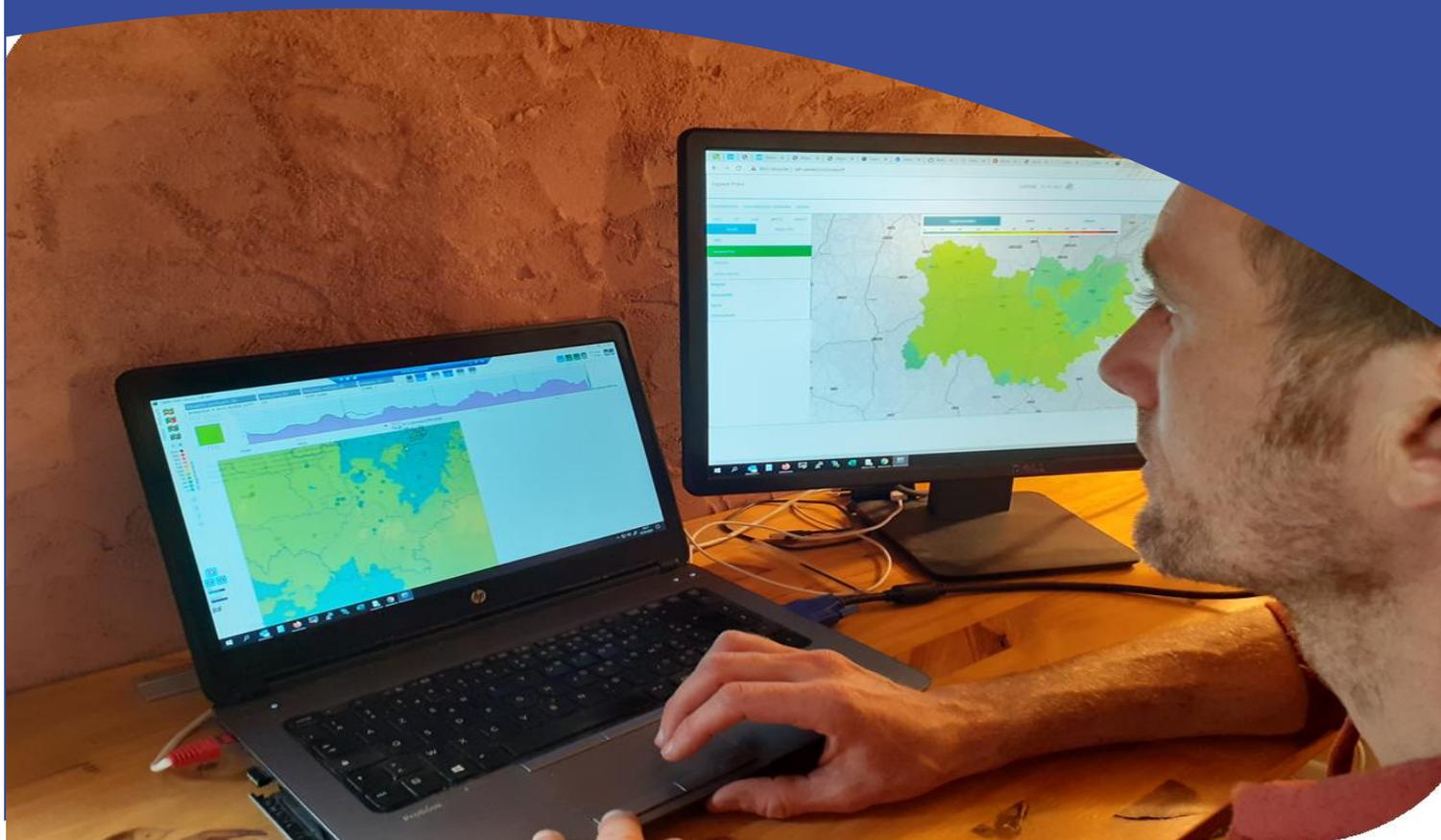


Evaluation des performances du système régional de prévision de la qualité de l'air

Bilan statistique global de l'année 2022



Auteur : Unité Prévision

Diffusion : Juin 2023

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 (2023) Evaluation des performances du système régional de prévision de la qualité de l'air.

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

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

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

- 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 l'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.

Pour les PM₁₀ comme pour l'ozone, les indicateurs statistiques calculés sur l'année 2022 sont conformes aux préconisations et témoignent ainsi des bonnes performances des prévisions expertisées issues de la chaîne de modélisation. Ce constat est valable pour l'échéance J0 comme pour l'échéance J+1, la première présentant naturellement de meilleurs résultats.

L'analyse effectuée montre que les résultats issus du modèle brut ont tendance à sous-estimer les concentrations en particules fines tandis que les résultats adaptés et expertisés tendent à les surestimer. Concernant l'ozone, les sorties des modèles adaptés statistiquement et expertisés présentent également des concentrations plus élevées que le modèle brut et restent ainsi globalement légèrement surestimées.

Les performances des résultats adaptés statistiquement et expertisés par les prévisionnistes sont globalement similaires. Cependant, en 2022, l'expertise humaine a apporté une amélioration dans les statistiques de prévision des dépassements de seuils pour l'O₃ (épisodes de pollution) pour J0 et J+1. Ce résultat est également observé dans une moindre mesure pour les PM₁₀. L'augmentation du nombre de bonnes détections se fait toutefois au prix d'un nombre relativement élevé de fausses alertes.

En 2023, plusieurs travaux visant à améliorer la chaîne de prévision sont menés. Ils portent notamment sur le modèle lui-même (nouvelle version de CHIMERE), les données de bord (conditions aux limites de notre région) et les données d'émissions.



Sommaire

1. Introduction	8
2. Présentation de la plateforme de prévision	9
2.1. Description des modèles	9
2.2. Description des mesures	10
3. Evaluation de la plateforme de prévision régionale de la qualité de l'air	12
3.1. Prévision ozone (O₃)	13
3.1.1. Scores classiques (biais, RMSE et corrélation)	13
3.1.1.1. Par rapport aux objectifs de qualité	13
3.1.1.2. Par typologie	16
3.1.1.3. Par échéance de prévision	17
3.1.1.4. Par gamme de concentration	17
3.1.1.5. Sur plusieurs années	19
3.1.2. Performances sur les seuils réglementaires	19
3.1.2.1. Scores aux stations	20
3.1.2.1.1. Séries temporelles	20
3.1.2.1.2. Eléments de la table de contingence	22
3.1.2.2. Scores en lien avec les critères réglementaires de déclenchement d'épisode de pollution	24
3.2. Prévision particules fines (PM₁₀)	27
3.2.1. Scores classiques (Biais, RMSE, Corrélation)	27
3.2.1.1. Par rapport aux objectifs de qualité	27
3.2.1.2. Par typologie	30
3.2.1.3. Par échéance de prévision	31
3.2.1.4. Par gamme de concentration	31
3.2.1.5. Sur plusieurs années	33
3.2.2. Performances sur les seuils réglementaires	33
3.2.2.1. Scores aux stations	33
3.2.2.1.1. Séries temporelles	33
3.2.2.1.2. Eléments de la table de contingence	34
3.2.2.2. Scores en lien avec les critères réglementaires de déclenchement d'un épisode de pollution	37
4. Conclusion	39



Table des figures

<i>Figure 1 : Chaîne de prévision régionale d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes</i>	10
<i>Figure 2 : Accès aux données de mesure sur le site web d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes</i>	10
<i>Figure 3 : Ozone - Scores de RMSE, biais et corrélation par zone AIP des prévisions Carine (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique (vert) d'avril à septembre 2022 sur l'échéance J0. La ligne en pointillé orange indique l'objectif de qualité.</i>	14
<i>Figure 4: Ozone - Scores de RMSE, biais et corrélation par zone AIP des prévisions Carine (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique (vert) d'avril à septembre 2022 sur l'échéance J+1. La ligne en pointillé orange indique l'objectif de qualité.</i>	15
<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), et de l'adaptation statistique (vert) d'avril à septembre 2022 sur l'échéance J0.</i>	16
<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), et de l'adaptation statistique (vert) d'avril à septembre 2022 sur l'échéance J+1.</i>	16
<i>Figure 7 : Ozone - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction du jour de prévision pour Carine (bleu), CHIMERE (rouge), et pour l'adaptation statistique (vert) d'avril à septembre 2022</i>	17
<i>Figure 8 : Ozone - Scores de RMSE et biais par classe de concentrations des prévisions Carine (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique (vert) d'avril à septembre 2022 sur l'échéance J0. ..</i>	18
<i>Figure 9 : Ozone - Scores de RMSE et biais par classe de concentration des prévisions Carine (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique (vert) d'avril à septembre 2022 sur l'échéance J+1.</i>	18
<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 et pour le modèle Carine (modèle expertisé)</i>	19
<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 (Chimère en rouge), modèle adapté statistiquement (Adapstat - en vert) et modèle ajusté par le prévisionniste (Carine – en bleu).</i>	21
<i>Figure 12 : Ozone - Tables de contingence sur la période d'avril à septembre 2022 à l'échéance J0 pour le seuil de 180 µg/m³. Les bonnes détections sont en bleu, les fausses détections en orange, et les détections manquées en vert. Gauche : Tables de contingence de CHIMERE (groupe de gauche), ADAPSTAT (groupe du milieu), et de Carine (groupe de droite) pour la région Auvergne-Rhône-Alpes entière. Droite : Table de contingence de l'adaptation statistique déclinée par zones AIP.</i>	22
<i>Figure 13 : Ozone - Tables de contingence sur la période d'avril à septembre 2022 à l'échéance J+1 pour le seuil de 180 µg/m³. Les bonnes détections sont en bleu, les fausses détections en orange, et les détections manquées en vert. Gauche : Tables de contingence de CHIMERE (groupe de gauche), ADAPSTAT (groupe du milieu), et de Carine (groupe de droite) pour la région Auvergne-Rhône-Alpes entière. Droite : Table de contingence de l'adaptation statistique déclinée par zone AIP.</i>	23
<i>Figure 14 : Ozone - Diagramme de performance pour Chimère (rouge), Adapstat (vert) et Carine (bleu) d'avril à septembre 2022 pour l'échéance J0 (à gauche) et celle de J+1 (à droite)</i>	24
<i>Figure 15 : Ozone - Table de contingence des critères AMU (critères surfaciques et de population confondus) sur la période d'avril à septembre 2022 à l'échéance J0.</i>	25
<i>Figure 16 : Ozone - Table de contingence des critères AMU (critères surfaciques et de population confondus) sur la période d'avril à septembre 2022 à l'échéance J+1.</i>	26

<i>Figure 17 : PM₁₀ - Scores de RMSE, biais et corrélation par zone AIP des prévisions Carine (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique (vert) pour l'échéance J0. La ligne en pointillé orange indique l'objectif de qualité.</i>	28
<i>Figure 18 : PM₁₀ - Scores de RMSE, biais et corrélation par zone AIP des prévisions Carine (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique (vert) pour l'échéance J+1. La ligne en pointillé orange indique l'objectif de qualité</i>	29
<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), et de l'adaptation statistique (vert) sur l'échéance J0</i>	30
<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), et de l'adaptation statistique (vert) sur l'échéance J0</i>	30
<i>Figure 21 : PM₁₀ - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction du jour de prévision pour Carine (bleu), CHIMERE (rouge), et pour l'adaptation statistique (vert) en 2022.</i>	31
<i>Figure 22 : PM₁₀ - Scores de RMSE et biais par classe de concentration des prévisions Carine (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique (vert) sur l'échéance J0.</i>	32
<i>Figure 23 : PM₁₀ - Scores de RMSE et biais par classe de concentration des prévisions Carine (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique (vert) sur l'échéance J+1.</i>	32
<i>Figure 24 : PM₁₀ - Synthèse des scores de RMSE (barres colorées), biais moyen (points noirs) et corrélation (pointillés gris) depuis 2018 pour CHIMERE, pour son adaptation statistique et pour le modèle Carine (modèle expertisé)</i>	33
<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 (Chimère en rouge), modèle adapté statistiquement (Adapstat - en vert) et le modèle ajusté par le prévisionniste (Carine – en bleu)</i>	34
<i>Figure 26 : PM₁₀ - Tables de contingence pour l'année 2022 à l'échéance J0 pour le seuil de 50 µg/m³. En haut : Tables de contingence de CHIMERE (groupe de gauche), ADAPSTAT (groupe du milieu), et de Carine (groupe de droite) pour la région Auvergne-Rhône-Alpes entière. En bas : Table de contingence de l'adaptation statistique déclinée par zone AIP.</i>	35
<i>Figure 27 : PM₁₀ - Tables de contingence calculée sur l'année 2022 à l'échéance J+1 pour le seuil de 50 µg/m³. En haut : Tables de contingence de CHIMERE (groupe de gauche), ADAPSTAT (groupe du milieu), et de Carine (groupe de droite) pour la région Auvergne-Rhône-Alpes entière. En bas : Table de contingence de l'adaptation statistique déclinée par zone AIP.</i>	36
<i>Figure 28 : PM₁₀ - Diagramme de performance pour Chimère (rouge), Adapstat (vert) et Carine (bleu) en 2022 pour l'échéance J0 (à gauche) et celle de J+1 (à droite)</i>	37
<i>Figure 29 : PM₁₀ - Table de contingence des critères AMU (critères surfaciques et de population confondus) sur toute l'année 2020 à l'échéance J0.</i>	38
<i>Figure 30 : PM₁₀ - Table de contingence des critères AMU (critères surfaciques et de population confondus) sur toute l'année 2020 à l'échéance J+1.</i>	38

Liste des tableaux

Tableau 1 : Détail du nombre de stations “de fond” par typologie pour l’O₃ et les PM₁₀	11
Tableau 2 : Objectifs de qualité définis pour l’O₃ s’appliquant aux performances des prévisions en région et sur les zones AIP aux échéances J0 et J+1	13
Tableau 3 : Table de contingence.....	20
Tableau 4 : Valeurs des seuils utilisées pour le calcul des critères statistiques	20
Tableau 5 : Objectif de qualité définis pour les particules fines PM₁₀ s’appliquant aux performances des prévisions en région et sur les zones AIP aux échéances J0 et J+1.....	27

1. Introduction

Le système de prévision de qualité de l'air d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes a pour objectif de mettre à disposition quotidiennement des cartes de concentrations pour les polluants réglementés O₃, NO₂ et PM₁₀ pour le jour même, le lendemain et le surlendemain (J+2). 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, industries, secteurs agricole et domestique...). 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, plusieurs enjeux environnementaux, financiers et économiques, politiques et sanitaires sont associés explicitement à la prévision quotidienne de la qualité de l'air.

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 cadre, 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 contexte et à partir 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 dans la partie 2, ce rapport rend compte des résultats de cette évaluation pour l'année 2022 (partie 3).

2. Présentation de la plateforme de prévision

2.1. Description des modèles

La chaîne de prévision opérationnelle est un enchaînement de modèles imbriqués permettant d'obtenir des cartes de champs de concentrations à des échelles temporelles et spatiales définies sur un domaine d'étude régional. Ce dernier englobe l'ensemble de la région Auvergne-Rhône-Alpes avec une emprise spatiale de 447x342km² et une résolution horizontale de 1x1 km². La Figure 1 illustre le synoptique général de la chaîne de modélisation d'Atmo AURA, dont les étapes sont :

- a) Le calcul de l'évolution des champs météorologiques régionaux, qui utilise le modèle numérique WRF (National Center for Atmospheric Research). Les principales données d'entrée de ce modèle sont les prévisions à l'échelle globale (GFS), 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.
- b) La préparation du reste des données d'entrée nécessaires pour le modèle de dispersion utilisé par notre chaîne de modélisation. Ces données sont : les émissions de polluants, les conditions aux limites et les conditions initiales. Les émissions, à savoir la répartition maillée des flux de polluants de tous les secteurs d'activité, sont calculées avec un module développé en interne. En dehors de la région Auvergne-Rhône-Alpes, les émissions anthropogéniques sont issues des données EMEP pour l'année de référence 2015.
- c) La dispersion et les transformations chimiques des polluants sont réalisées 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.
- d) Le raffinement de la résolution spatiale via un module de descente d'échelle de 3km à 1km, fondé sur la méthode basique d'interpolation bilinéaire.
- e) 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 la prochaine étape pour corriger les cartes de la prévision brute (résultats non corrigés issus directement du modèle déterministe CHIMERE).
- f) Le couplage des concentrations calculées aux stations et de la carte de prévision brute par une correction géostatistique (dite le Krigeage).

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

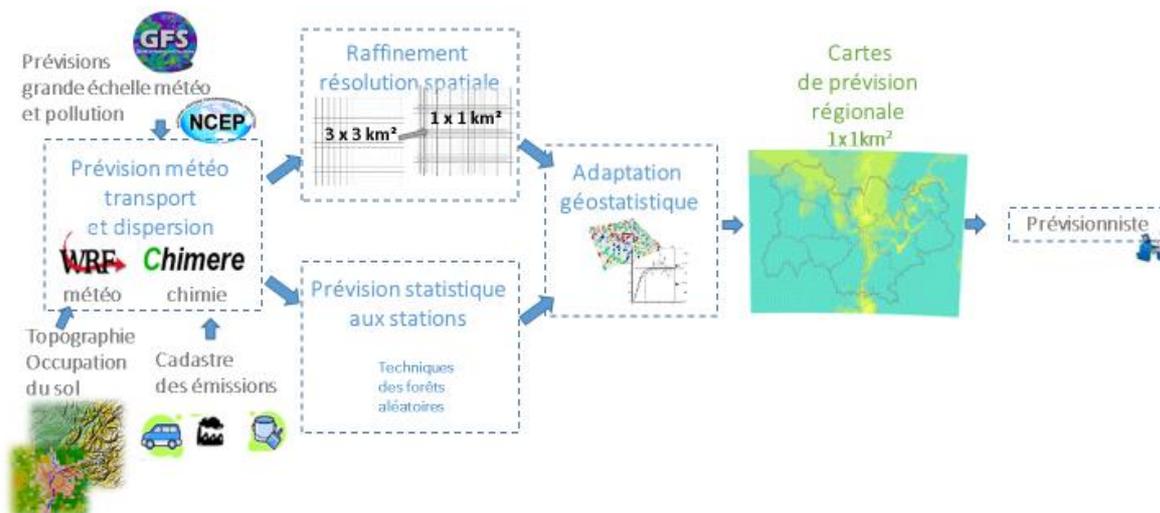


Figure 1 : Chaîne de prévision régionale d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes

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 grande 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 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 90 points. 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 spatiale des stations et leurs mesures sont accessibles sur le [site internet](#) (Figure 2 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

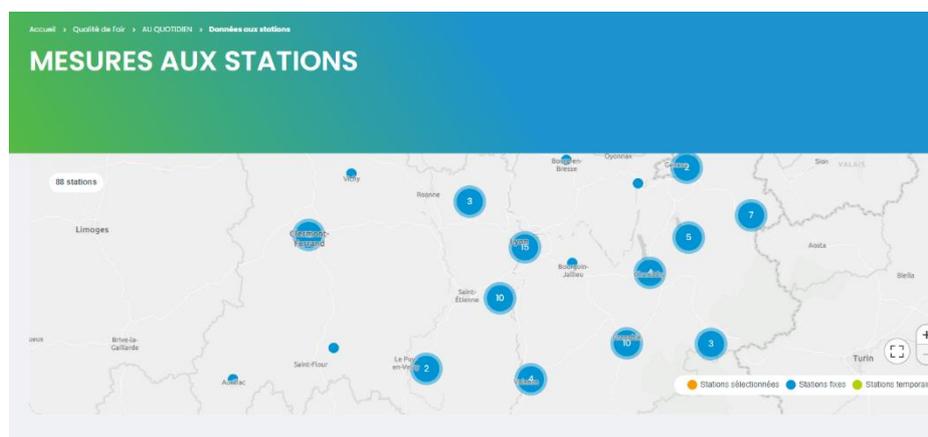


Figure 2 : Accès aux données de mesure sur le site web d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes

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 2022, les mesures utilisées dans cette évaluation sont réparties comme suit :

	Urbaines	Périurbaines	Rurales
PM10	32	14	8
O3	30	14	9

Tableau 1 : Détail du nombre de stations "de fond" par typologie pour l'O₃ et les PM₁₀

3. Evaluation de la plateforme de prévision régionale de la qualité de l'air

La performance du système de prévision est évaluée en comparant les concentrations prédites C_p de PM_{10} et d'ozone (O_3) aux concentrations mesurées (observées) C_m . La performance du système n'est pas évaluée pour le dioxyde de soufre (SO_2) et le dioxyde d'azote (NO_2), 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 dans un outil cartographique développé en interne par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, dénommé Carine. Ils 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 les documents qualités. Un travail a été engagé en interne pour harmoniser cette pratique de correction en fixant les critères et les règles d'ajustement des cartes.

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, selon les bassins d'air utilisés pour la gestion des épisodes de pollution, nommés "zones AIP" dans ce document (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 1.

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

Les statistiques sont estimées à partir de la moyenne journalière pour les particules PM₁₀ 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).

3.1. Prévion 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 prévion 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 2 : Objectifs de qualité définis pour l’O₃ s’appliquant aux performances des prévisions en région et sur les zones AIP aux échéances J0 et J+1.

illustre les objectifs de qualité définis pour l’ozone. Ces valeurs doivent s’appliquer aux performances des prévisions en région et sur les zones AIP aux échéances J0 et J+1.

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

Tableau 2 : Objectifs de qualité définis pour l’O₃ s’appliquant aux performances des prévisions en région et sur les zones AIP aux échéances J0 et J+1.

Dans ce paragraphe, on s’intéresse à la performance de la chaine de prévion par bassin d’air (au sens des dispositifs de gestion des épisodes de pollution). La Figure 3 (respectivement Figure 4) présente les performances statistiques (RMSE, biais et corrélation) calculées pour l’échéance J0 (respectivement J+1). **Les objectifs qualité pour chaque indicateur sont largement respectés par le modèle expertisé (Outil Carine, en bleu) à l’échéance J0.** Les corrélations minimales et maximales observées valent respectivement 0.75 et 0.86 pour les résultats expertisés à J0, tandis que les RMSE se situent entre 11.3 et 15.9 µg.m⁻³. **Les performances des prévisions expertisées se dégradent très légèrement à J+1 mais restent au-dessus des exigences qualité quel que soit l’indicateur,** Figure 3 à l’exception du biais pour la zone AIP du Puy de Dôme où il dépasse l’objectif qualité (13.6 µg.m⁻³ calculés contre 10 µg.m⁻³ attendus).

Ces figures montrent que les résultats de prévisions non ajustées (Adapstat, en vert) sont globalement assez similaires à ceux expertisés par le prévisionniste. On remarque que l’intervention des prévisionnistes génère statistiquement une légère amélioration des prévisions d’ozone, particulièrement pour l’échéance J+1. Le calcul des scores illustre les bonnes performances du modèle ajusté statistiquement par rapport au modèle brut (Chimere, en rouge) pour les deux échéances de prévion et souligne ainsi l’importance de l’assimilation statistique dans la plateforme de prévion. Le modèle brut à lui seul ne permet pas d’atteindre les objectifs qualités de corrélation.

On notera aussi une tendance des sorties adaptées statistiquement (Adapstat) et expertisées (Carine) à surestimer les concentrations en ozone à J0 et J+1, comme en témoignent les biais très majoritairement positifs.

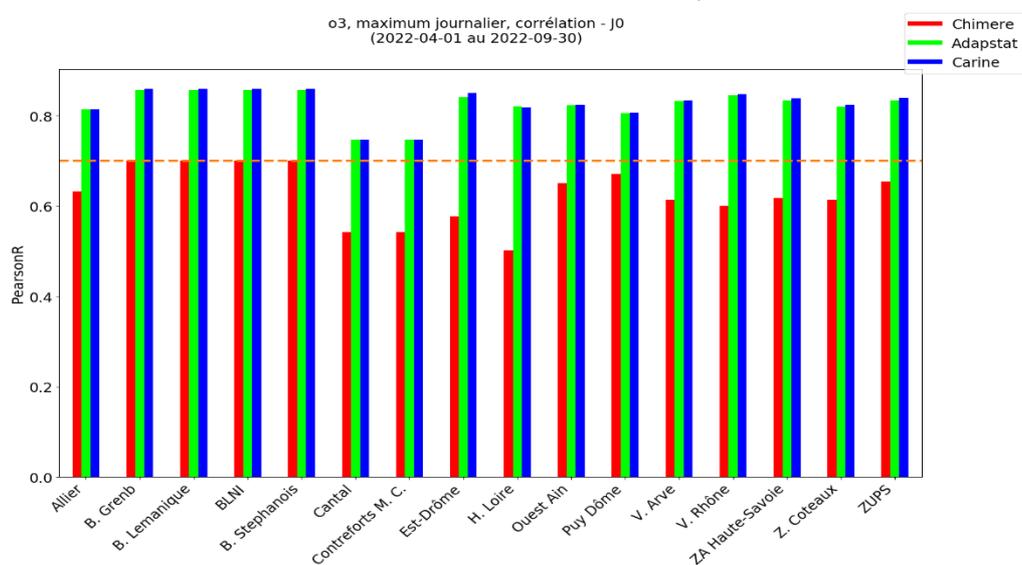
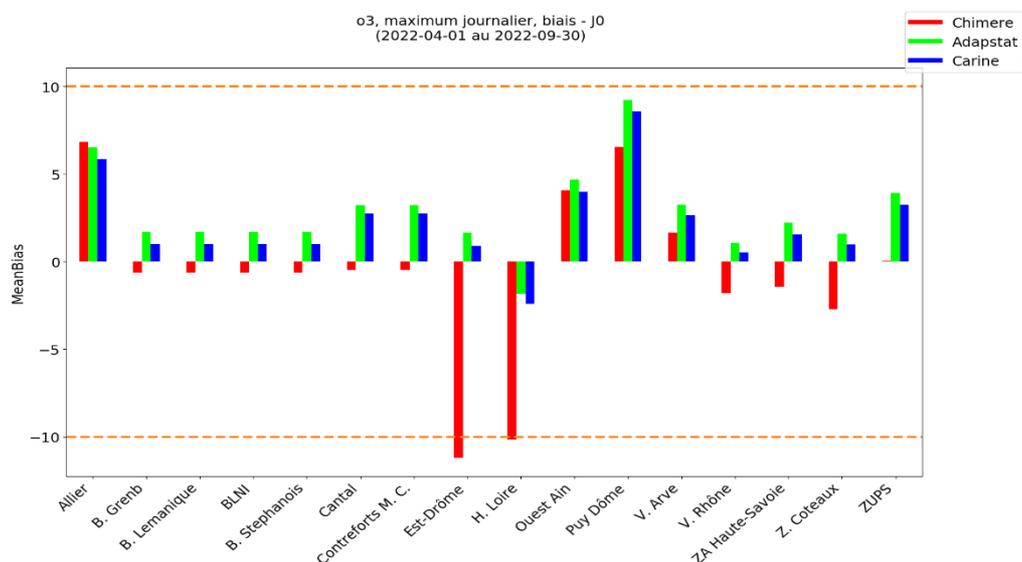
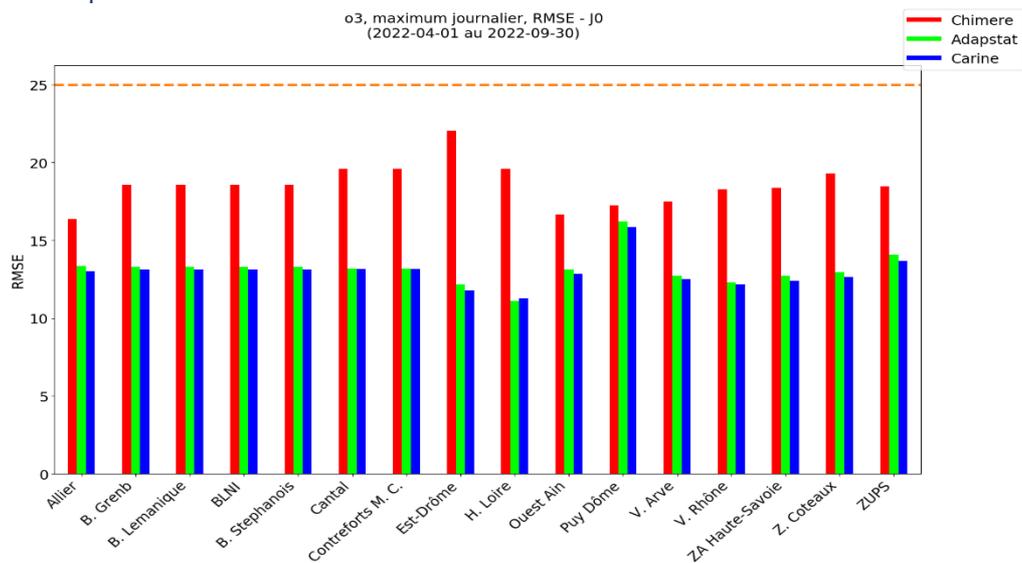


Figure 3 : Ozone - Scores de RMSE, biais et corrélation par zone AIP des prévisions Carine (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique (vert) d'avril à septembre 2022 sur l'échéance J0. La ligne en pointillé orange indique l'objectif de qualité.

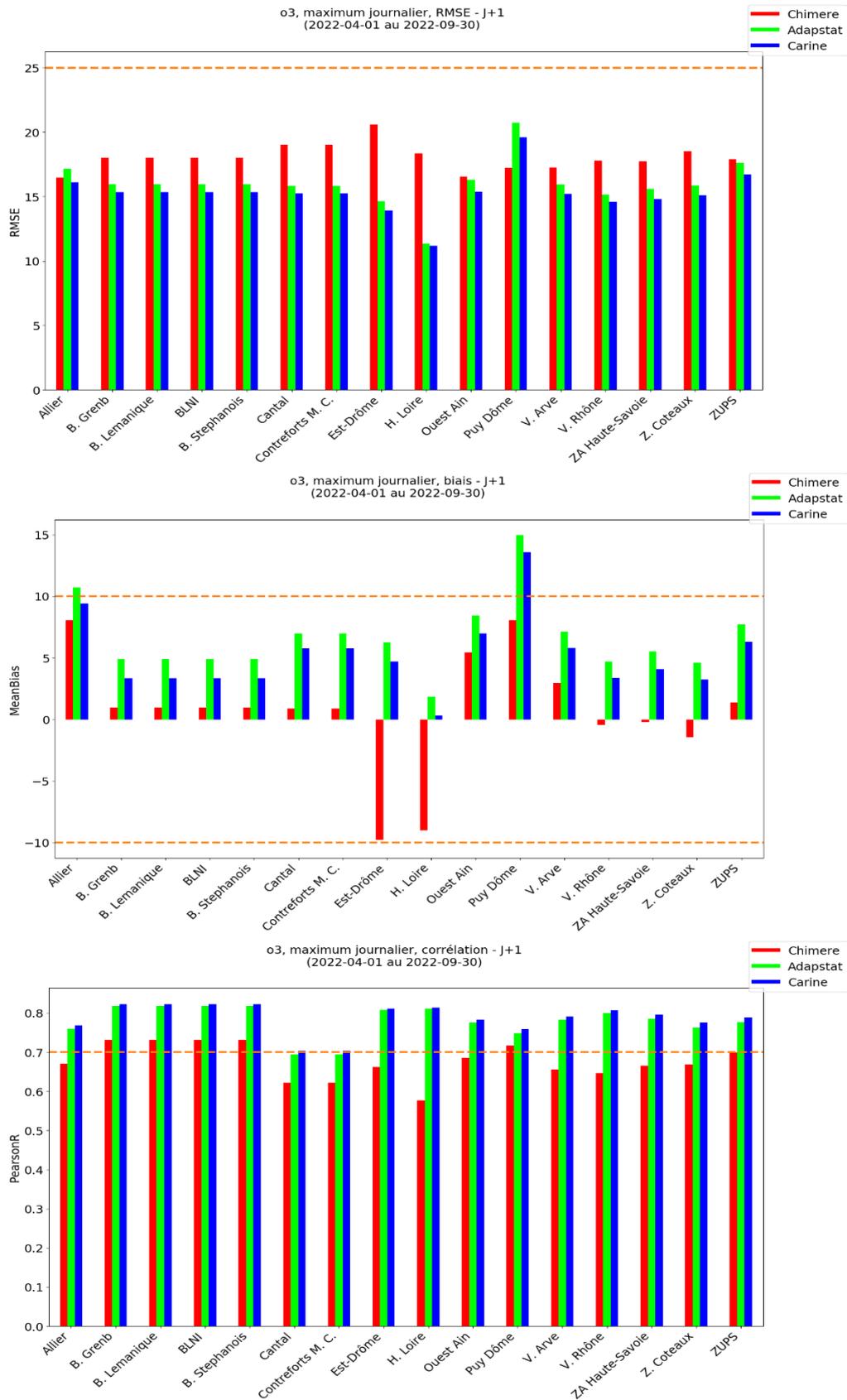


Figure 4: Ozone - Scores de RMSE, biais et corrélation par zone AIP des prévisions Carine (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique (vert) d'avril à septembre 2022 sur l'échéance J+1. La ligne en pointillé orange indique l'objectif de qualité.

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. Les meilleures performances statistiques sont globalement associées aux stations rurales. Cela peut s'expliquer par le fait que les stations urbaines et périurbaines sont plus sujettes à des variations des concentrations issues de sources locales dont le modèle peine à rendre compte. Globalement, les indicateurs statistiques calculés dans les Figure 5 et Figure 6 indiquent un très bon accord entre les prévisions et les mesures, les indicateurs statistiques étant conformes aux exigences qualité. Les modèles adaptés statistiquement et expertisés montrent tous les deux des biais positifs, quel que soit l'environnement d'implantation, et tendent donc à surestimer les concentrations. Le modèle brut, lui, présente des biais positifs aux stations urbaines, et négatifs aux stations rurales à J0 comme à J+1.

La comparaison des prévisions avant et après l'expertise humaine montre que l'ajustement des cartes par les prévisionnistes peut **améliorer légèrement les prévisions de l'ozone quelle que soit la typologie des stations.**

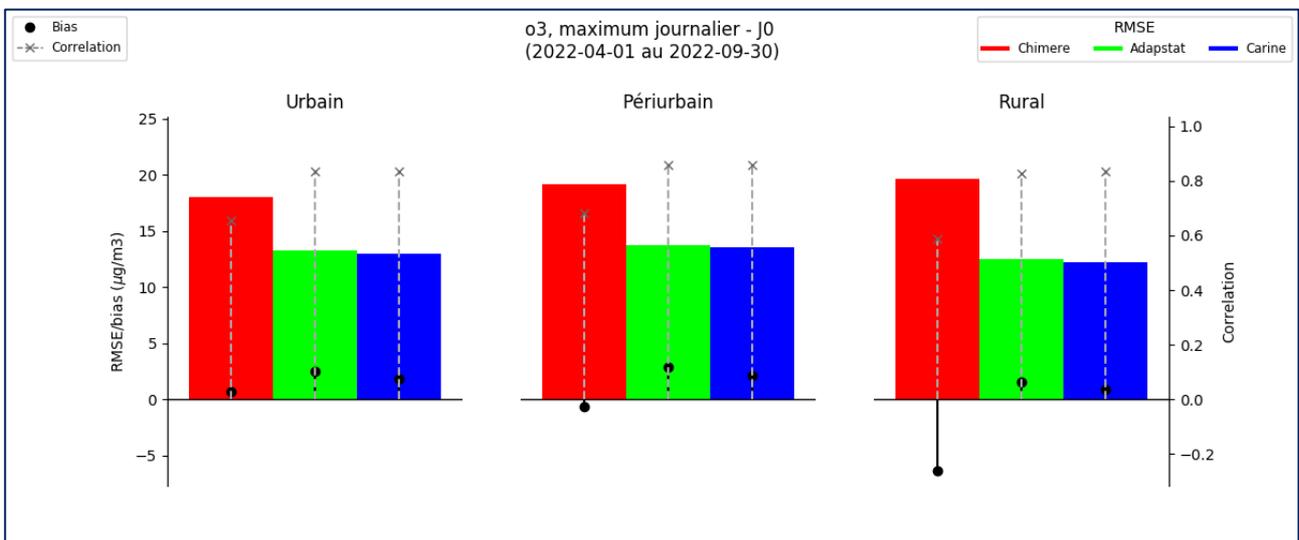


Figure 5 : Ozone - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction de la typologie de station (urbaines, périurbaines, rurales) des prévisions Carine (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique (vert) d'avril à septembre 2022 sur l'échéance J0.

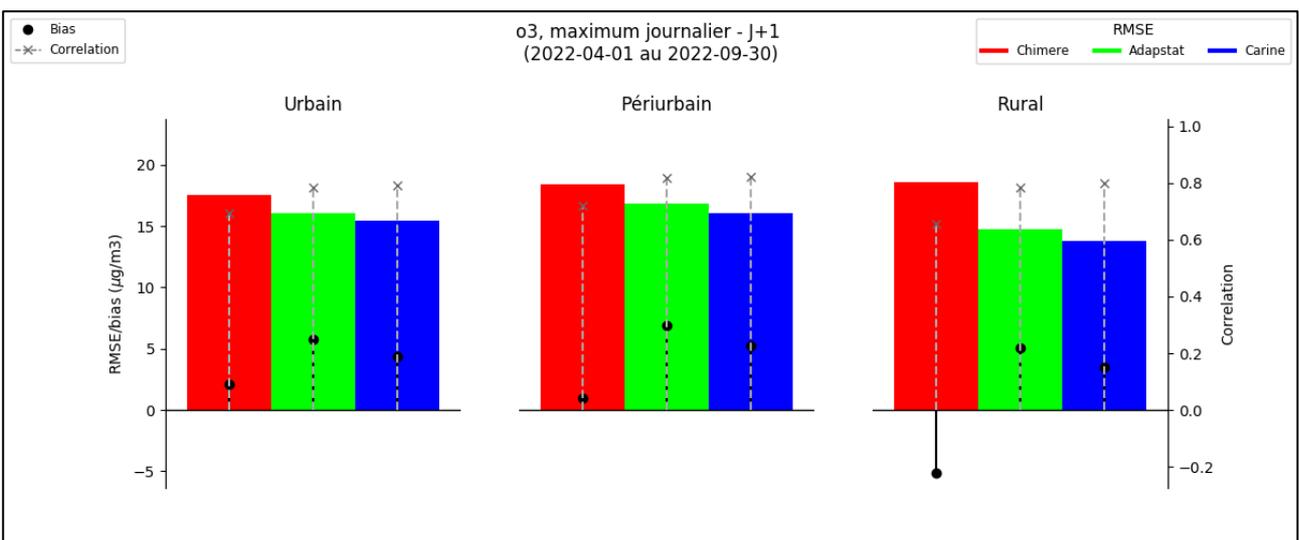


Figure 6 : Ozone - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction de la typologie de station (urbaines, périurbaines, rurales) des prévisions Carine (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique (vert) d'avril à septembre 2022 sur l'échéance J+1.

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 2022, pour les résultats ajustés par les prévisionnistes (en bleu), résultats adaptés statistiquement (en vert) et les résultats bruts (en rouge). Cette figure montre que les résultats de prévision (adaptés et ajustés) sont naturellement plus fiables pour J0 (prévision pour le jour-même) que pour le lendemain (J+1) et le surlendemain (J+2). En effet, les biais et les RMSE sont plus faibles à J0 qu'à J+1 et J+2. Les résultats adaptés montrent des biais positifs plus élevés lorsque l'échéance est lointaine. Ainsi, plus l'échéance est lointaine, plus les concentrations tendent à être surestimées. Les performances du modèle déterministe Chimère, elles, sont similaires quelle que soit l'échéance. Ce diagramme montre encore une fois que les résultats avec et sans ajustement sont relativement proches, l'ajustement des cartes de prévision ayant tout de même permis d'améliorer les biais moyens à J0, J+1 et J+2 par rapport aux résultats adaptés statistiquement. Ce constat est valable également pour la RMSE, bien que l'impact soit moins marqué. Les scores aux diverses échéances respectent les objectifs de qualité fixés.

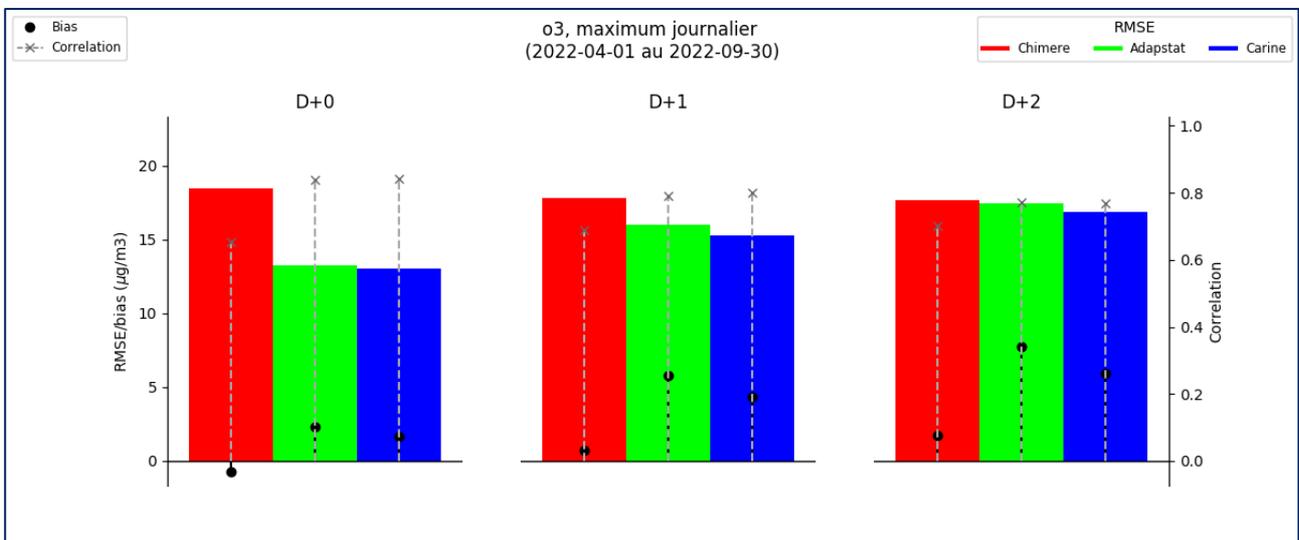


Figure 7 : Ozone - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction du jour de prévision pour Carine (bleu), CHIMERE (rouge), et pour l'adaptation statistique (vert) d'avril à septembre 2022

3.1.1.4. Par gamme de concentration

Ici, l'analyse consiste à grouper 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 pour J0 et J+1 respectivement. Ces figures montrent que l'évolution des performances des modèles en fonction des gammes de concentrations est quasi-identique pour tous les modèles. Chacun sous-estime en effet les fortes concentrations d'O₃ et surestime les faibles concentrations. Ce comportement est valable à la fois pour les prévisions de l'échéance J0 et celles de J+1. Pour le modèle ajusté, on observe par exemple à J0 un biais égal à 11.4 µg.m⁻³ pour les concentrations inférieures à 70 µg.m⁻³, tandis qu'il atteint -21.3 µg.m⁻³ pour des concentrations supérieures à 170 µg.m⁻³. Ces chiffres sont similaires à J+1, avec respectivement 13.8 et -20.1 µg.m⁻³. Les trois modèles sont ainsi plus performants pour prévoir les concentrations qui varient entre 90 et 130 µg.m⁻³. On notera la difficulté de Chimere brut à prévoir les concentrations supérieures à 130 µg.m⁻³ et donc à anticiper les dépassements du seuil réglementaire de 180 µg.m⁻³. Les résultats adaptés permettent heureusement de diviser par deux environ la RMSE et le biais sur ces concentrations.

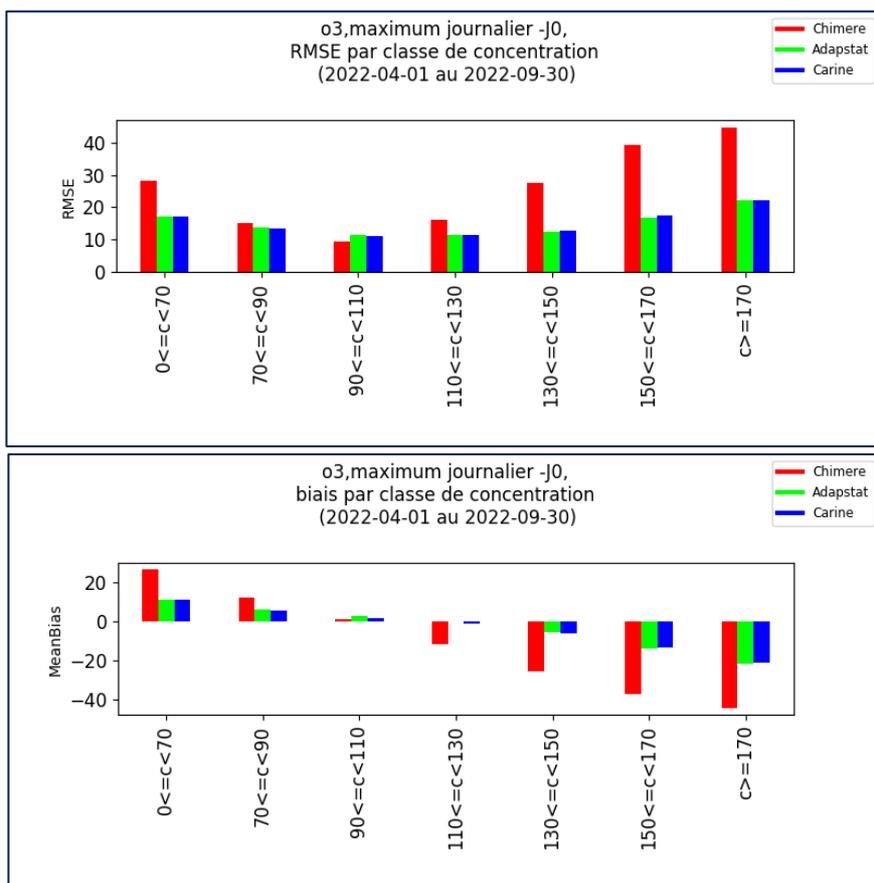


Figure 8 : Ozone - Scores de RMSE et biais par classe de concentrations des prévisions Carine (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique (vert) d'avril à septembre 2022 sur l'échéance J0.

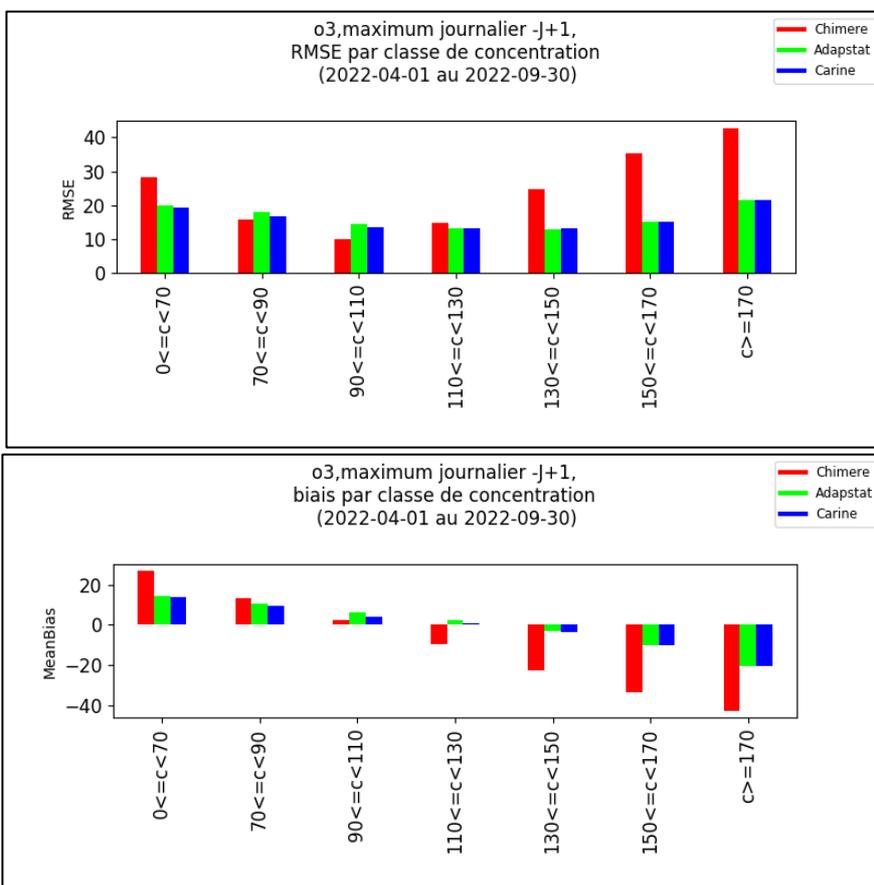


Figure 9 : Ozone - Scores de RMSE et biais par classe de concentration des prévisions Carine (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique (vert) d'avril à septembre 2022 sur l'échéance J+1.

3.1.1.5. Sur plusieurs années

L'objectif de cette partie est de comparer les performances 2022 par rapport aux années précédentes. La *Figure 10* montre l'évolution interannuelle des scores de performances pour les trois différents modèles. On peut notamment observer que :

- Les résultats de prévision sont satisfaisants pour les modèles ajusté et adapté : sur les cinq dernières années, les objectifs de qualité sont largement respectés pour ces deux modèles.
- Le modèle brut tend à s'améliorer d'année en année en ce qui concerne les RMSE et les biais (avec une exception pour le biais 2021).
- Les performances du modèle ajusté sont meilleures en 2022 que les années précédentes, notamment en termes de corrélation. On constate également une légère tendance de la prévision expertisée d'ozone à l'amélioration en termes de RMSE.
- Comme pour les deux années précédentes, les biais calculés pour les modèles adapté et ajusté sont positifs en 2022. Cela témoigne d'une tendance à surestimer les maximums des concentrations pour l'O₃ après adaptation statistique.

Une étude plus poussée permettrait de déterminer les causes d'évolutions de ces scores : évolution des modèles, conditions météorologiques différentes, évolution des concentrations observées...

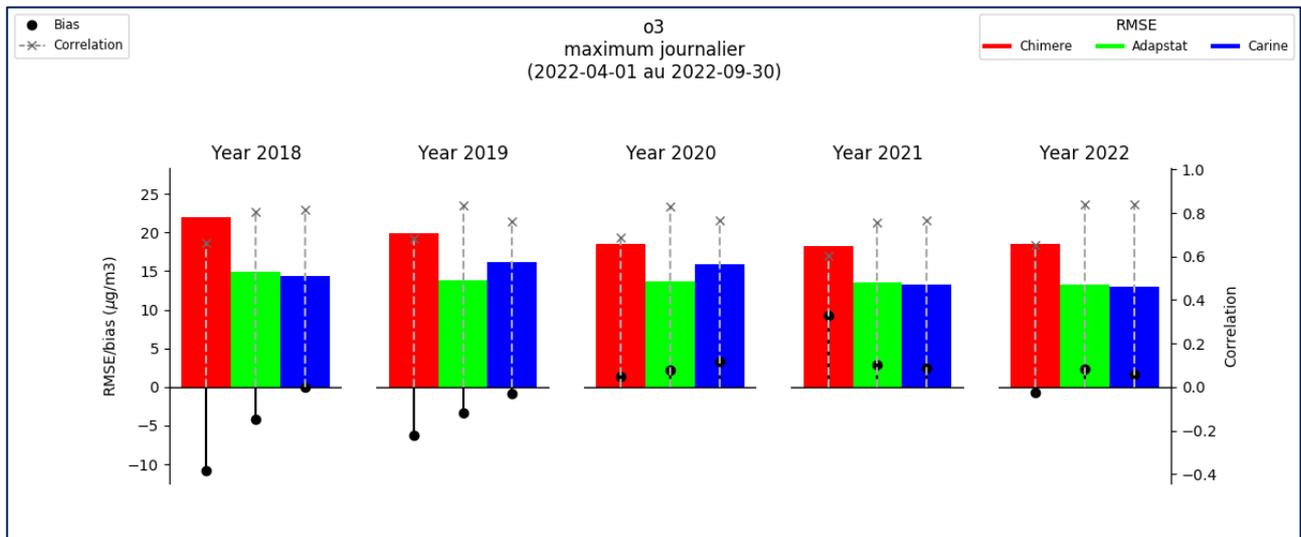


Figure 10 : Ozone - Synthèse des scores de RMSE (barres colorées), biais moyen (points noirs) et corrélation (pointillés gris) entre avril et septembre depuis 2018 pour CHIMERE, pour son adaptation statistique et pour le modèle Carine (modèle expertisé)

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 3*). 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		Total
		Oui	Non	
Prévision	Oui	Bonne détection (a)	Fausse détection (b)	Prévu (a+b)
	Non	Détection manquée (c)	Bonne non-détection corrects (d)	Non prévu (c+d)
Total		Observé (a+c)	Non observé (b+d)	

Tableau 3 : 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 (seuil d'information 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

Tableau 4 : 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'information 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 2021. 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 zonal N°PREF-DIA-BCI-2018-05-22-01² (par exemple, nombre d'habitants ou surface concernés). La période d'avril à octobre compte 21 dépassements aux stations du seuil de 180 µg/m³ répartis sur 9 jours.

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

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

dépassements observés (en gris) et ceux prévus (en couleur) cumulés sur toutes les stations de fond. Alors que 21 dépassements (toutes stations confondues) ont été observés en 2022, seulement 8 ont été prévus à J0 après expertise. Le modèle Chimere brut n'a modélisé aucun dépassement sur l'ensemble de la période. Globalement, le système de prévision a sous-estimé les concentrations et l'ampleur de l'épisode estival d'ozone de fin juillet 2022 sur la région Auvergne-Rhône-Alpes. Cela rejoint la tendance des modèles, constatée dans la section 3.1.1.4, à sous-estimer les concentrations supérieures à 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Cela est d'autant plus marquant à J+1, puisque le modèle expertisé n'a prévu que 4 dépassements sur les 21 constatés, contre 6 pour le modèle adapté statistiquement. Pour autant, les concentrations modélisées sur la maille kilométrique de chaque station ne constituent pas l'unique critère sur lequel s'appuient les prévisionnistes. D'autres critères, comme la surface ou la population exposée sont pris en compte lors de la correction des cartes et peuvent expliquer les écarts observés.

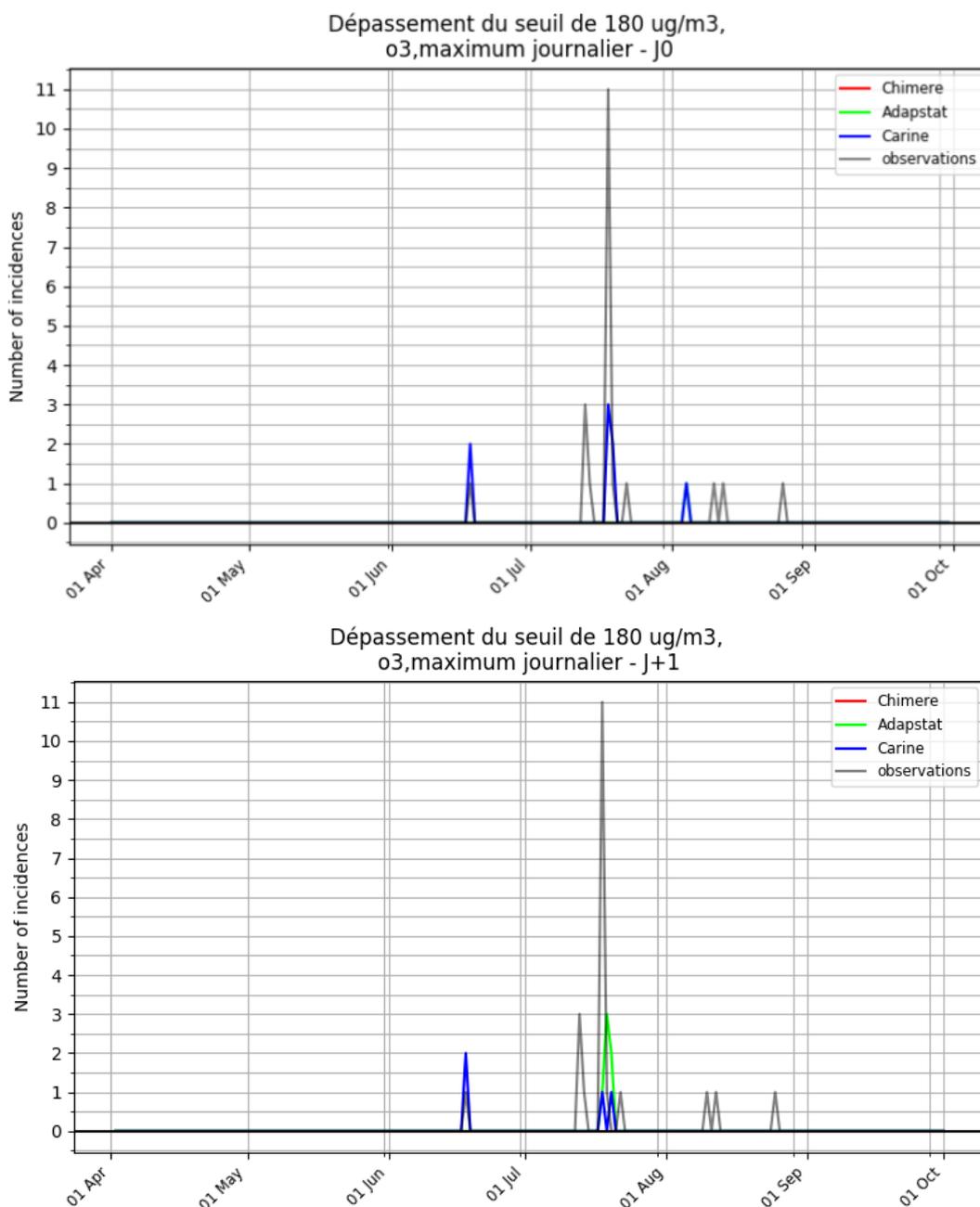


Figure 11 : Ozone - Superposition des dépassements enregistrés et prévus à J0 (en haut) et à J+1 (en bas) sur la période avril – septembre. Modèle brut (Chimère en rouge), modèle adapté statistiquement (Adapstat - en vert) et modèle ajusté par le prévisionniste (Carine – en bleu).

3.1.2.1.2. Eléments de la table de contingence

Les Figure 12 et Figure 13 illustrent les valeurs des tables de contingence (bonne détection, détection manquée et fausse détection) cumulées sur les stations de fond pour la région (en haut) et décliné selon les zones définies par l'arrêté inter-préfectoral (en bas). 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, il a été convenu d'afficher uniquement les zones AIP où des mesures ont été réalisées.

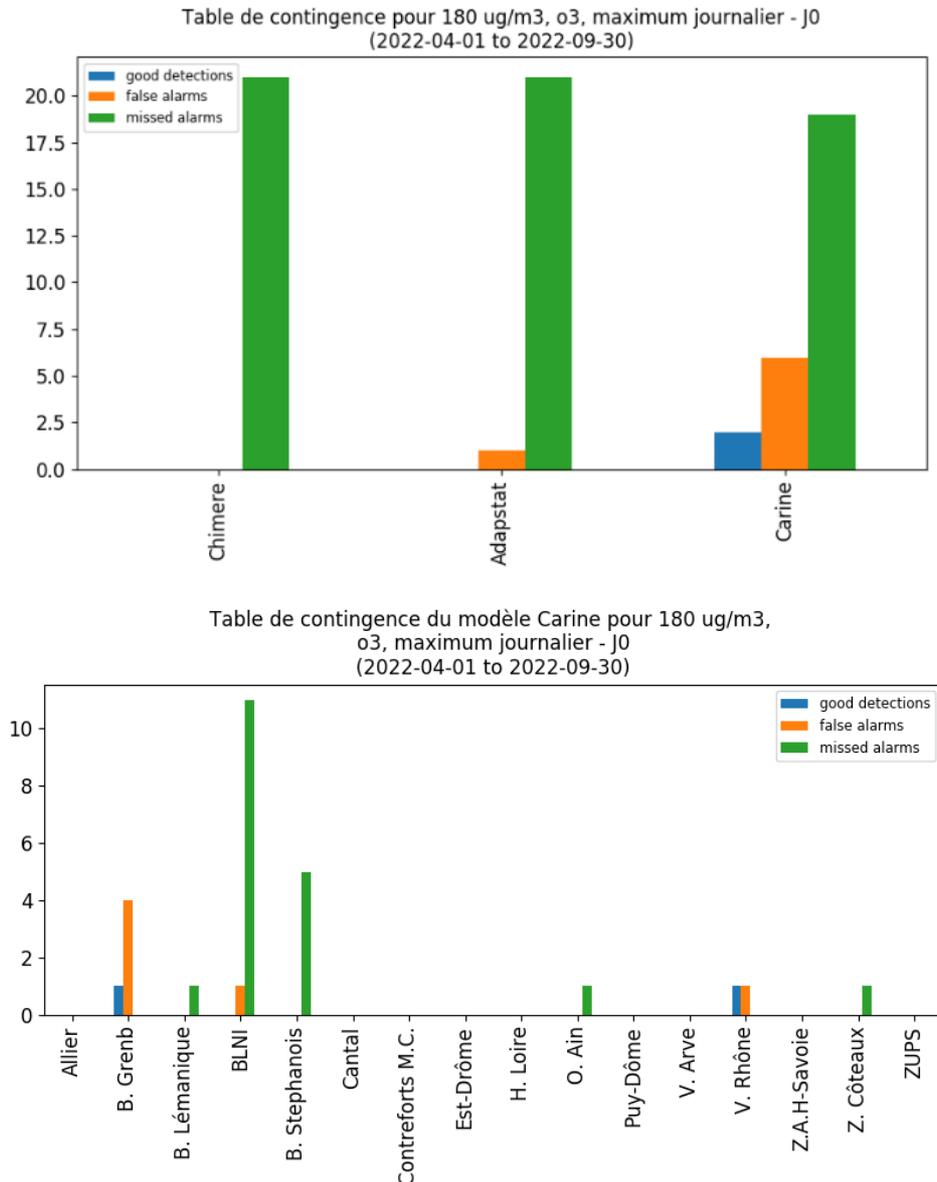


Figure 12 : Ozone - Tables de contingence sur la période d'avril à septembre 2022 à l'échéance J0 pour le seuil de 180 µg/m³. Les bonnes détections sont en bleu, les fausses détections en orange, et les détections manquées en vert. Gauche : Tables de contingence de CHIMERE (groupe de gauche), ADAPSTAT (groupe du milieu), et de Carine (groupe de droite) pour la région Auvergne-Rhône-Alpes entière. Droite : Table de contingence de l'adaptation statistique déclinée par zones AIP.

Les résultats montrent que seulement 2 bonnes détections ont été réalisées après expertise à J0, contre 18 détections manquées. 6 fausses alarmes ont été prévues. Le modèle adapté statistiquement, lui, a manqué les 21 dépassements observés à J0 et a modélisé un dépassement non observé. Notons que le modèle Chimere brut n'a pas modélisé un seul dépassement sur la période observée. Le nombre important d'alertes manquées vient de la forte sous-estimation des modèles autour du seuil réglementaire de 180 µg/m³. Nous avons vu dans la section 3.1.1.4 que le

modèle Adapstat a un fort biais négatif (-21.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) pour les concentrations supérieures à 170 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les « fausses détections », elles, reflètent la mise en vigilance par précaution lorsque les niveaux s'approchent des seuils d'activation, ceci afin de limiter le nombre d'évènements non prévus. L'expertise du prévisionniste permet de réaliser de bonnes détections et la réduction du nombre d'alertes manquées. Elle est plus précautionneuse à l'approche des seuils réglementaires au risque de réaliser plus de fausses alertes. La table de contingence à J+1 présente des résultats similaires : respectivement 21 et 20 détections manquées pour Adapstat et Carine, pour 6 et 3 fausses alarmes. A j+1, le modèle expertisé a anticipé un seul dépassement effectivement observé.

Table de contingence pour 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, O_3 , maximum journalier - J+1
(2022-04-01 to 2022-09-30)

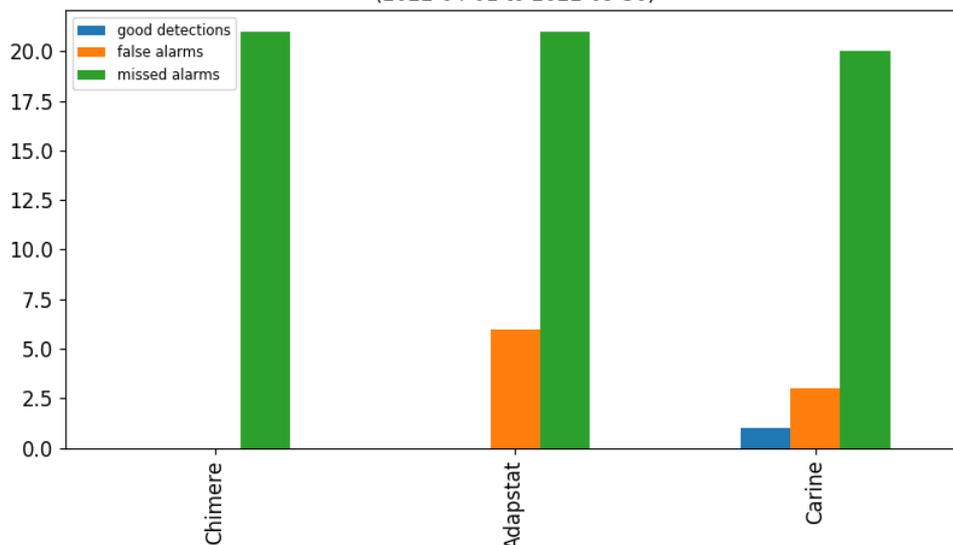


Table de contingence du modèle Carine pour 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,
 O_3 , maximum journalier - J+1
(2022-04-01 to 2022-09-30)

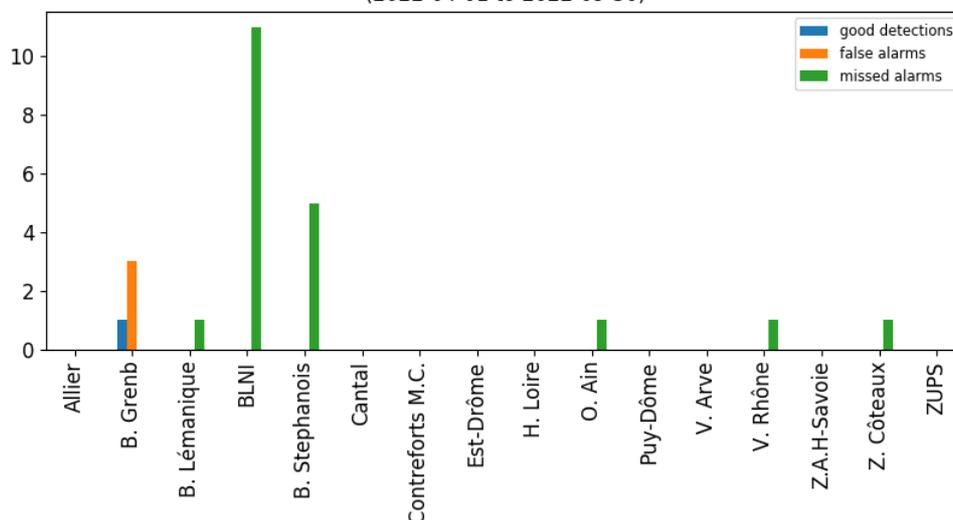


Figure 13 : Ozone - Tables de contingence sur la période d'avril à septembre 2022 à l'échéance J+1 pour le seuil de 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les bonnes détections sont en bleu, les fausses détections en orange, et les détections manquées en vert. Gauche : Tables de contingence de CHIMERE (groupe de gauche), ADAPSTAT (groupe du milieu), et de Carine (groupe de droite) pour la région Auvergne-Rhône-Alpes entière. Droite : Table de contingence de l'adaptation statistique déclinée par zone AIP.

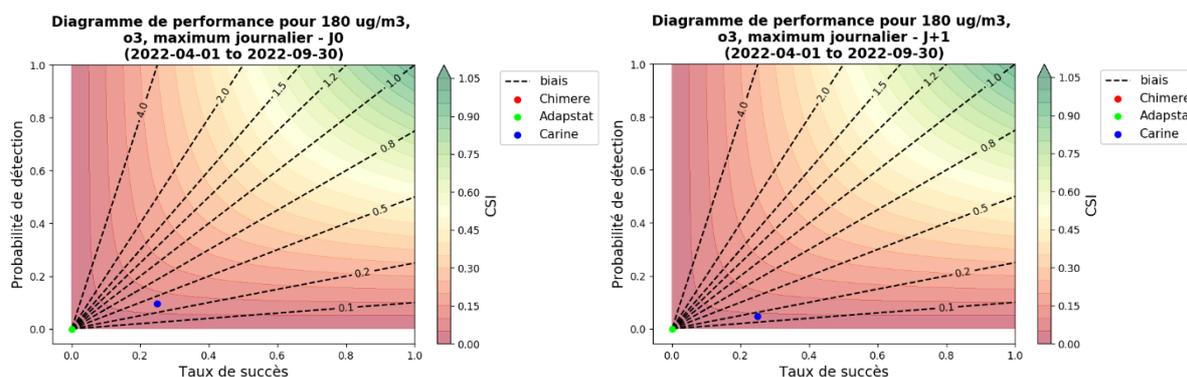


Figure 14 : Ozone - Diagramme de performance pour Chimère (rouge), Adapstat (vert) et Carine (bleu) d'avril à septembre 2022 pour l'échéance J0 (à gauche) et celle de J+1 (à droite)

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).

Malgré des performances globales décevantes, la meilleure performance de prévision de dépassement du seuil réglementaire reste l'expertise du prévisionniste.

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'information aux stations. Dans ce paragraphe, l'étude porte uniquement sur les journées d'épisodes de pollution, au sens de l'arrêté zonal N°PREF-DIA-BCI-2018-05-22-01. 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.
3. Dépassement prévu et non confirmé a posteriori – Fausse alarme
4. Dépassement avéré mais non prévu

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

Ces résultats sont présentés dans les tables de contingence (Figure 15 et Figure 16). Le comptage est effectué sans distinguer le type d'épisode (recommandation ou alerte). L'étude de performance est réalisée pour les prévisions pour le jour-même (J0) et les prévisions pour le lendemain (J+1). Il convient de rappeler que le calcul d'un pourcentage a une représentativité limitée lorsque le nombre de dépassements est très faible. Les Figure 15 et Figure 16 montre que 6 dépassements d'O₃ ont été prévus à J0 pour 16 constatés sur la région pour l'année 2022. Le nombre relativement élevé de « fausses alarmes » (22) traduit à nouveau le principe de précaution : mise en vigilance lorsque les niveaux approchent les seuils d'activation afin de limiter le nombre d'évènements non prévus. De manière générale, on relève sur l'ensemble des zone AIP une part similaire de dépassements prévus et constatés et de dépassements non prévus.

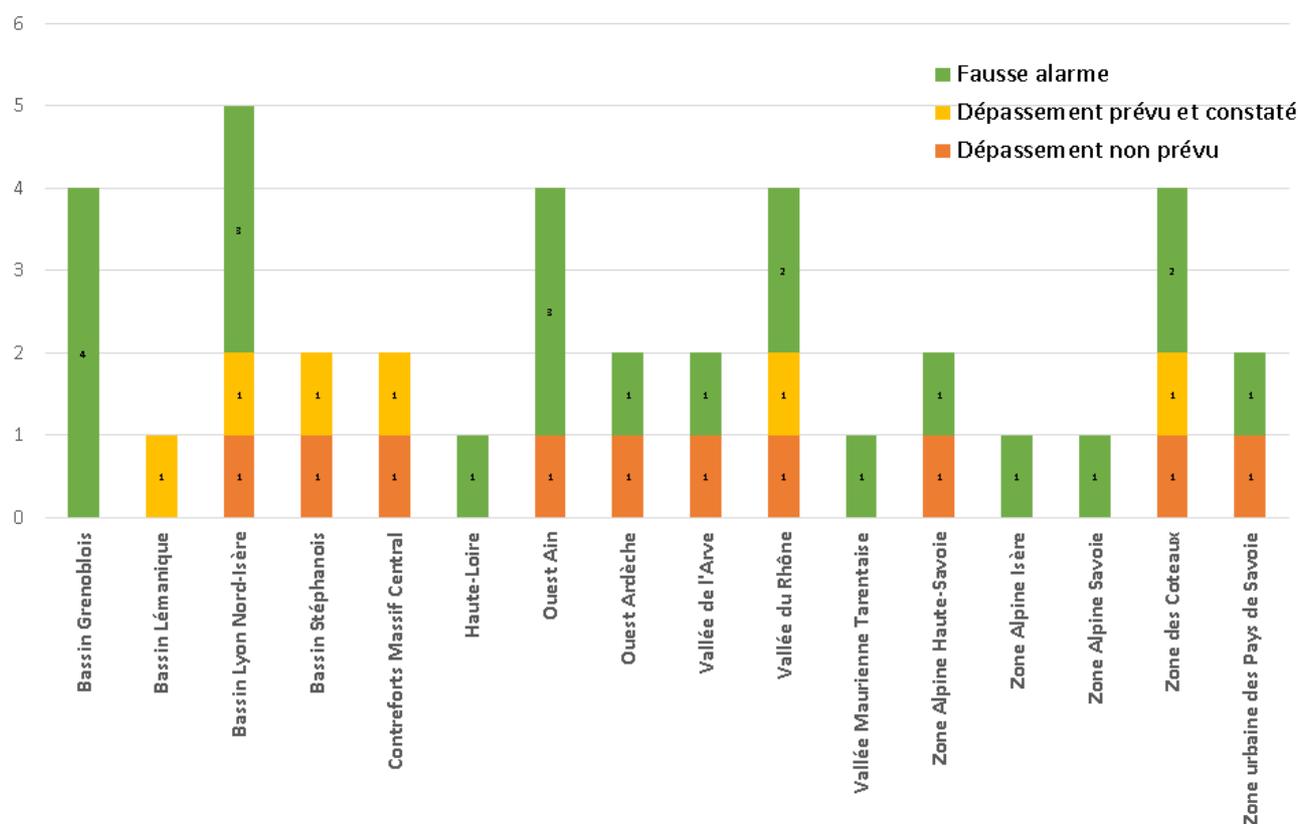


Figure 15 : Ozone - Table de contingence des critères AMU (critères surfaciques et de population confondus) sur la période d'avril à septembre 2022 à l'échéance J0.

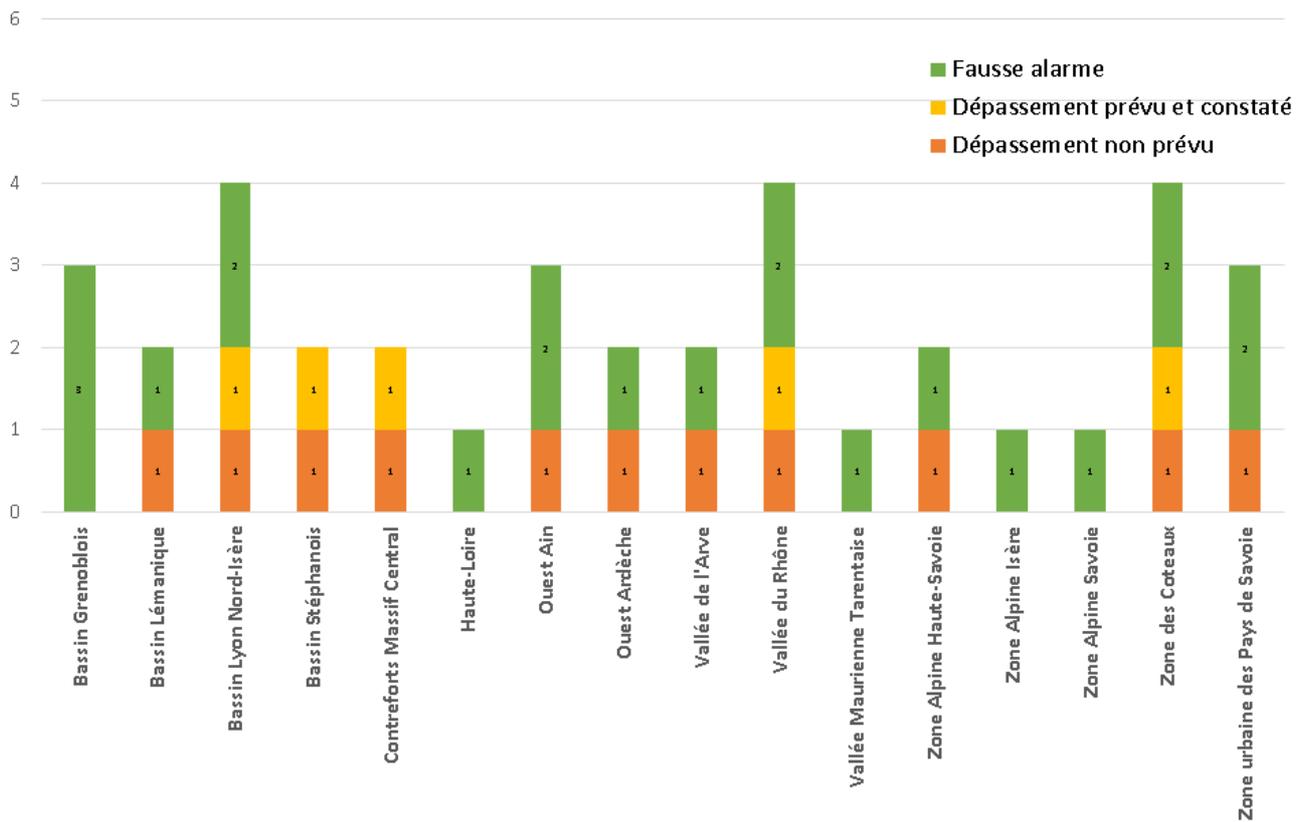


Figure 16 : Ozone - Table de contingence des critères AMU (critères surfaciques et de population confondus) sur la période d'avril à septembre 2022 à l'échéance J+1.

3.2. Prévision particules fines (PM₁₀)

Contrairement à l’ozone, les 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 journaliers précédemment.

3.2.1. Scores classiques (Biais, RMSE, Corrélation)

3.2.1.1. Par rapport aux objectifs de qualité

Le *Tableau 5* : Objectif de qualité définis pour les particules fines PM₁₀ s’appliquant aux performances des prévisions en région et sur les zones AIP aux échéances J0 et J+1. illustre les objectifs de qualité définis pour les particules fines PM₁₀. Ces valeurs doivent s’appliquer aux performances des prévisions en région et sur les zones AIP 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 5 : Objectif de qualité définis pour les particules fines PM₁₀ s’appliquant aux performances des prévisions en région et sur les zones AIP aux échéances J0 et J+1.

Les résultats statistiques par zone d’activation de dispositif sont présentés sur les *Figure 17* et *Figure 18*, pour les échéances J0 et J+1 respectivement. Ces figures montrent que les résultats de prévision adaptés statistiquement sont assez similaires à ceux expertisés par le prévisionniste. On remarque que l’intervention des prévisionnistes engendre une légère dégradation des scores. En particulier, elle entraîne des biais faiblement supérieurs témoignant de la tendance des prévisionnistes à rehausser légèrement les concentrations prévues. L’ajustement des cartes permet toutefois d’améliorer les résultats de prévision des modèles sur plusieurs zones. On note quelques exceptions pour lesquelles des améliorations sont apportées par l’intervention des prévisionnistes et notamment la corrélation de la majorité des zones AIP à J+1. On observe également que les biais absolus sont toujours élevés pour le modèle déterministe Chimère (en rouge). Contrairement aux deux modèles ajustés, le biais moyen du modèle brut (Chimère) est négatif pour les particules PM₁₀. Cela signifie que la prévision brute sous-estime la moyenne des concentrations pour ce polluant pour toutes les échéances de prévision.

Les résultats de la chaîne de prévision sont satisfaisants sur l’ensemble des zones AIP. Les *Figure 17* et *Figure 18* montrent que **les objectifs de qualité sont respectés par le modèle ajusté (« Carine ») pour les deux échéances J0 et J+1** sauf pour l’Est Drôme et la Haute-Loire où les objectifs de qualité ne sont pas respectés pour la corrélation à l’échéance J+1. Mentionnons le fait que l’Est Drôme est un bassin situé au bord de la région Auvergne-Rhône-Alpes et qu’il ne contient qu’une seule station de type rural.

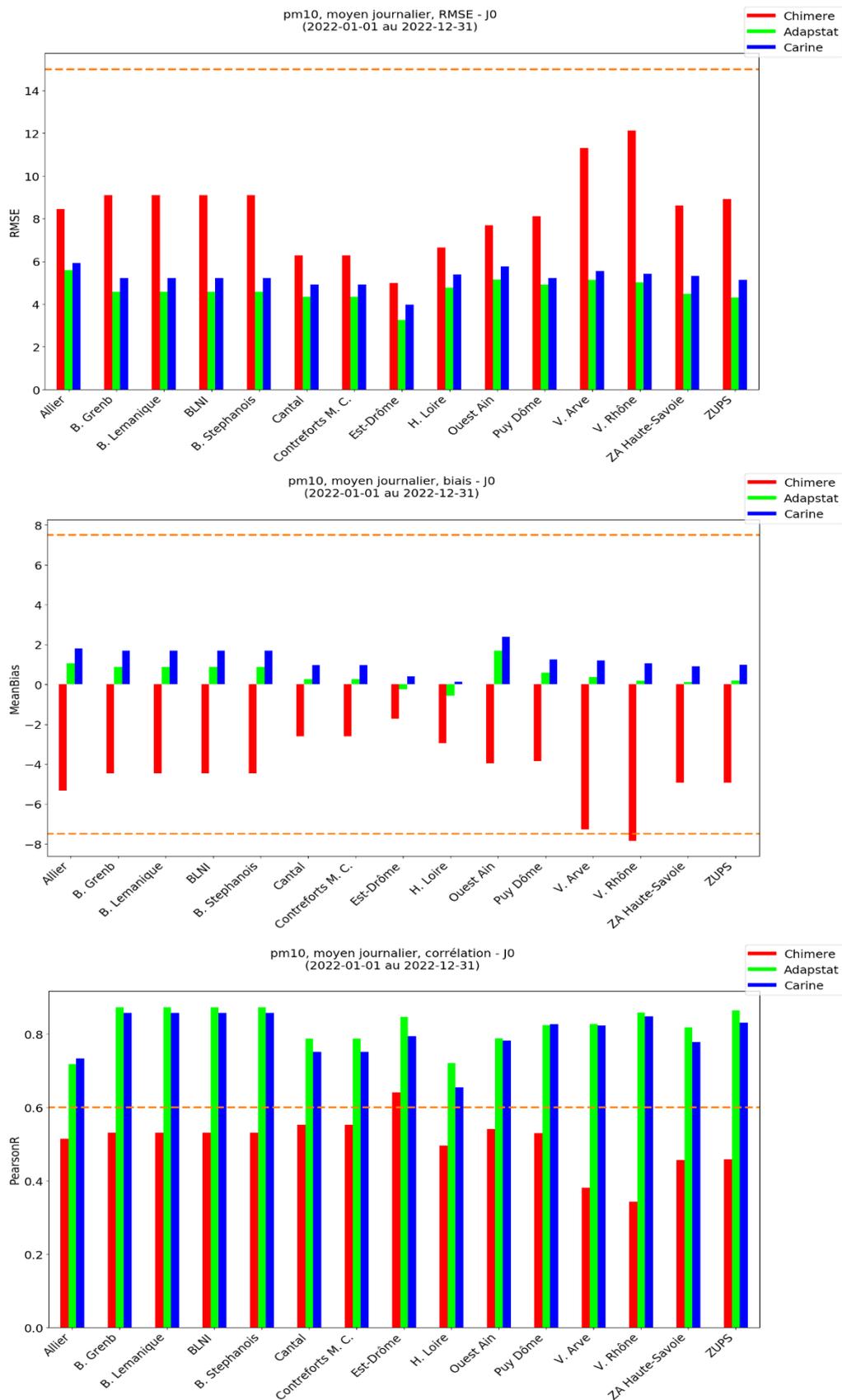


Figure 17 : PM₁₀ - Scores de RMSE, biais et corrélation par zone AIP des prévisions Carine (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique (vert) pour l'échéance J0. La ligne en pointillé orange indique l'objectif de qualité.

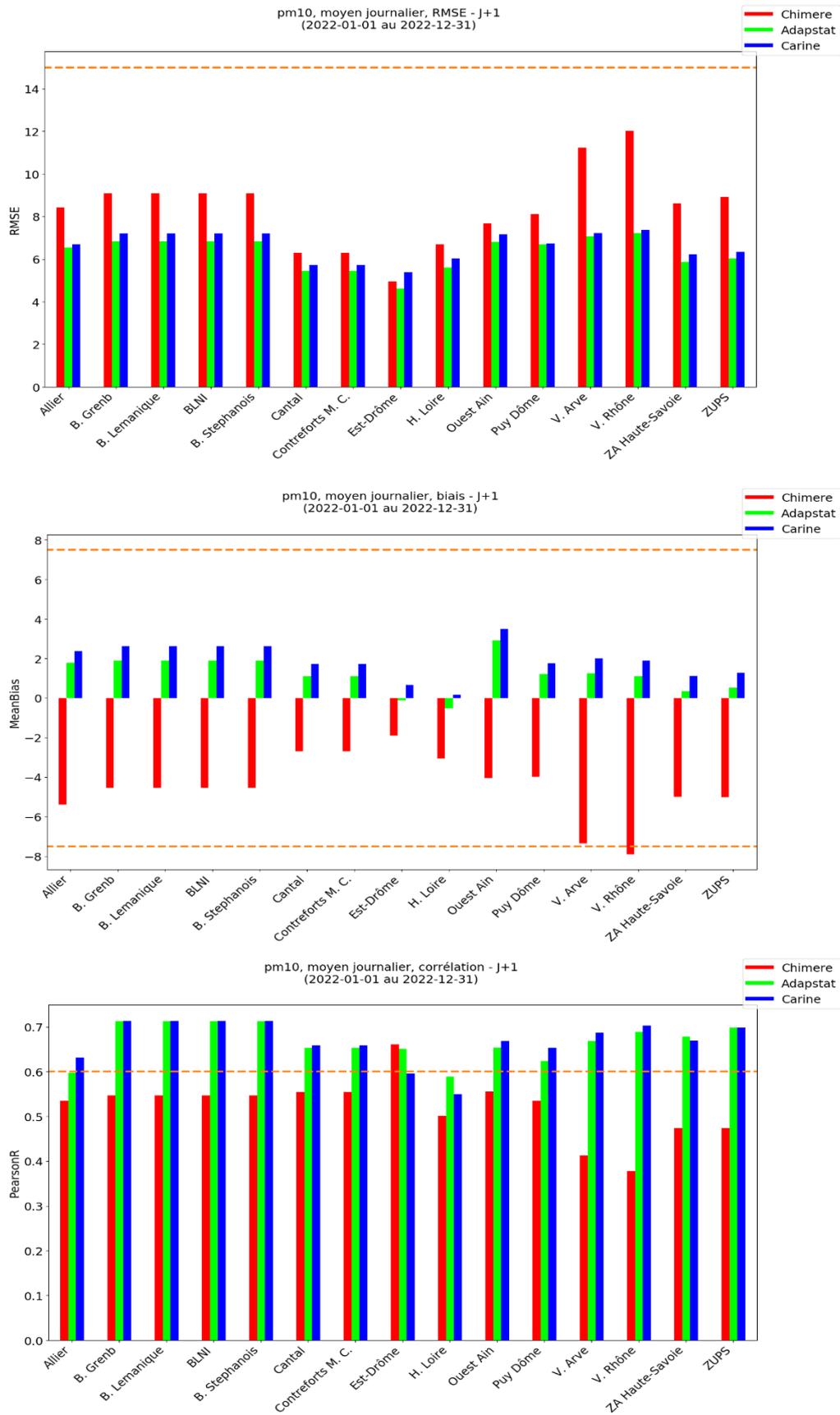


Figure 18 : PM₁₀ - Scores de RMSE, biais et corrélation par zone AIP des prévisions Carine (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique (vert) pour l'échéance J+1. La ligne en pointillé orange indique l'objectif de qualité

3.2.1.2. Par typologie

Les Figure 19 et Figure 20 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 moins bons résultats, associés aux sites de typologie urbaine et périurbaine, s’expliquent par une plus forte Les bonnes performances observées sur les sites ruraux sont, elles, liées à l’aptitude de la chaîne de modélisation à reproduire les faibles concentrations. Globalement, les indicateurs statistiques calculés dans les Figure 19Figure 19Figure 19 et Figure 20 indiquent un très bon accord entre les prévisions et les mesures. En effet, les indicateurs statistiques des prévisions ne dépassent pas la fourchette des valeurs considérées comme acceptables pour toutes les typologies étudiées.

La comparaison des prévisions avant et après l’expertise humaine montrent encore une fois un résultat quasi-identique et très similaire pour les particules fines PM₁₀. Néanmoins, on constate que l’ajustement des cartes par les prévisionnistes a dégradé légèrement les prévisions à J0 et à J+1 quelle que soit la typologie des stations et l’échéance.

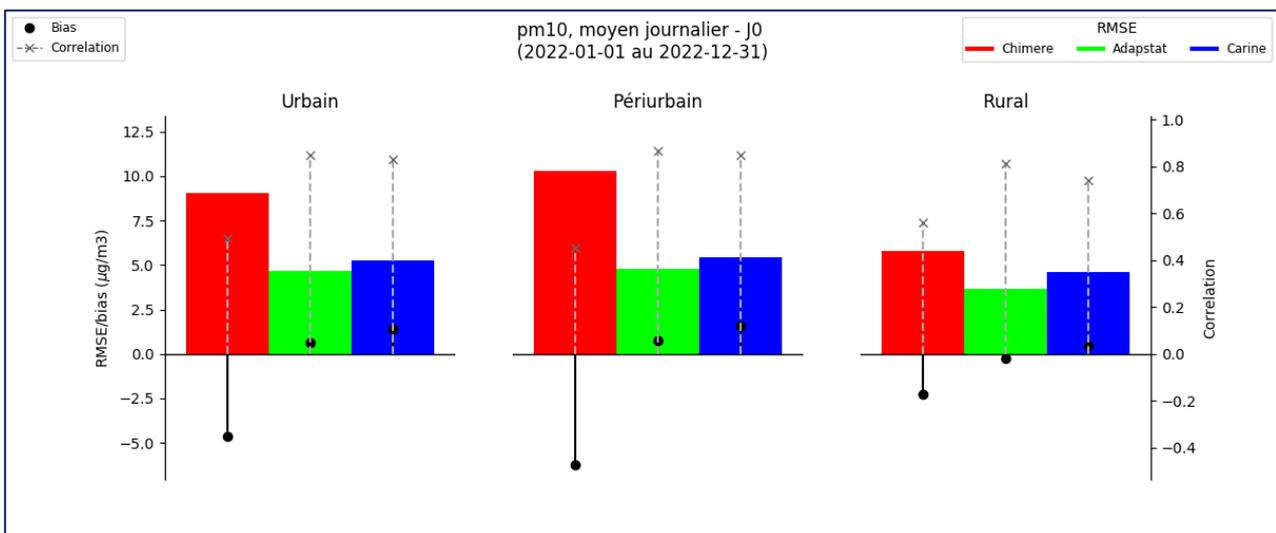


Figure 19 : PM₁₀ - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction de la typologie de station (urbaines, périurbaines, rurales) des prévisions Carine (bleu), CHIMERE (rouge), et de l’adaptation statistique (vert) sur l’échéance J0

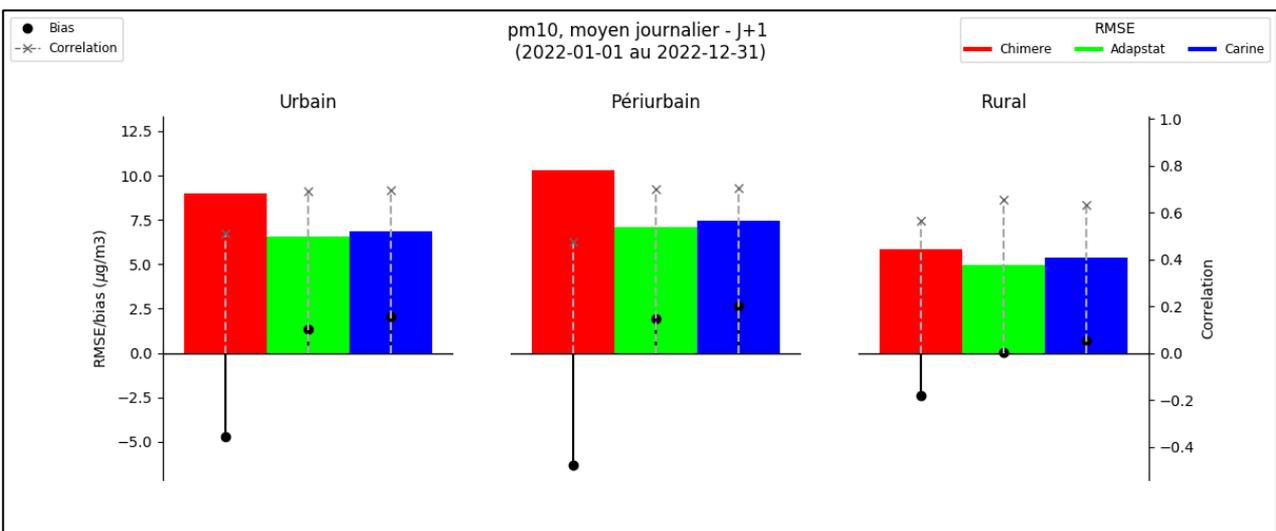


Figure 20 : PM₁₀ - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction de la typologie de station (urbaines, périurbaines, rurales) des prévisions Carine (bleu), CHIMERE (rouge), et de l’adaptation statistique (vert) sur l’échéance J0

3.2.1.3. Par échéance de prévision

La *Figure 21* représente les performances statistiques calculées pour les différentes échéances de prévision (J0, J+1 et J+2) pour l'année 2022. Ce calcul a été effectué à la fois pour les résultats ajustés par les prévisionnistes (en bleu), les résultats adaptés (en vert) et les résultats bruts (en rouge). Cette figure montre que les résultats de prévision (adaptés et ajustés) sont naturellement 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. On observe que la forte propension du modèle Chimere brut à sous-estimer les concentrations (biais négatif) est corrigée par Adapstat, voire légèrement inversée.

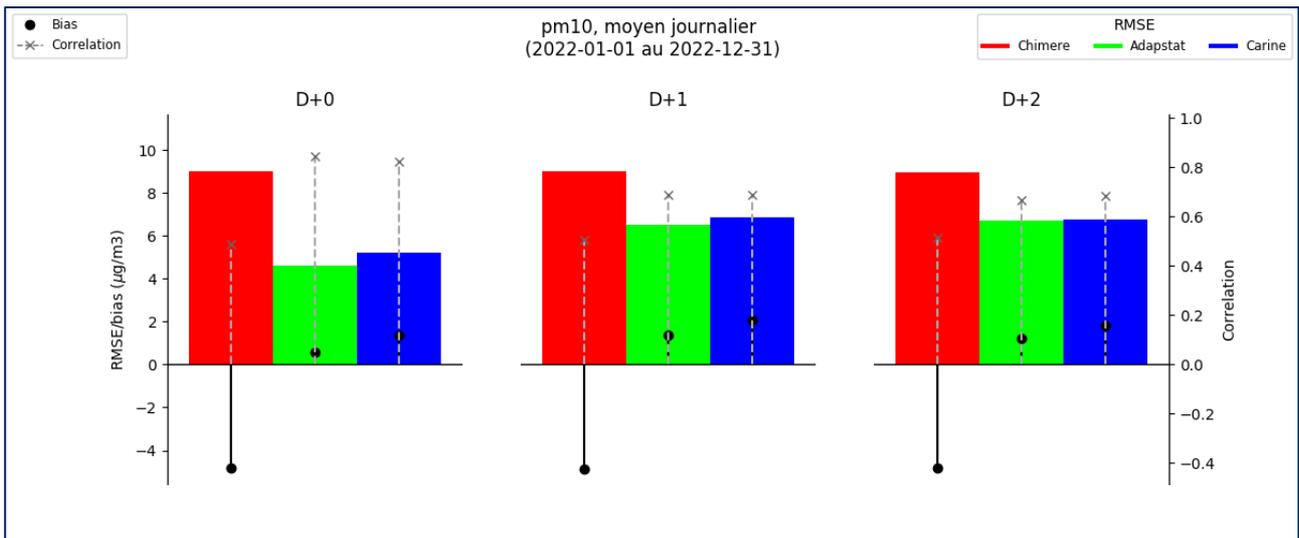


Figure 21 : PM_{10} - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction du jour de prévision pour Carine (bleu), CHIMERE (rouge), et pour l'adaptation statistique (vert) en 2022.

3.2.1.4. Par gamme de concentration

Ici, de la même manière que 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 22* et *Figure 23* illustrent l'évolution des scores (RMSE et biais moyen) en fonction des classes de concentrations des PM_{10} . 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 élevés observés pour les gammes des concentrations supérieures à $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ traduisent une difficulté de la chaîne de prévision à bien reproduire les plus fortes concentrations des PM_{10} . Ces figures mettent en évidence la capacité de l'adaptation statistique à améliorer les résultats bruts de prévision pour les PM_{10} . En effet, le modèle brut Chimère sous-estime largement les concentrations des particules fines PM_{10} . Ces figures montrent également que les résultats expertisés sont meilleurs que les résultats non expertisés dans les hautes concentrations. Cela prend une importance toute particulière lorsque l'on s'approche du seuil d'information et de recommandation et souligne l'importance d'une expertise humaine lorsque l'on s'approche de ces valeurs de concentration.

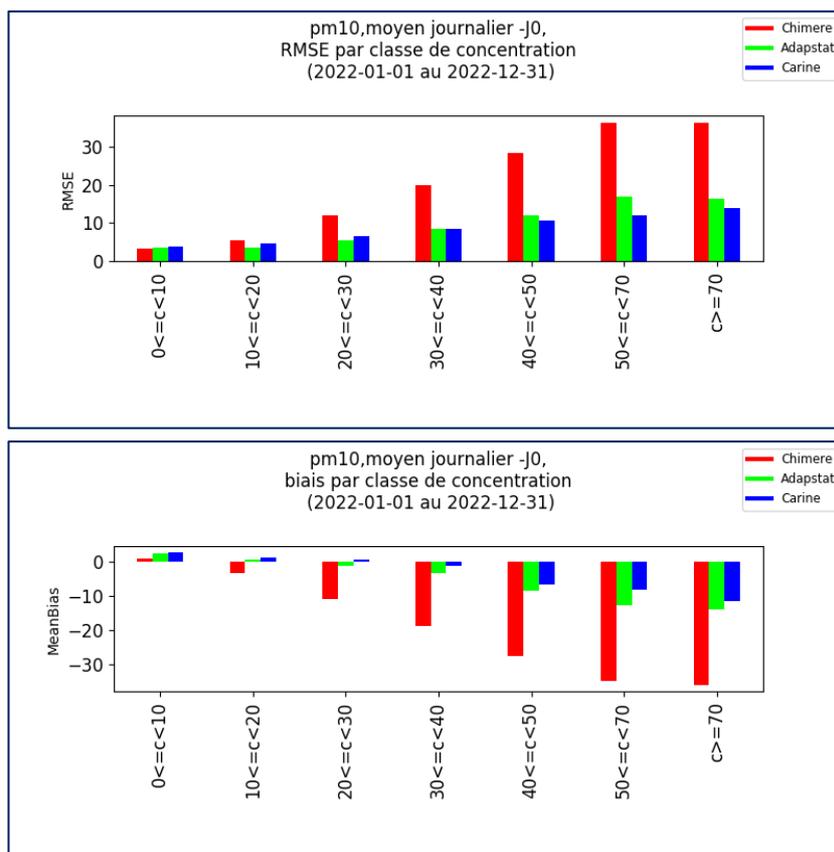


Figure 22 : PM₁₀ - Scores de RMSE et biais par classe de concentration des prévisions Carine (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique (vert) sur l'échéance J0.

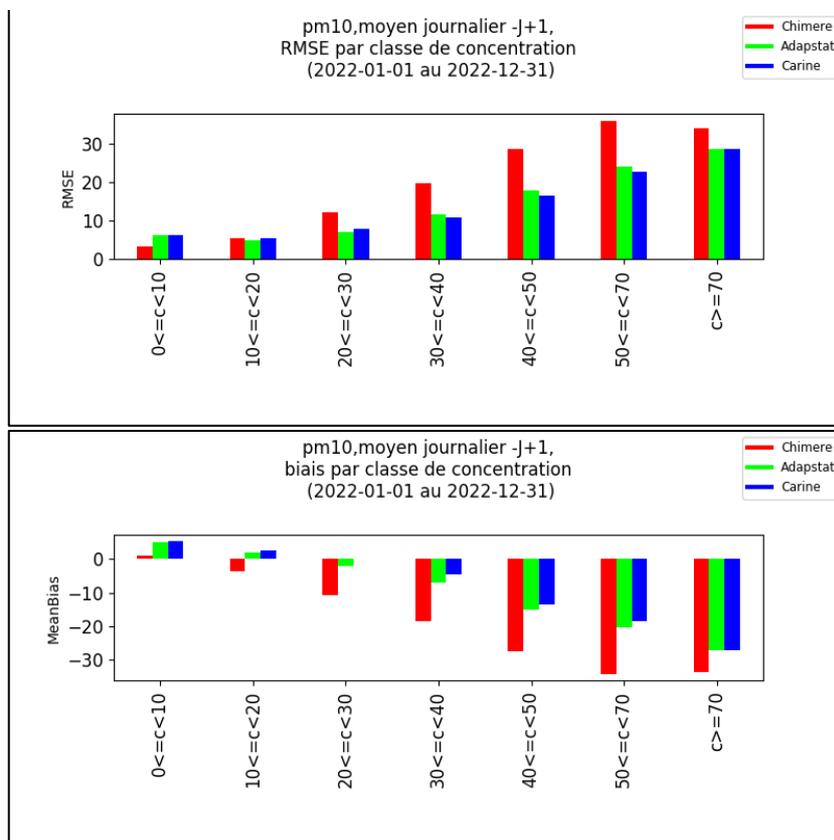


Figure 23 : PM₁₀ - Scores de RMSE et biais par classe de concentration des prévisions Carine (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique (vert) sur l'échéance J+1.

3.2.1.5. Sur plusieurs années

L'objectif de cette partie est de comparer les performances 2022 à celles des années précédentes. La Figure 24 présente l'évolution interannuelle des scores de performances pour les différents modèles. Les indicateurs statistiques présentés dans ce graphique montrent que les deux prévisions avant et après l'expertise humaine ont globalement la même performance statistique, les résultats adaptés statistiquement étant toutefois légèrement meilleurs que les résultats ajustés en 2022. Comme les années précédentes, les biais calculés pour le modèle adapté sont positifs. Autrement dit, la chaîne de prévision surestime légèrement la moyenne des concentrations en particules fines. La Figure 24 montre que le modèle brut génère des biais négatifs beaucoup plus élevés que les modèles adaptés et ajustés. Ce biais moyen négatif observé sur les sorties Chimere brutes sur les cinq dernières années est corrigé par l'adaptation statistique et l'expertise des prévisionnistes. Dans l'ensemble, l'année 2022 présente des résultats analogues à ceux des années précédentes.

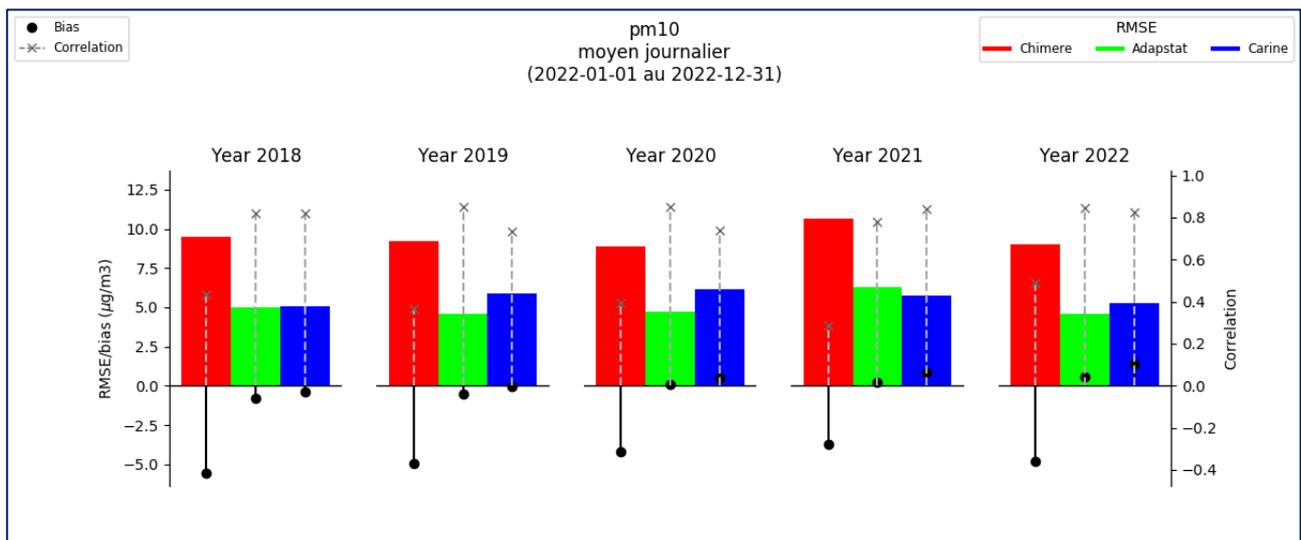


Figure 24 : PM10 - Synthèse des scores de RMSE (barres colorées), biais moyen (points noirs) et corrélation (pointillés gris) depuis 2018 pour CHIMERE, pour son adaptation statistique et pour le modèle Carine (modèle expertisé)

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 fines PM₁₀. Il convient de rappeler que ces dépassements aux stations n'expliquent pas systématiquement les vigilances de pollution activées sur la région en 2022. 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 zonal N°PREF-DIA-BCI-2018-05-22-01³.

3.2.2.1.1. Séries temporelles

La Figure 25 illustre le nombre de dépassements journaliers du seuil d'information et de recommandation pour les PM₁₀ sur l'année 2022. 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 2022, 166 dépassements ont été observés, toutes stations confondues, répartis sur 24 jours. Ce graphe montre que les deux modèles adaptés (statistiquement

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

et par le prévisionniste) ont réussi à détecter et anticiper efficacement l'occurrence des épisodes de pollution, particulièrement en début d'année. Cependant, quelques dépassements ponctuels n'ont pas été prévus par les différents modèles de prévision. Il s'agit des épisodes de pollution mixte ou des épisodes de type Dust (poussières désertiques). En fin d'année, les modèles ont anticipé plusieurs dépassements n'ayant pas eu lieu.

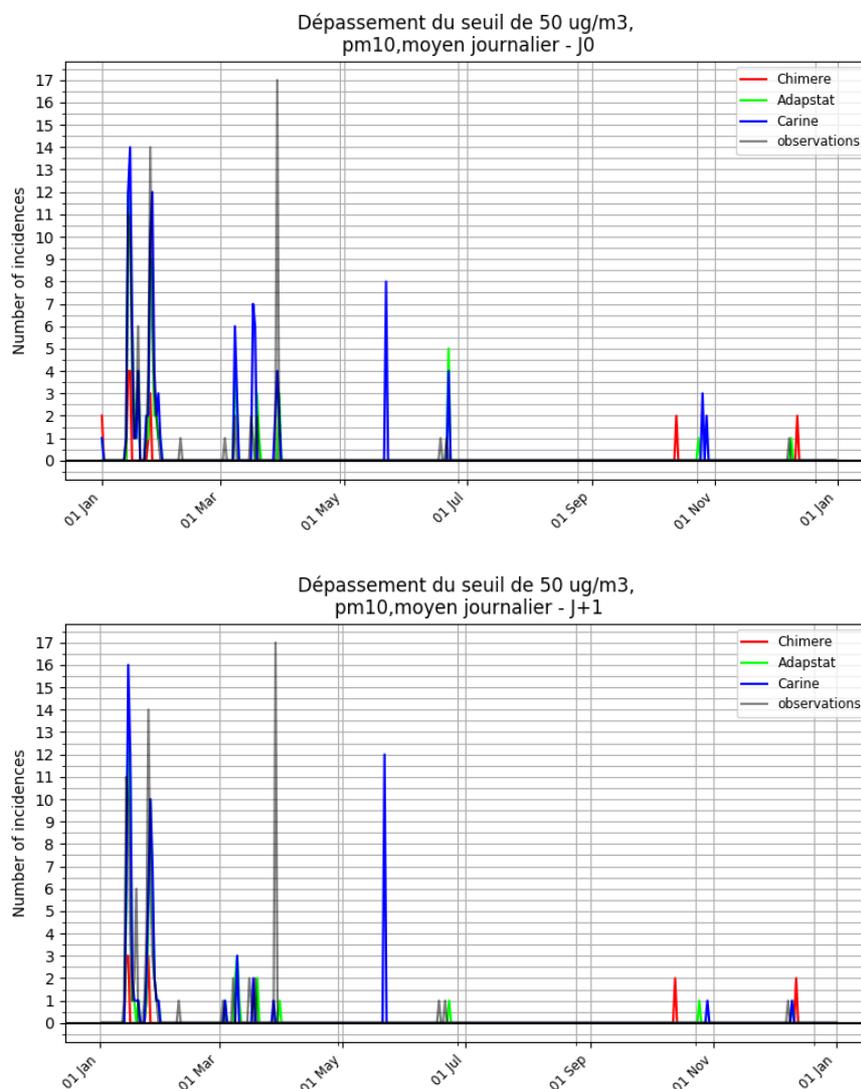


Figure 25 : PM₁₀ - Superposition des dépassements enregistrés et prévus à J0 (en haut) et à J+1 (en bas) à différentes étapes de la chaîne de prévision : modèle brut (Chimère en rouge), modèle adapté statistiquement (Adapstat - en vert) et le modèle ajusté par le prévisionniste (Carine – en bleu)

3.2.2.1.2. Éléments de la table de contingence

Les Figure 26 et Figure 27 illustrent les valeurs des tables de contingence (Bonne détection, Détection manquée et Fausse détection) cumulées sur les stations de fond pour la région à gauche et déclinées par zone AIP disposant d'un arrêté mesure d'urgence. Le graphique du bas de chaque figure Figure 26 Figure 26 affiche la table de contingence pour le modèle de référence (ici Carine pour Atmo Auvergne-Rhône-Alpes). Sur ces figures, on affiche uniquement les zones AIP où des mesures ont été réalisées.

L'inter-comparaison entre les résultats adaptés statistiquement et ajustés par le prévisionniste montre que l'expertise humaine améliore nettement le taux de détection des seuils d'information à J0 et améliore légèrement ce taux de détection pour J+1. On constate en effet à J0 46 bonnes détections par Adapstat, contre 55 par Carine. A J+1, ces chiffres atteignent respectivement 30 et 35.

De plus, le nombre d'alertes manquées est plus faible lorsque les cartes sont expertisées par le prévisionniste notamment à J0 : 49 dépassements manqués par Adapstat à J0 contre 40 pour Carine. Le nombre relativement élevé de dépassements « prévus non confirmés » sur certaines zones reflète la mise en vigilance par précaution lorsque les niveaux s'approchent des seuils d'activation, ceci afin de limiter le nombre d'évènements non prévus.

Dans le bassin Lyonnais Nord Isère et la Vallée de l'Arve, zones les plus fréquemment touchés par des épisodes de pollution liées aux PM₁₀, le nombre de bonnes détections atteint plus du double du nombre de dépassements manqués. Le nombre de fausses alarmes témoigne de la précaution accrue des prévisionnistes est également le plus importantes sur ces territoires.

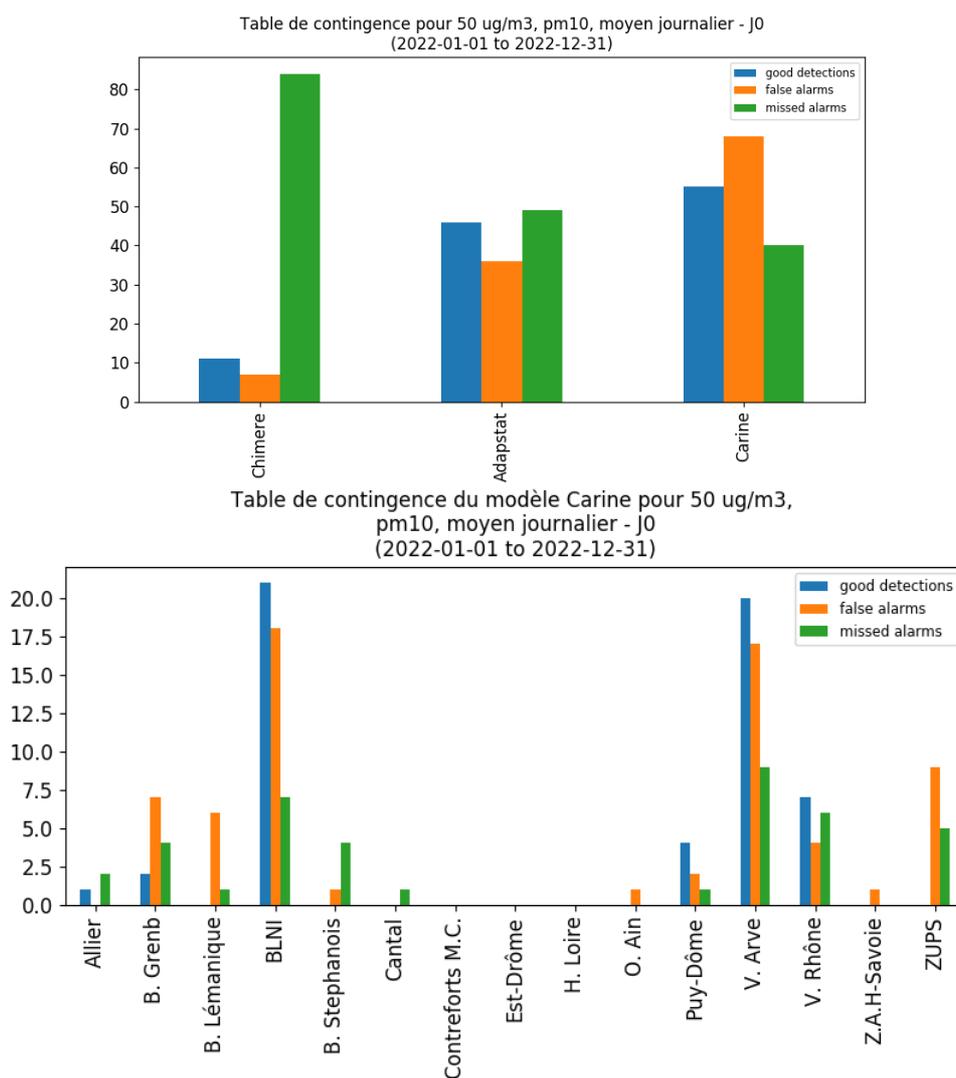


Figure 26 : PM₁₀ - Tables de contingence pour l'année 2022 à l'échéance J0 pour le seuil de 50 µg/m3. En haut : Tables de contingence de CHIMERE (groupe de gauche), ADAPSTAT (groupe du milieu), et de Carine (groupe de droite) pour la région Auvergne-Rhône-Alpes entière. En bas : Table de contingence de l'adaptation statistique déclinée par zone AIP.

Table de contingence pour 50 ug/m3, pm10, moyen journalier - J+1
(2022-01-01 to 2022-12-31)

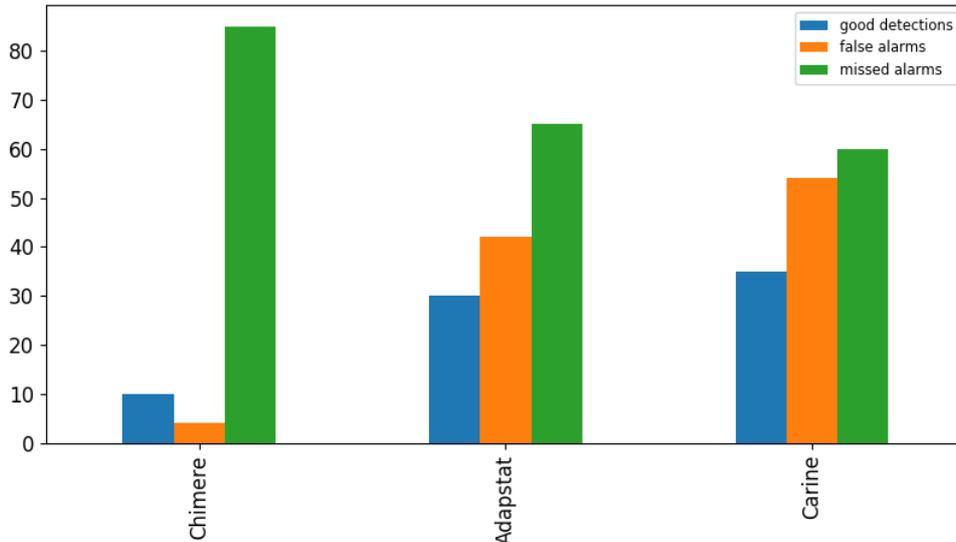


Table de contingence du modèle Carine pour 50 ug/m3, pm10, moyen journalier - J+1
(2022-01-01 to 2022-12-31)

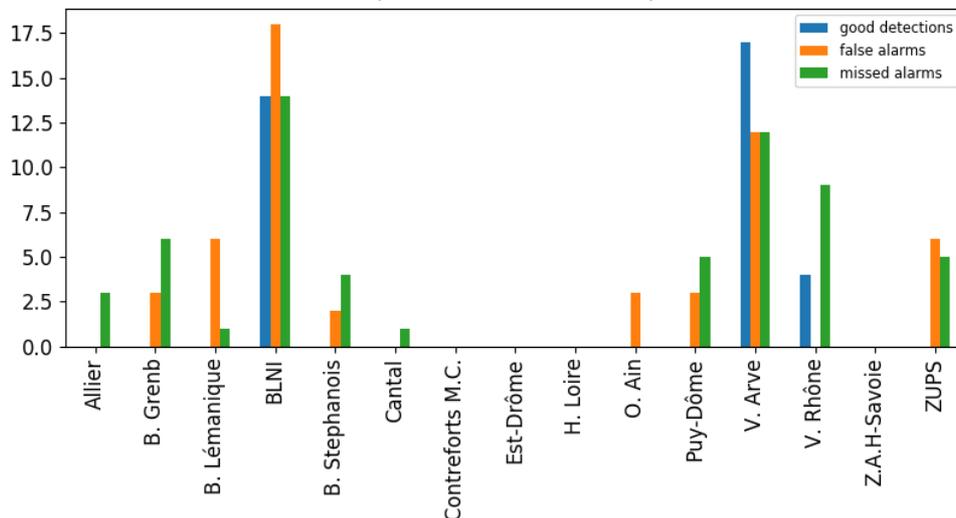


Figure 27 : PM₁₀ - Tables de contingence calculée sur l'année 2022 à l'échéance J+1 pour le seuil de 50 µg/m³. En haut : Tables de contingence de CHIMERE (groupe de gauche), ADAPSTAT (groupe du milieu), et de Carine (groupe de droite) pour la région Auvergne-Rhône-Alpes entière. En bas : Table de contingence de l'adaptation statistique déclinée par zone AIP.

La Figure 28 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 montre que les performances pour la détection des dépassements de seuil sont très proches pour les prévisions adaptées statistiquement et ajustées de PM₁₀. Elle illustre des meilleures performances pour le modèle adapté statistiquement et les cartes ajustées par les prévisionnistes pour J0 et J+1. On constate que l'ajustement par le prévisionniste a permis d'assurer une probabilité de détection proche de 60% et un taux de succès supérieur à 40% à J0. Pour l'échéance J+1, les résultats sont plus faibles mais avec une probabilité de détection et un taux de succès proche de 40% pour les cartes expertisées par les prévisionnistes.

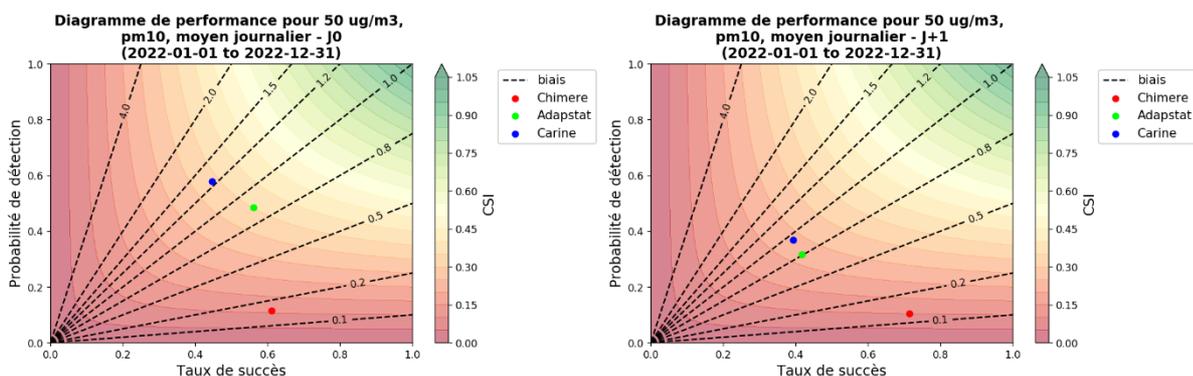


Figure 28 : PM_{10} - Diagramme de performance pour Chimère (rouge), Adapstat (vert) et Carine (bleu) en 2022 pour l'échéance J0 (à gauche) et celle de J+1 (à droite)

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 zonal N°PREF-DIA-BCI-2018-05-22-01. 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 événements suivants :

1. Pas de dépassement prévu, pas de dépassement constaté
2. Dépassement prévu et constaté.
3. Dépassement prévu et non confirmé a posteriori – Fausse alarme
4. Dépassement avéré mais non prévu.

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

Ces résultats sont présentés dans les tables de contingence (

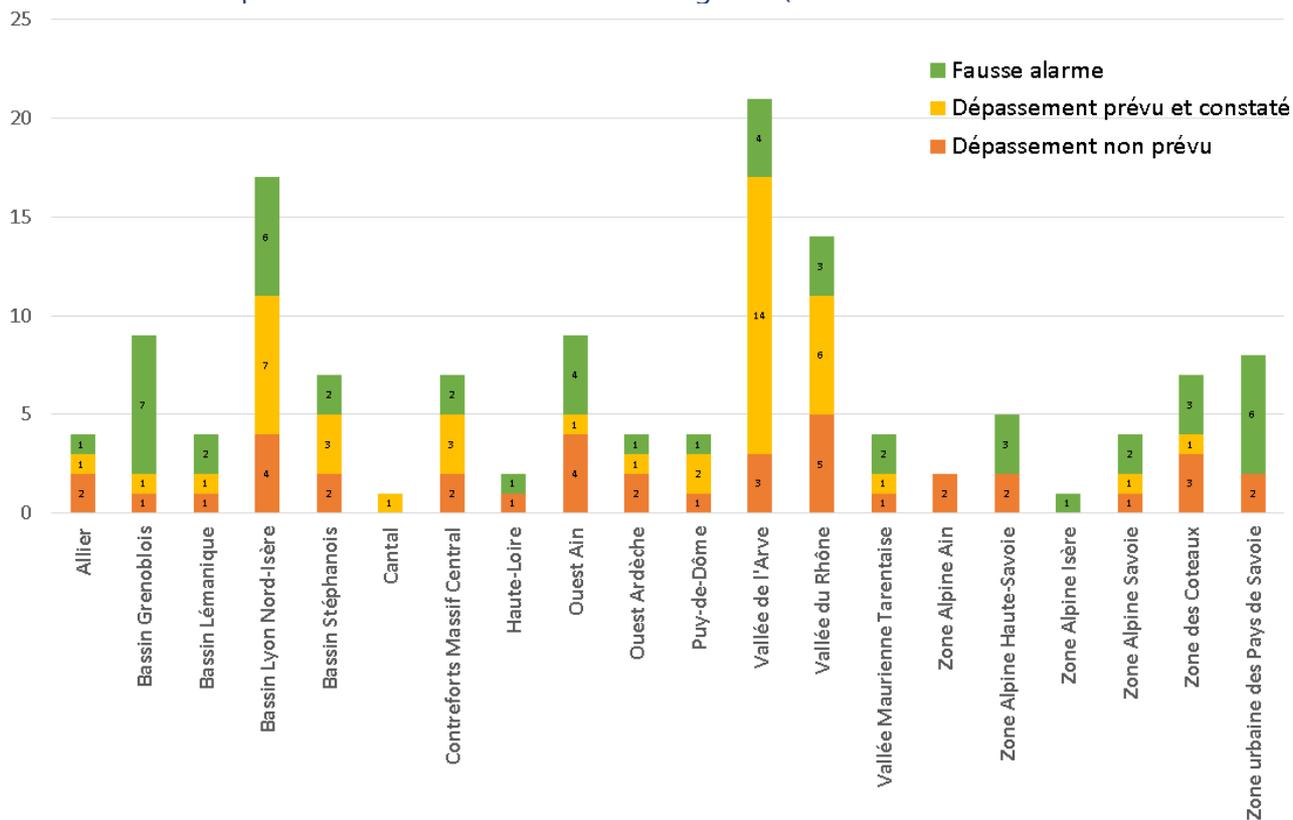


Figure 29 et Figure 30). Le comptage est effectué sans distinguer le type de dépassement de seuil (de recommandation ou d'alerte). L'étude de performance est réalisée pour les prévisions du jour-même (J0) et les prévisions de lendemain (J+1). Il convient de rappeler que le calcul de pourcentage est peu représentatif lorsque le nombre de dépassements est très faible. La Figure 30 illustre un nombre de dépassements beaucoup plus élevés pour les particules par rapport à celui

de l'ozone (

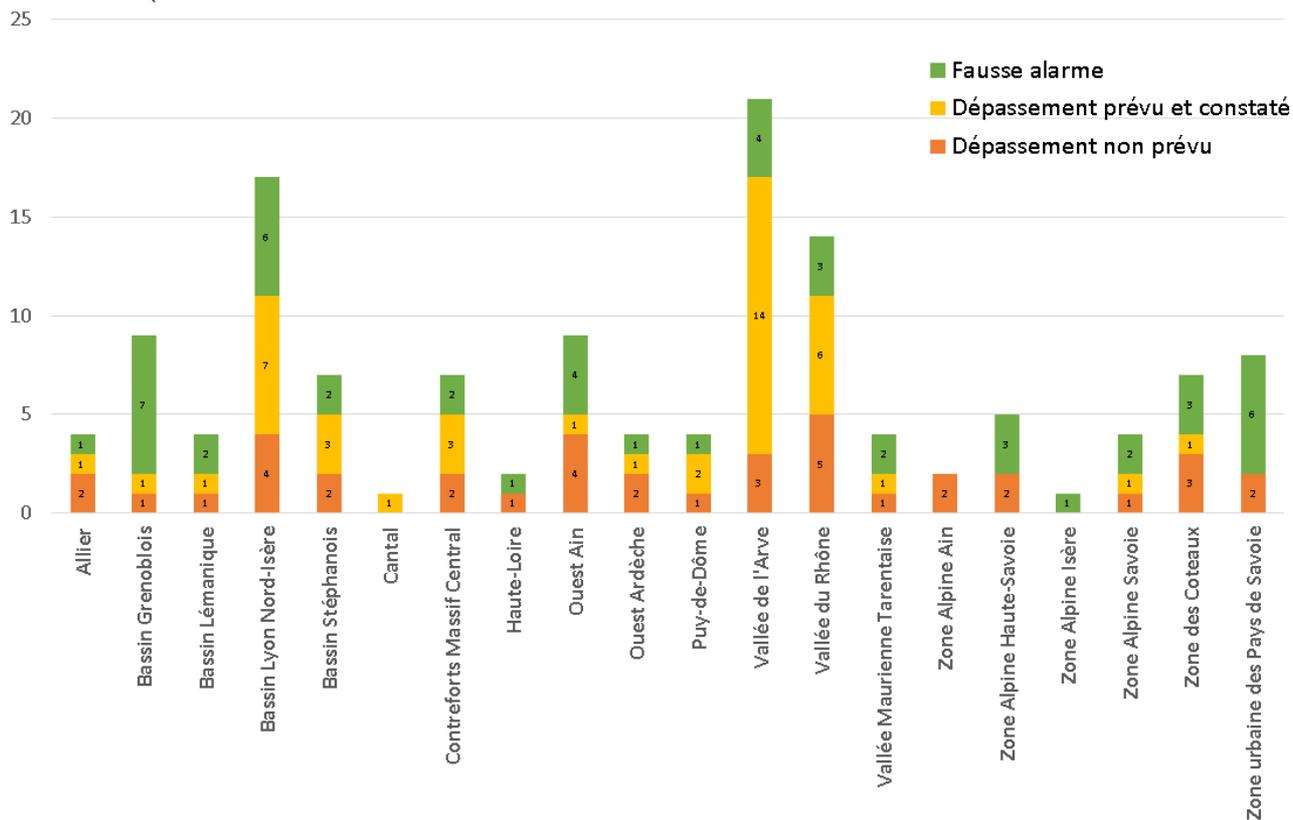


Figure 29 et Figure 30). Le nombre relativement élevé de dépassements « fausse alarme » reflète la mise en vigilance par précaution lorsque les niveaux s'approchent des seuils d'activation, ceci afin de limiter le nombre d'évènements non prévus. A noter que le système de prévisions réalise une majorité de dépassements prévus et constatés. Les prévisions « non confirmées » se situent systématiquement en début et fin d'épisode (difficulté à cerner les bornes des épisodes). Cependant, les niveaux atteints lors de ces journées sont souvent proches du seuil d'activation. Il s'agit là d'un effet de la sous-estimation que réalise le système de prévision dans les valeurs de concentrations proche du seuil de réglementation de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

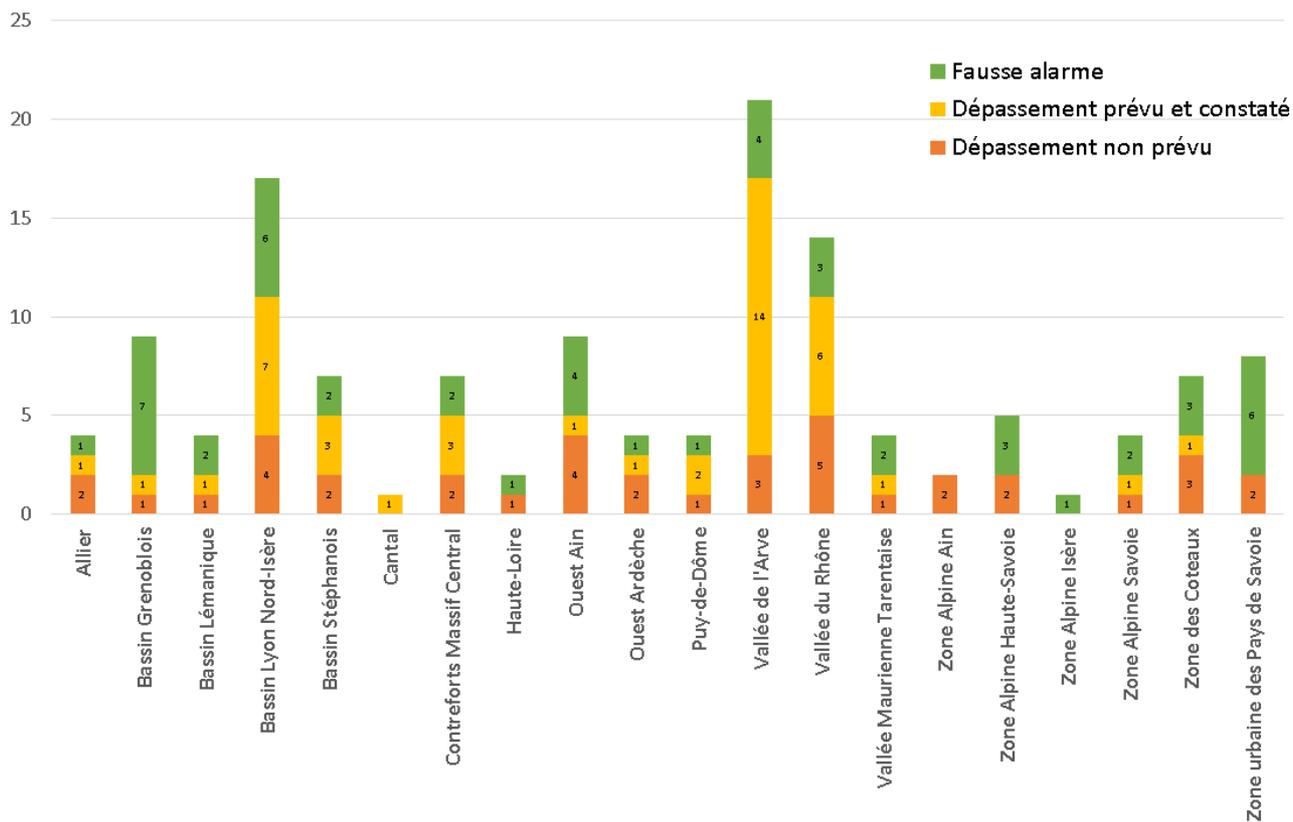


Figure 29 : PM10 - Table de contingence des critères AMU (critères surfaciques et de population confondus) sur toute l'année 2022 à l'échéance J0.

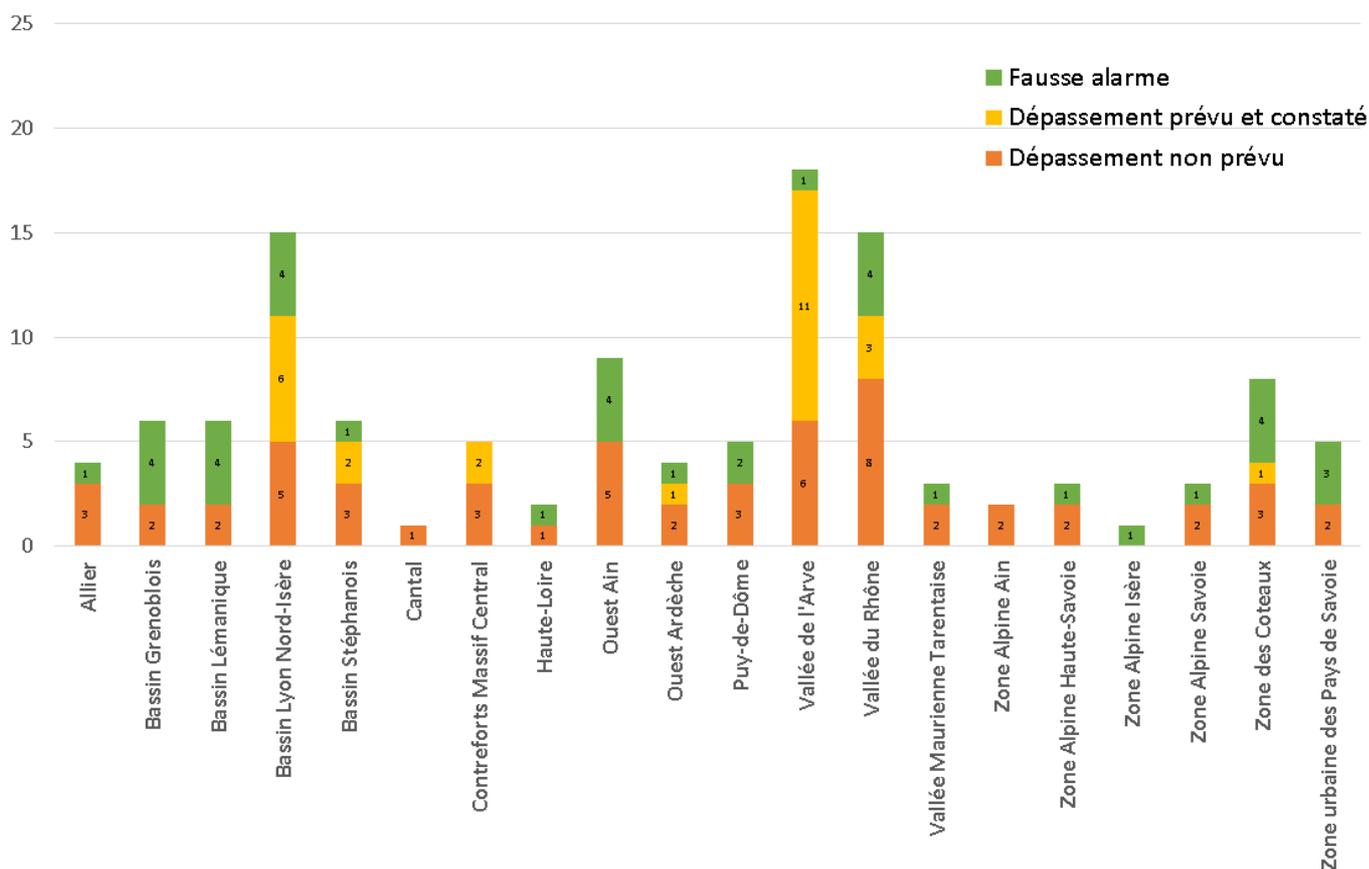


Figure 30 : PM10 - Table de contingence des critères AMU (critères surfaciques et de population confondus) sur toute l'année 2022 à l'échéance J+1.

4. Conclusion

Dans ce rapport a été étudiée la performance à différentes étapes du système de prévision de la qualité de l'air d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes : résultats fournis par le modèle brut, résultats adaptés statistiquement et résultats expertisés par les prévisionnistes.

Selon les valeurs de références proposées par le référentiel technique national pour l'évaluation des performances des prévisions de la qualité de l'air, les résultats expertisés du système de prévision sont satisfaisants pour les concentrations journalières en PM₁₀ et en ozone. Les valeurs des indicateurs sont contenues dans la plage considérée comme acceptable, voire même proches des valeurs idéales. Ce constat est valable pour l'échéance J0 comme pour l'échéance J+1, la première présentant naturellement de meilleurs résultats.

L'analyse effectuée montre que les résultats bruts ont tendance à sous-estimer les concentrations en particules fines tandis que les résultats adaptés et expertisés tendent à les surestimer. Concernant l'ozone, les sorties des modèles Adapstat et Carine présentent également des concentrations plus élevées que le modèle brut et restent ainsi globalement légèrement surestimées. Ce constat reste toutefois dépendant de la concentration modélisée : pour les PM₁₀ comme pour l'ozone, l'ensemble des modèles tend à surestimer les faibles concentrations et sous-estimer les fortes concentrations. Cela prend une importance particulière lorsque l'on approche les seuils réglementaires.

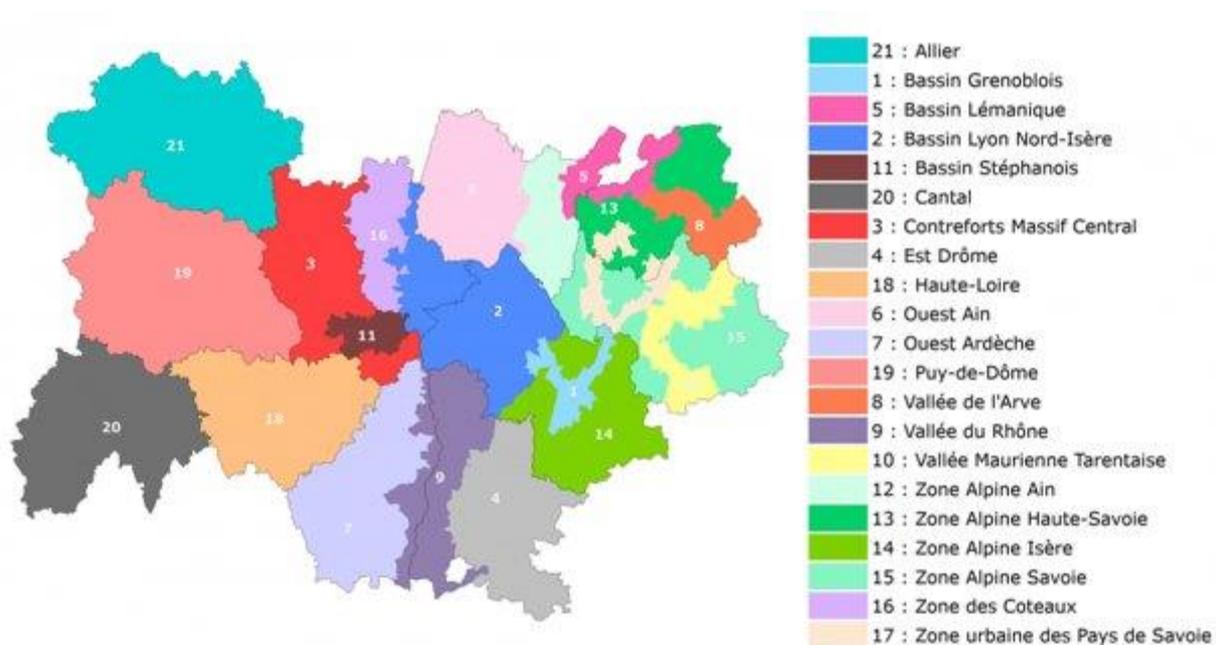
Les performances des résultats adaptés statistiquement et expertisés par les prévisionnistes sont globalement similaires. Cependant, en 2022, l'expertise humaine a apporté une amélioration dans les statistiques de prévision des dépassements de seuils pour l'O₃ (épisodes de pollution) pour J0 et J+1. Ce résultat est également observé dans une moindre mesure pour les PM₁₀. L'augmentation du nombre de bonnes détections se fait toutefois au prix d'un nombre relativement élevé de fausses alertes.

En 2022, la région Auvergne Rhône-Alpes a vu 32 jours avec une vigilance activée, cela en fait l'année avec l'un des plus faibles totaux de cette dernière décennie (53 jours en moyenne sur 10 ans, 34 jours en moyenne sur 5 ans). Le bassin lyonnais Nord-Isère et la vallée de l'Arve restent les territoires sur lesquels le plus grand nombre de vigilances atmosphériques ont été activées cette année (22 jours). Le taux de détection et le ratio de fausses alarmes ont été respectivement de 56% et 49% pour J0. A noter que près de 75% des journées ayant vu un jour de vigilance ont concerné un risque de dépassement des seuils réglementaires liés aux particules PM₁₀. Pour autant, même si les seuils réglementaires pour l'ozone n'ont pas été dépassés, des risques de dépassement de ces seuils ont été détectés pour le lendemain ou le surlendemain, entraînant la mise en place de vigilance sur les bassins d'air concernés pour les journées concernées.

En 2023, plusieurs travaux visant à améliorer la chaîne de prévision sont menés. Ils portent notamment sur le modèle lui-même (nouvelle version de CHIMERE), les données de bord (conditions aux limites de notre région) et les données d'émissions.

Annexe 1

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



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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

- **RMSE :** Root Mean Square 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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

- **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).