



Rapport de performances PREV'AIR 2022

Janvier 2024

Groupement d'intérêt scientifique



«L'expertise au service de la qualité de l'air»

Travaux réalisés par l’Ineris



dans le cadre du

Laboratoire Central de
Surveillance de la Qualité de l’Air

RAPPORT DE PERFORMANCES PREV’AIR 2022

Blandine RAUX (Ineris)
Frédéric MELEUX (Ineris)
Anthony UNG (Ineris)

*Vérification : MELEUX Frédéric (Ineris),
Approbation : COLETTE Augustin (Ineris), le :non*

Liste des personnes ayant participé à l’étude : RAUX Blandine, MELEUX Frédéric, UNG Anthony, COLETTE Augustin, COUVIDAT Florian (Ineris)

LE LABORATOIRE CENTRAL DE SURVEILLANCE DE LA QUALITÉ DE L'AIR

Le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air est un groupement d'intérêt scientifique constitué des laboratoires de l'IMT Nord Europe, de l'Ineris et du LNE. Il mène depuis 1991 des études et des recherches en appui au ministère chargé de l'environnement, et en concertation avec les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA). Ces travaux en matière de pollution atmosphérique ont été financés par la Direction Générale de l'Énergie et du Climat (bureau de la qualité de l'air). Ils sont réalisés avec le souci constant d'améliorer le dispositif de surveillance de la qualité de l'air en France en apportant un appui scientifique et technique au ministère et aux AASQA.

Un objectif important du LCSQA est de participer à l'amélioration de la qualité des mesures effectuées dans l'air ambiant, depuis le prélèvement des échantillons jusqu'au traitement des données issues des mesures, ainsi qu'à l'amélioration de la qualité des modélisations mises en œuvre dans les applications de prévision, de cartographie ou de scénarisation.

Ces actions sont menées dans le cadre des réglementations nationales et européennes mais aussi dans un cadre plus prospectif destiné à fournir aux AASQA de nouvelles données permettant d'anticiper les évolutions futures.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	5
ABSTRACT	7
REMERCIEMENTS ET COLLABORATIONS	8
1. INTRODUCTION	9
2. PERFORMANCES DES PRÉVISIONS DE QUALITÉ DE L’AIR POUR 2022	11
2.1 Prévisions d’ozone.....	12
2.1.1 Performances du modèle.....	13
2.1.2 Performances par rapport aux seuils règlementaires.....	16
2.1.3 Performances en lien avec les critères AMU	18
2.1.4 Evolution des prévisions depuis 2019.....	19
2.2 Prévisions de PM ₁₀	21
2.2.1 Performances du modèle.....	21
2.2.2 Performances par rapport aux seuils règlementaires.....	25
2.2.3 Performances en lien avec les critères AMU	28
2.2.4 Evolution des prévisions depuis 2019.....	30
2.3 Prévisions de PM ₂₅	31
2.3.1 Performances du modèle.....	31
2.3.2 Evolution des prévisions depuis 2019.....	34
2.4 Prévisions de NO ₂	35
2.4.1 Performances du modèle.....	35
2.4.2 Performances par rapport aux seuils règlementaires.....	38
2.4.3 Evolution des prévisions depuis 2019.....	39
2.5 Evaluation de la composition chimique des PM ₁ (CARA).....	40
3. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	43
4. GLOSSAIRE	45
5. LISTE DES ANNEXES	47
Annexe 1 – L’adaptation statistique dans Prev’Air.....	49
Annexe 2 – Eléments de table de contingence	51
Annexe 3 – Scores statistiques classiques	53
Annexe 4 – Liste des figures	54
Annexe 5 – Figures additionnelles.....	57

RÉSUMÉ

Ce rapport présente les performances des prévisions nationales opérées dans le cadre de la plateforme Prev'Air (www.prevair.org) pour l'année 2022. L'objectif est de montrer des éléments d'appréciation de la qualité de la production Prev'air. Ce rapport traite successivement de l'évaluation des prévisions des concentrations des quatre polluants O₃, NO₂, PM₁₀ et PM_{2.5}, fournis quotidiennement par le système Prev'Air, du jour courant J jusqu'au J+3. L'estimation du comportement des outils est réalisée grâce à des indicateurs statistiques qui permettent de comparer les résultats de modélisation avec les observations validées de la base de données nationale GEOD'air, elle-même alimentée par les AASQA (associations agréées de surveillance de la qualité de l'air) et développée par le LCSQA.

Une attention particulière est portée à l'évaluation des performances de Prev'Air concernant la détection des seuils réglementaires. Cet exercice a pour objectif d'estimer l'aptitude des modèles à prévoir spécifiquement les épisodes de pollution.

L'ozone est évalué sur les mois de l'été 2022 (avril à septembre). Les autres polluants (PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂) sont évalués sur l'ensemble de l'année 2022.

L'année 2022 a connu peu d'épisodes de pollution persistants d'ampleur nationale. L'évaluation de ces épisodes est effectuée à la fois sur les prévisions brutes de Prev'Air et sur les prévisions avec adaptation statistique, qui visent à corriger les biais systématiques du modèle brut par un processus d'apprentissage historique. Cette prévision corrigée statistiquement sert généralement de référence à l'expertise de l'équipe Prev'air pour la communication en cas d'épisode de pollution de l'air, et sert également de base aux calculs du module AMU, qui vérifie les critères de l'arrêté mesure d'urgence¹.

Les prévisions Prev'Air pour les DROM des caraïbes ont également été évaluées. Les prévisions sur les DROM de l'océan Indien, produites à partir de mai 2022, seront évaluées à compter de 2024 (rapport de performances portant sur l'année 2023).

Dans l'ensemble, le comportement de Prev'Air est satisfaisant avec une bonne aptitude à respecter les objectifs de qualité définis dans le référentiel technique national², qui a établi ces valeurs cibles pour les différents scores concernant l'ozone et les PM₁₀ ainsi que le contenu à faire figurer dans les rapports annuels d'évaluation des plateformes de prévisions constituant le référentiel technique national. Les prévisions avec adaptation statistique disponibles sur la métropole respectent les objectifs de performance et ont permis la plupart du temps d'anticiper l'occurrence des épisodes de pollution et d'identifier les principales zones affectées. Les prévisions brutes rencontrent plus de difficultés à satisfaire les objectifs de qualité, notamment dans les DROM.

La composition chimique des particules (PM₁) prévue par Prev'air a été évaluée avec l'aide des données CARA³. La part d'ammonium, de nitrates, de sulfates et de matière organique est un peu moins bien représentée dans la spéciation des PM₁ qu'en 2021.

¹ Arrêté du 7 avril 2016 relatif au déclenchement des procédures préfectorales en cas d'épisodes de pollution de l'air ambiant

² <https://www.lcsqa.org/fr/referentiel-technique-national>

³ Favez et al. (Atmosphere, 2021) CARA program

ABSTRACT

This report presents the performances in 2022 of the national forecasts carried out within the Prev'Air platform (www.prevair.org). The objective is to assess the quality of Prev'air production. This report deals successively with the evaluation of the O₃, NO₂, PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations forecasts, daily provided by the Prev'Air system, from day D to D+3. The behavior of this system is estimated using conventional statistical indicators, which allow the modelling results to be compared with validated observations from the national GEOD'air database, itself fed by the AASQA (accredited air quality monitoring associations) and developed by the LCSQA.

Particular attention is paid to the evaluation of Prev'Air's forecasts regarding the detection of regulatory thresholds. The objective of this exercise is to estimate the capacity of the models to specifically anticipate pollution episodes.

Ozone is evaluated over the summer months of 2022 (April to September). The other pollutants (PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂) are assessed over the whole year 2022.

Few persistent episodes of national scope were noted during 2022. The evaluation of these episodes is carried out both on Prev'Air's raw forecasts and on the statistical adaptation of CHIMERE which aims at correcting the systematic biases of the raw model through a historical learning process. This statistically corrected forecast generally serves as a reference to the expertise of the Prev'air team for communication in the event of an air pollution episode. It is also a base for the calculations of the AMU module, which checks the criteria of the emergency measure decree⁴.

The Prev'air forecasts for the Caribbean DROMs have been assessed as well. The forecasts for the Indian Ocean overseas territories, produced from May 2022, will be evaluated from 2024 (performance report covering the year 2023).

On the whole, the performance of Prev'Air is satisfactory with a good ability to meet the quality objectives defined in the national technical reference document⁵ which established these target values for the different scores for ozone and PM₁₀ as well as the content to be included in the annual evaluation reports of the forecasting platforms involved in the national air quality monitoring system. The forecasts with statistical adaptation match the performance objectives and have mostly allowed to anticipate the occurrence of pollution episodes and to identify the main affected areas. Raw forecasts are less satisfactory to comply with the quality objective, particularly in the DROM.

The composition of PM₁ predicted by Prev'air was assessed using CARA⁶ data. Ammonium, nitrates, sulphates and organic part are predicted less accurately than in 2021.

⁴ Decree of 7 April 2016 relating to the triggering of prefectural procedures in the event of episodes of ambient air pollution

⁵ <https://www.lcsqa.org/fr/referentiel-technique-national>

⁶ Favez et al. (Atmosphere, 2021) CARA program

REMERCIEMENTS ET COLLABORATIONS

La plateforme Prev'air est coordonnée par l'Ineris avec le soutien du Ministère chargé de l'Environnement. Le consortium est constitué de l'Ineris, de Météo-France, du CNRS et du LCSQA.

Le consortium Prev'Air remercie l'ensemble des personnes qui chaque jour nous permettent d'améliorer le système, que ce soient les développeurs des modèles CHIMERE et MOCAGE, les utilisateurs membres des AASQA, les membres du LCSQA, et de tous les organismes qui utilisent régulièrement ou occasionnellement les produits Prev'Air dans leurs travaux.

Prev'Air remercie Météo France pour le développement et la mise à disposition de l'outil d'évaluation statistique Evaltools.

Prev'Air remercie également ECMWF et les Services Copernicus de Surveillance de l'Atmosphère (CAMS) pour la fourniture des données alimentant le système.

1. INTRODUCTION

La plateforme Prev'air est coordonnée par l'Ineris avec le soutien du Ministère chargé de l'Environnement. Le consortium est constitué de l'Ineris, de Météo-France, du CNRS et du LCSQA.

Quotidiennement depuis 2003, Prev'Air fournit des analyses et des prévisions de qualité de l'air en France en modélisant les concentrations des principaux polluants atmosphériques réglementés (ozone, dioxyde d'azote, particules fines), pour la veille (J-1), le jour même (J0) et les trois jours à suivre (J1, J2 et J3). Ces prévisions sont établies sur la base des modèles de chimie-transport CHIMERE (CNRS/INERIS) et MOCAGE (Météo-France). MOCAGE fournit des prévisions en France métropolitaine ; CHIMERE fournit également des prévisions sur les départements et régions d'outre-mer (DROM).

La récupération des données d'observations en temps quasi réel, ainsi que des calculs additionnels de post-traitement statistique, viennent affiner la qualité des prévisions Prev'air. A l'échéance J-1, le processus est une « Analyse ». Pour les échéances J0 à J3, le processus est dit « d'Adaptation Statistique ». Ces deux processus permettent d'améliorer la qualité des sorties brutes de modèle pour établir les cartographies de référence de Prev'Air publiés sur le site web www.prevoir.org. Ces produits sont utilisés comme meilleure représentation de la répartition de la pollution en surface et estiment les zones en dépassement des seuils réglementaires de qualité de l'air. Ils servent à l'équipe Prev'Air pour réaliser ses missions, parmi lesquelles l'expertise des niveaux de concentrations des polluants afin d'alerter et de communiquer en cas de survenue d'un épisode de pollution.

Ce rapport traite de l'évaluation des performances du système Prev'Air pour l'année 2022 et répond au besoin de contrôle qualité sur l'aptitude des systèmes de modélisation à estimer et prévoir la qualité de l'air. Cette analyse est menée chaque année sur les produits fournis en temps réel par le système. Elle porte non seulement sur l'évaluation des données publiées sur le site Prev'Air (issues du processus d'adaptation statistique), mais aussi sur l'évaluation des simulations brutes des deux modèles de référence de Prev'Air : CHIMERE, sur lequel reposent actuellement les prévisions et le post-traitement statistique dont les cartes sont diffusées sur la page d'accueil du site web www.prevoir.org, et MOCAGE, le modèle de qualité de l'air développé par Météo-France. Les résultats bruts constituent le socle scientifique du système et sont essentiels lors de l'expertise des épisodes de pollution.

Notons qu'un changement de version de CHIMERE a eu lieu mi-novembre 2021 avec le passage à la version 2020, ainsi qu'une mise à jour de l'adaptation statistique. L'impact de ces changements était encore très dilué dans les performances de l'année 2021, et devient plus visible dans les performances pour 2022.

Des travaux ont également été menés par l'équipe de développement de MOCAGE afin d'améliorer les performances du modèle, avec un effet notable en 2022.

Pour chaque polluant, ce rapport s'intéresse dans un premier temps aux performances globales des modèles bruts et de l'adaptation statistique sur la France, avant d'étudier de manière plus approfondie leurs comportements vis-à-vis de la détection de dépassements de seuils réglementaires et de la qualité de l'évaluation des critères définis dans l'arrêté mesures d'urgence AMU (Arrêté du 7 avril 2016⁷). Une comparaison des performances sur plusieurs années est également réalisée pour conclure la discussion.

Ce rapport est complété par une évaluation comparant la composition des PM₁ (Cl, NO₃, NH₄, SO₄ et Organique) établie par CHIMERE et les données d'observation relevées dans le cadre du programme CARA⁸.

⁷ Arrêté du 7 avril 2016 relatif au déclenchement des procédures préfectorales en cas d'épisodes de pollution de l'air ambiant - JORF n° 0084 du 09/04/2016

⁸ Favez et al. (Atmosphere, 2021) CARA program

2. PERFORMANCES DES PRÉVISIONS DE QUALITÉ DE L'AIR POUR 2022

Dans le contexte de ce rapport, la notion de « performance » est basée sur des comparaisons mesures-modèles. Son appréciation pour chaque modèle repose sur des indicateurs classiques de scores statistiques (biais moyen, erreur quadratique moyenne (RMSE), corrélation ; voir Annexe 3 pour une définition précise de ces scores), de tableaux de contingence et de séries temporelles. Ces informations peuvent être déclinées par typologie de station ou par région afin d'affiner l'évaluation.

Les objectifs de qualité⁹ à respecter pour les scores statistiques de l'ozone et des PM₁₀ sont détaillés dans le Tableau 1 ci-dessous :

Polluant	Biais (µg/m ³)	RMSE (µg/m ³)	Corrélation
O ₃	-10/+10	25	0,7
PM ₁₀	-7,5/+7,5	15	0,6

Tableau 1 : Objectifs de qualité définis pour O₃ et PM₁₀ pour le biais, la RMSE et la corrélation

L'analyse du comportement des modèles vis-à-vis de la détection des dépassements des seuils réglementaires s'appuie sur les définitions de l'article R. 221-1 du Code de l'environnement. Les principales mesures considérées sont résumées dans le Tableau 2 ci-dessous :

	Seuil d'information et de recommandation	Seuil d'alerte
PM ₁₀	50 µg/m ³ en moyenne journalière	80 µg/m ³ en moyenne journalière
O ₃	180 µg/m ³ en moyenne horaire	240 µg/m ³ en moyenne horaire
NO ₂	200 µg/m ³ en moyenne horaire	400 µg/m ³ en moyenne horaire pendant 3 heures consécutives

Tableau 2 : Critères nationaux de qualité de l'air

D'autre part, l'arrêté du 7 avril 2016 relatif au déclenchement des procédures préfectorales en cas d'épisodes de pollution de l'air ambiant (« Arrêté Mesures d'Urgence (AMU) ») prévoit que le déclenchement des procédures préfectorales se fasse non seulement sur le constat de dépassement aux stations, mais également sur la base des prévisions des concentrations de fond. Des critères sur la surface concernée, le nombre d'habitants exposés, et la persistance des dépassements définissent alors les épisodes de pollution, et leur intensité détermine les procédures à mettre en œuvre.

Le critère surfacique est validé dès que la surface régionale présentant des concentrations au-dessus du seuil réglementaire est supérieure à 100 km².

Le critère population est validé lorsque le nombre d'habitants exposés à des concentrations supérieures au seuil réglementaire est de plus de 50 000 dans les départements de moins de 500 000 habitants, ou de plus de 10% de la population totale du département sinon.

⁹ D'après les conclusions du GT prévision (LCSQA) sur l'évaluation des plateformes de prévision de qualité de l'air, <https://www.lcsqa.org/fr/referentiel-technique-national>.

2.1 Prévisions d'ozone

Pour l'ozone (O_3), l'évaluation est volontairement focalisée sur la période estivale d'avril à septembre. La période hivernale est exclue de l'évaluation car le cycle saisonnier est fortement marqué et peut fausser les scores relativement à la période d'intérêt, c'est-à-dire la période estivale, où les concentrations sont les plus élevées et donc les plus propices aux épisodes de pollution. L'été, le rayonnement solaire, les températures élevées, ainsi que les vents faibles, favorisent la formation d'ozone à partir des émissions d'oxydes d'azote et de composés organiques volatils.

Pour l'analyse des épisodes d'ozone, l'indicateur réglementaire considéré est le seuil d'information de $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne horaire. Seul le maximum journalier d'ozone est ainsi considéré dans les figures de cette partie, étant le plus représentatif des effets sanitaires relatifs à ce polluant et permettant une comparaison directe avec le seuil d'information et de recommandation.

Le calcul des scores est réalisé avec les données de mesure validées de la base de données nationale GEOD'AIR¹⁰, sur un panel de 289 stations de fond disponibles, réparties en 53 stations rurales, 87 stations périurbaines et 149 stations urbaines. Les départements et régions d'outre-mer (Guadeloupe, Martinique et Guyane) comptent 11 stations (6 urbaines, 4 périurbaines, 1 rurale).

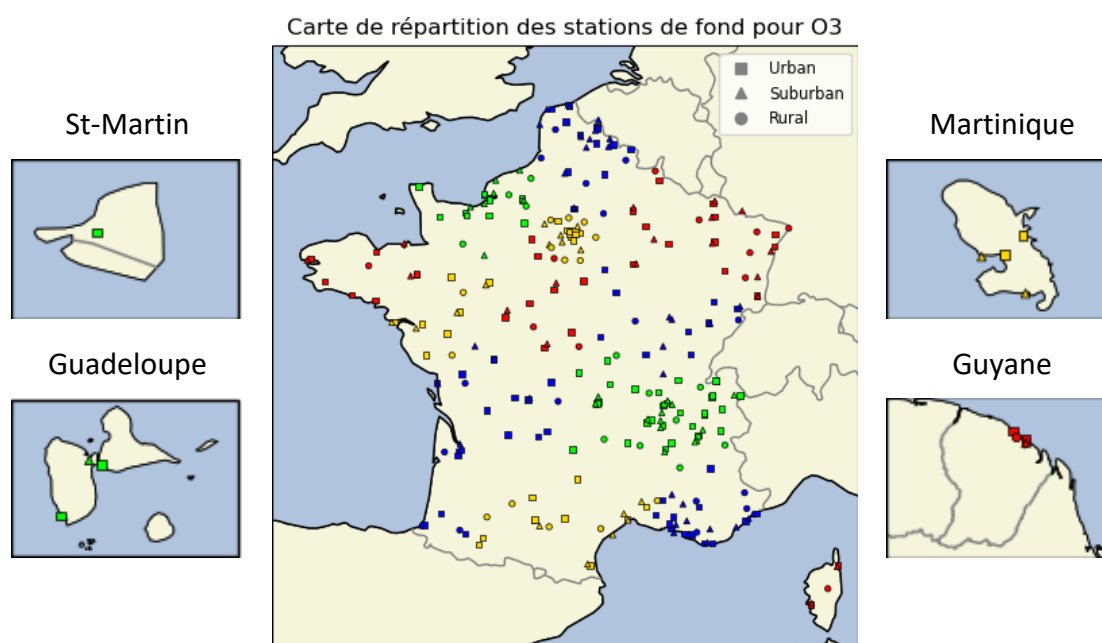


Figure 1 : Ozone – Carte de répartition des stations de fond (urbaines, périurbaines et rurales) pour l'année 2022 en France métropolitaine et dans les départements et régions d'outre-mer avec différenciation des régions par les couleurs

¹⁰ [Accueil | Geod'air : données et statistiques sur la qualité de l'air en France \(geodair.fr\)](#)

2.1.1 Performances du modèle

Les Figure 2, Figure 3 et Figure 4 présentent des scores de biais, RMSE et corrélation pour l’ozone pour les modèles CHIMERE (CHI) et MOCAGE (MOCA) ainsi que pour l’adaptation statistique de CHIMERE (AS-CHI) pour le jour de prévision J0. Les scores pour les stations des DROM ne sont calculés que pour le modèle CHIMERE brut (CHI).

La Figure 2 décline ces scores sur les régions administratives, le premier groupe de barres, à l’extrême gauche, correspondant aux scores sur l’ensemble des stations françaises.

La Figure 5 présente ces scores sur les jours de prévision J0, J1, J2, J3 correspondant respectivement au jour courant, lendemain, au surlendemain et au sur-surlendemain.

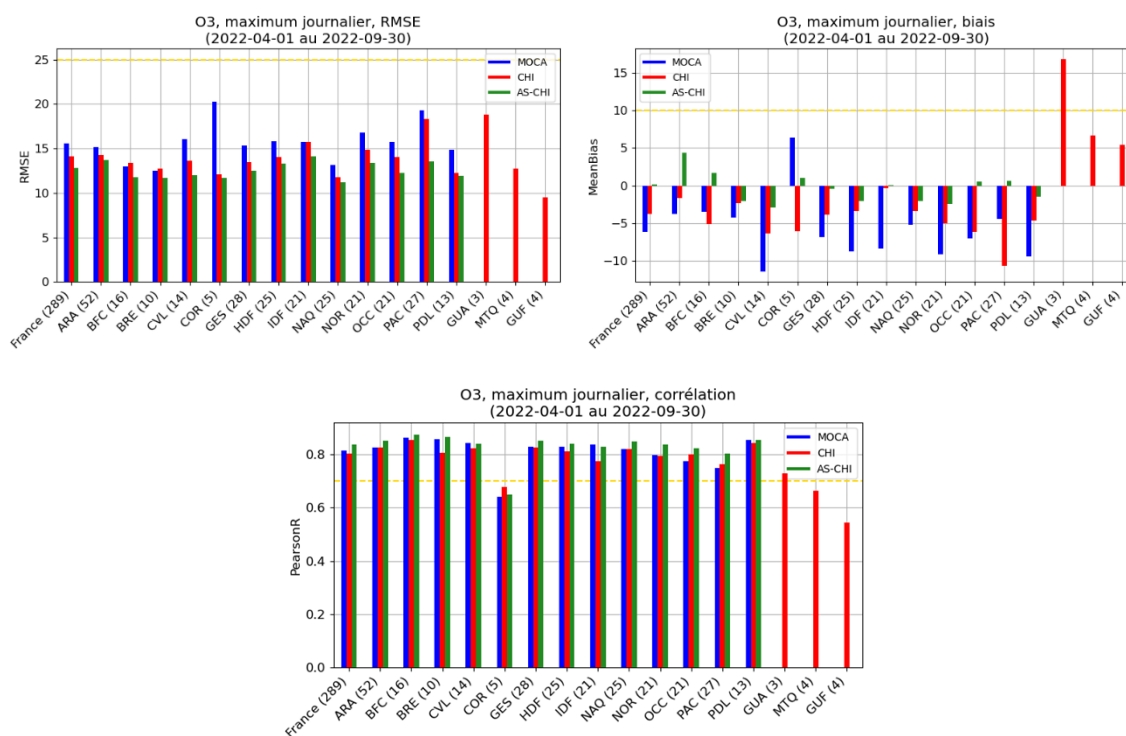


Figure 2 : Ozone - Scores de RMSE, biais et corrélation par région des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l’adaptation statistique de CHIMERE (vert) d’avril à septembre 2022 sur l’échéance J0. Les objectifs de qualité sont indiqués par les lignes horizontales oranges.

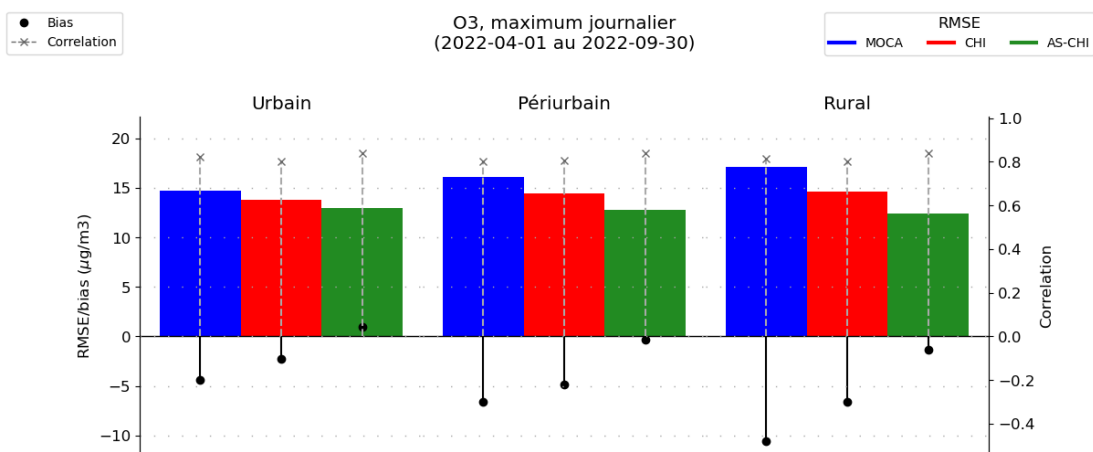


Figure 3 : Ozone - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction de la typologie de station (urbaines, périurbaines, rurales) des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) d'avril à septembre 2022 sur l'échéance J0

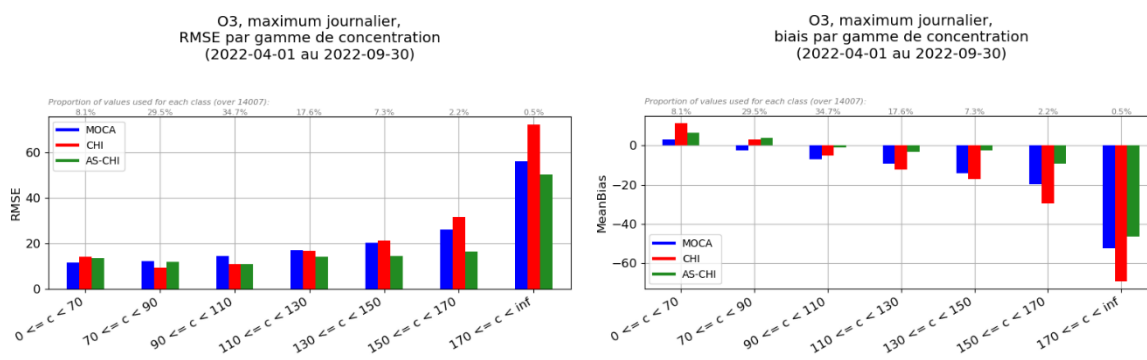


Figure 4 : Ozone - Scores de RMSE et biais par gamme de concentration des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) d'avril à septembre 2022 sur l'échéance J0

Moins de 70	70 à 90	90 à 110	110 à 130	130 à 150	150 à 170	Plus de 170
8,1%	29,5%	34,7%	17,6%	7,3%	2,2%	0,5%

Tableau 3 : Ozone – Proportion de valeurs utilisées pour le calcul de score de chaque gamme de concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Les principaux résultats que nous pouvons relever des Figure 2, Figure 3 et Figure 4 sont :

- Un biais négatif moyen sur la France de $-6,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour MOCAGE et $-3,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour CHIMERE, et positif de $0,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour l'AS.
- Une RMSE moyenne sur la France de $15,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour MOCAGE, $14,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour CHIMERE, et $12,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour l'AS.
- Une moyenne sur la France des corrélations temporelles aux stations de 0,82 pour MOCAGE, 0,8 pour CHIMERE, et 0,84 pour l'AS.
- Des scores très homogènes pour la RMSE et la corrélation entre les trois typologies de stations étudiées.

- Des performances « en J » selon les gammes de concentrations (observées), c'est-à-dire que les valeurs faibles et intermédiaires (jusqu'à 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) sont les mieux prévues, tandis que les performances des valeurs extrêmes hautes (supérieures à 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) sont dégradées.
- Une proximité des performances des prévisions sur toutes les régions à l'exception notamment de la Corse, où la RMSE et le biais de MOCAGE sont plus élevés et les corrélations des trois modèles sont plus faibles que dans les autres régions.

D'après la Figure 2, en moyenne sur la France à l'échéance J0, les deux modèles bruts et l'adaptation statistique respectent les objectifs de qualité pour l'ozone (biais inférieur à +10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en valeur absolue, RMSE inférieure à 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, corrélation supérieure à 0,7).

Le modèle MOCAGE s'avère bien plus performant pour l'ozone que les années précédentes, grâce à des corrections effectuées dans le modèle dans le courant de l'année 2022, portant notamment sur les vitesses de dépôt.

Quelques disparités régionales peuvent toutefois être constatées. Ainsi, les trois modèles montrent une corrélation d'environ 0,65 pour la Corse, bien en-deçà des corrélations obtenues pour les autres régions de métropole. C'est la seule région pour laquelle MOCAGE surestime encore les concentrations d'ozone, avec un biais positif de 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et une RMSE associée de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Concernant CHIMERE et son adaptation statistique, il apparaît que l'AS ne parvient pas à améliorer la corrélation du modèle brut pour la Corse, bien qu'elle en améliore toujours le biais et la RMSE.

Les concentrations d'ozone sur les DROM des Caraïbes (Guadeloupe, Martinique et Guyane) sont plus compliquées à prévoir. Seul CHIMERE brut est disponible pour ces régions. Le modèle surestime les concentrations avec un biais d'environ 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour la Martinique et la Guyane, et un fort biais de 17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour la Guadeloupe. Les RMSE suivent les mêmes tendances, bien qu'elles ne dépassent pas 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ces valeurs élevées comparées aux régions métropolitaines s'expliquent par des niveaux de concentration beaucoup plus faibles, comme le montrent les Figure 36 et Figure 37 présentant les moyennes des concentrations observées par région et le biais relatif moyen (Annexe 5 – Figures additionnelles). Quant aux corrélations, elles s'avèrent relativement bonnes et proches de l'objectif qualité pour la Guadeloupe et la Martinique (resp. 0,73 et 0,66), mais moins performantes pour la Guyane (0,54).

Comme montré sur la Figure 3, les performances sont homogènes entre les différentes typologies de stations. Seule la typologie rurale présente des performances légèrement dégradées que pour les deux autres cas pour les deux modèles bruts, avec une réduction du biais et de la RMSE.

Bien que satisfaisantes dans l'ensemble, les performances des modèles se dégradent fortement pour les concentrations d'ozone élevées (Figure 4), particulièrement pour CHIMERE, avec une large sous-estimation pour les concentrations au-delà de 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ qui augure des difficultés à détecter des dépassements des seuils réglementaires.

En ce qui concerne l'adaptation statistique, elle améliore presque systématiquement les résultats par rapport à CHIMERE, prouvant ainsi que ce traitement statistique reproduit mieux les évolutions et l'amplitude des concentrations modélisées que le modèle brut. Cette amélioration est également visible sur la Figure 4, où l'adaptation statistique limite la dégradation des scores pour les gammes de concentrations les plus élevées (supérieures à 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

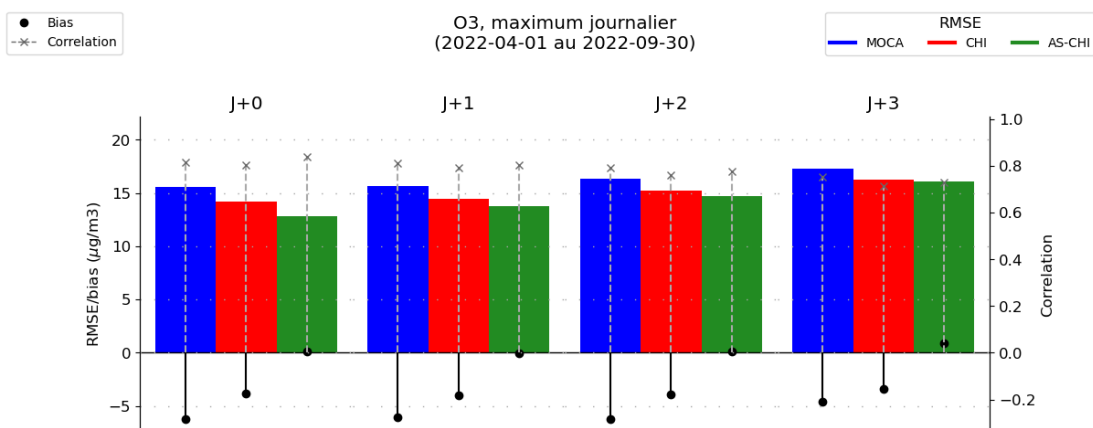


Figure 5 : Ozone - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction du jour de prévision pour MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et pour l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) d'avril à septembre 2022

Sur la Figure 5 qui fait état des scores des trois modèles en fonction du jour de prévision considéré, les modèles bruts ainsi que l'adaptation statistique montrent une tendance à une légère dégradation au fur et à mesure des échéances.

La dégradation s'opère progressivement, avec notamment 1 à 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ d'augmentation de la RMSE et une perte de 0,1 points de corrélation entre J0 et J3 pour tous les modèles.

L'adaptation statistique continue à améliorer les performances du modèle brut jusqu'à J3, contrairement aux années précédentes où une dégradation était visible dès J1. Cela s'explique par la mise à jour de l'AS fin 2021 à l'occasion du changement de version de CHIMERE, avec un entraînement réalisé sur des simulations couvrant une période récente de deux ans (2018 – 2019) possédant donc des performances très proches des prévisions opérationnelles produites par CHIMERE.

2.1.2 Performances par rapport aux seuils réglementaires

L'année 2022 a connu peu d'épisodes de pollution à l'ozone, et aucun d'ampleur nationale. Le seuil d'information et de recommandation a ainsi été dépassé occasionnellement du 15 au 18 juin et du 11 au 13 août dans la partie nord de la France, tandis que le sud a plutôt été concerné par des dépassements du 18 au 22 juillet.

Un total de 106 dépassements a été relevé par les mesures sur la période étudiée. Aucun dépassement n'a été détecté dans les DROM.

Les Figure 7 et Figure 8 font état de la capacité des modèles à détecter les dépassements du seuil d'information et de recommandation de 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Des explications détaillées à propos des indicateurs utilisés dans les Figure 6 et Figure 8 sont présentes dans [Annexe 2 – Eléments de table de contingence](#).

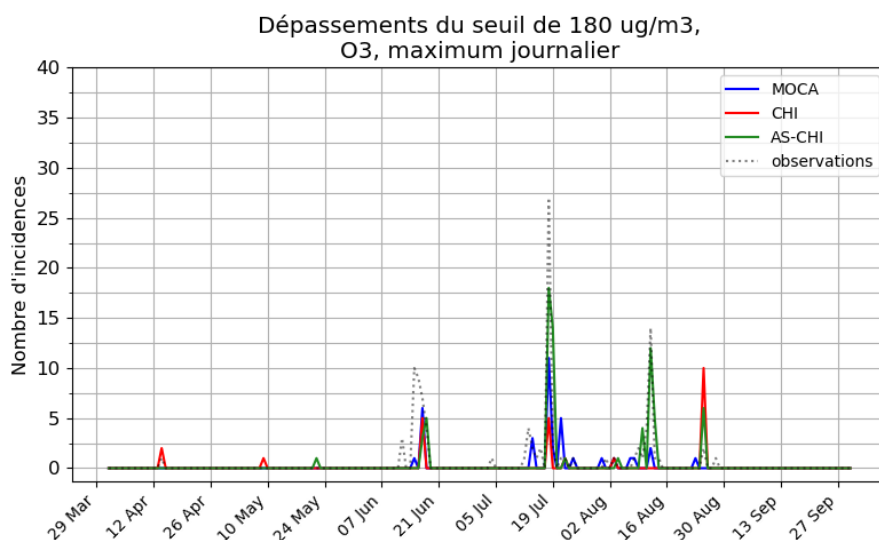


Figure 7 : Ozone - Nombre d'occurrences au cours du temps des dépassements du seuil d'information (180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) de MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) d'avril à septembre 2022 sur l'échance J0

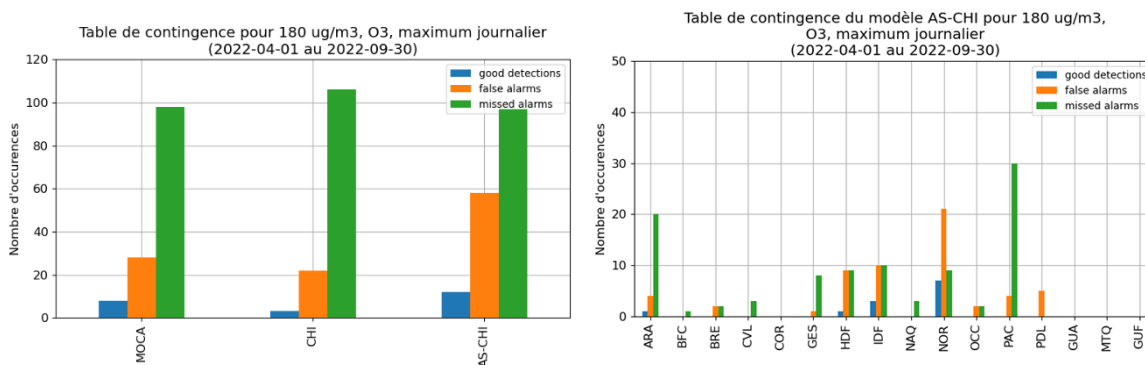


Figure 6 : Ozone - Tables de contingence sur la période d'avril à septembre 2022 à l'échance J0 pour le seuil de 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Les bonnes détections sont en bleu, les fausses détections en orange, et les détections manquées en vert. Gauche : Tables de contingence de MOCAGE (groupe de gauche), CHIMERE (groupe du milieu), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (groupe de droite) pour la France entière. Droite : Table de contingence de l'adaptation statistique de CHIMERE déclinée par région

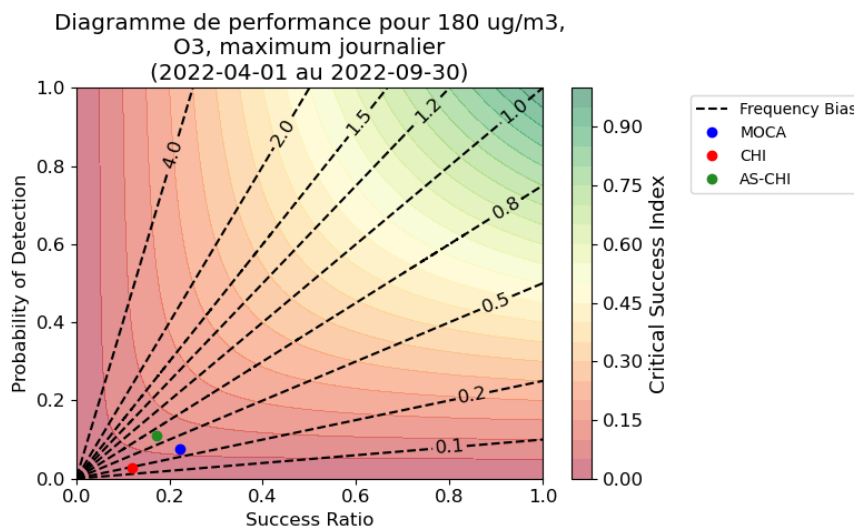


Figure 8 : Ozone - Diagramme de performance pour MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge) et l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) d'avril à septembre 2022 pour l'échéance J0

Ces figures permettent de distinguer deux comportements différents :

- CHIMERE et MOCAGE sous-estiment largement les fortes concentrations et n'ont réalisé que peu de détections sur la période, dont de nombreuses fausses.
- L'adaptation statistique améliore les prévisions des hautes concentrations d'ozone de CHIMERE, mais continue de les sous-estimer, elle a donc à peine plus de détections que le modèle brut.

Du point de vue des dépassements des seuils règlementaires, l'année 2022 a été très modérée et ne permet pas de tirer de véritables conclusions quant à la capacité des modèles à prévoir les épisodes de pollution.

2.1.3 Performances en lien avec les critères AMU

Comme évoqué en introduction de la section **Error! Reference source not found.**, l'arrêté du 7 avril 2016 relatif au déclenchement des procédures préfectorales en cas d'épisodes de pollution de l'air ambiant (« Arrêté Mesures d'Urgence (AMU) ») prévoit que les procédures préfectorales se déclenchent sur la base des prévisions des concentrations de fond, avec des critères sur la surface concernée, le nombre d'habitants exposés, et la persistance des dépassements.

L'ensemble du territoire ne pouvant être couvert par les stations de mesure, dont les mesures sont ponctuelles, c'est l'analyse de la veille (J-1) qui sert de référence pour évaluer les performances des prévisions réalisées par les modèles en regard des critères AMU. Etablie à partir d'une fusion de données entre observations et sorties de modélisation, elle est considérée comme le meilleur estimateur disponible de la répartition spatiale des concentrations d'ozone à la surface.

Seule l'AS du modèle CHIMERE est évaluée ici.

Table de contingence des prévisions O3 du module alerte de Prev'Air - 2022

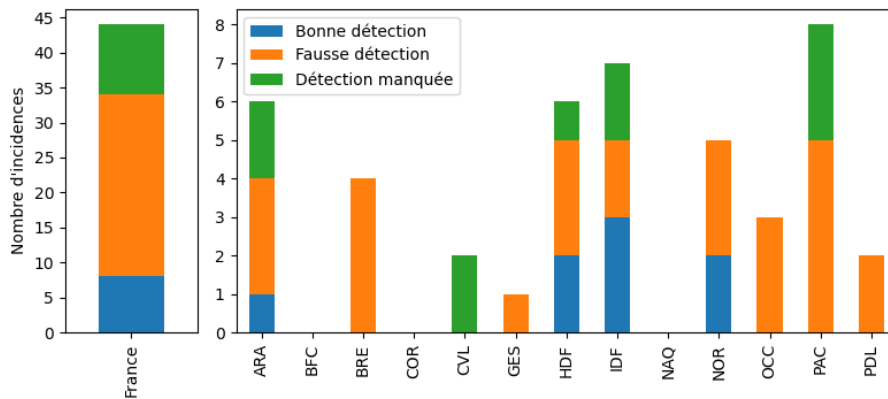


Figure 9 : Ozone - Table de contingence des critères AMU (critère surfacique et critère de population, sans distinction) pour l'AS de CHIMERE sur la période d'avril à septembre 2022 à l'échéance J0. Les bonnes détections sont en vert, les fausses détections en orange, et les détections manquées en bleu.

La Figure 9 confirme le comportement décrit dans le paragraphe 2.1.2. Le nombre de fausses détections (26) et de détections manquées (10) est relativement élevé par rapport au nombre d'évènements considéré (18), toutefois l'année 2022 ne présente que peu d'épisodes de pollution, ce qui peut fausser les conclusions quant à la capacité du modèle à détecter ces évènements.

2.1.4 Evolution des prévisions depuis 2019

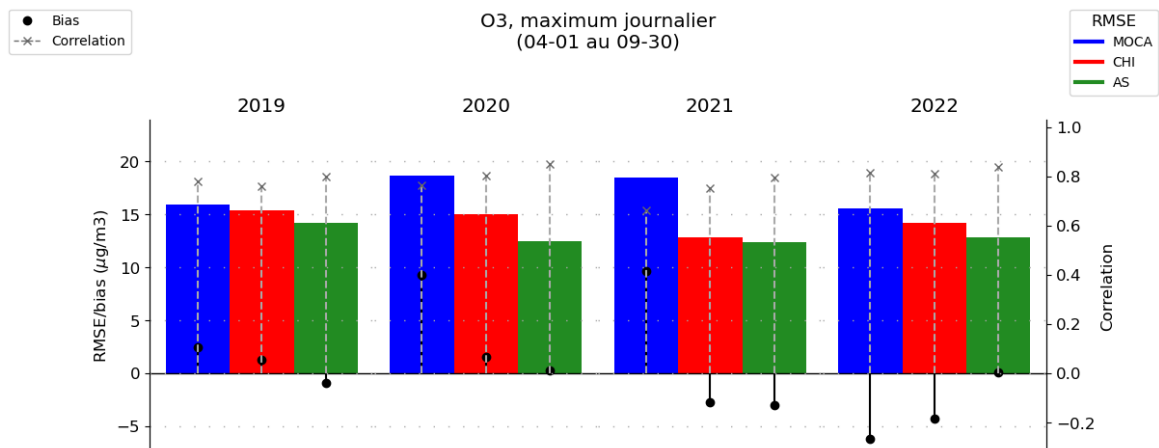


Figure 10 : Ozone - Synthèse des scores de RMSE (barres colorées), biais moyen (points noirs) et corrélation (pointillés gris) entre avril et septembre depuis 2019 pour MOCAGE, CHIMERE et son adaptation statistique

La Figure 10 montre des performances pour l'ozone assez stables depuis 2019 pour CHIMERE et pour son adaptation statistique, même si des fluctuations sont notables, comme l'amélioration de la RMSE de CHIMERE en 2021 et la légère dégradation cette même année du biais pour le modèle brut et l'adaptation statistique.

Quelle que soit l'année considérée, l'adaptation statistique améliore bien la concordance entre les données issues du modèle brut et celles des observations, confirmant ainsi l'intérêt d'utiliser ce modèle statistique.

Concernant MOCAGE, les raisons des baisses de performances constatées sur les étés 2020 et 2021 ont été identifiées et ont conduit l'équipe de développement MOCAGE à mener un certain nombre de travaux afin d'améliorer les performances du modèle, ce qui a permis une nette amélioration des scores en 2022 par rapport aux années précédentes.

2.2 Prévisions de PM₁₀

Pour les particules fines de diamètre inférieur à 10 µm (PM₁₀), l'évaluation est réalisée sur l'année complète, du 1^{er} janvier au 31 décembre. Il est toutefois à noter que les situations météorologiques propices aux épisodes de pollution en métropole se retrouvent majoritairement pendant les situations anticycloniques hivernales et printanières, lorsque les vents sont faibles (accumulation des particules, sans dispersion) et lorsque les températures sont soit extrêmement froides (hiver) soit avec des variations diurnes importantes (printanières avec des nuits froides et des journées plus douces) qui favorisent les émissions importantes de particules et de précurseurs de particules.

Pour l'analyse des épisodes de PM₁₀, l'indicateur réglementaire considéré est le seuil d'information de 50 µg/m³ en moyenne journalière. Seule la moyenne journalière de PM₁₀ est ainsi considérée dans les figures de cette partie.

Le calcul des scores est réalisé avec les données de mesure validées de la base de données nationale GEOD'AIR, sur un panel de 217 stations de fond disponibles, réparties en 24 stations rurales, 34 stations périurbaines et 159 stations urbaines. Les départements et régions d'outre-mer (Guadeloupe, Martinique et Guyane) comptent 11 stations (8 urbaines, 3 périurbaines).

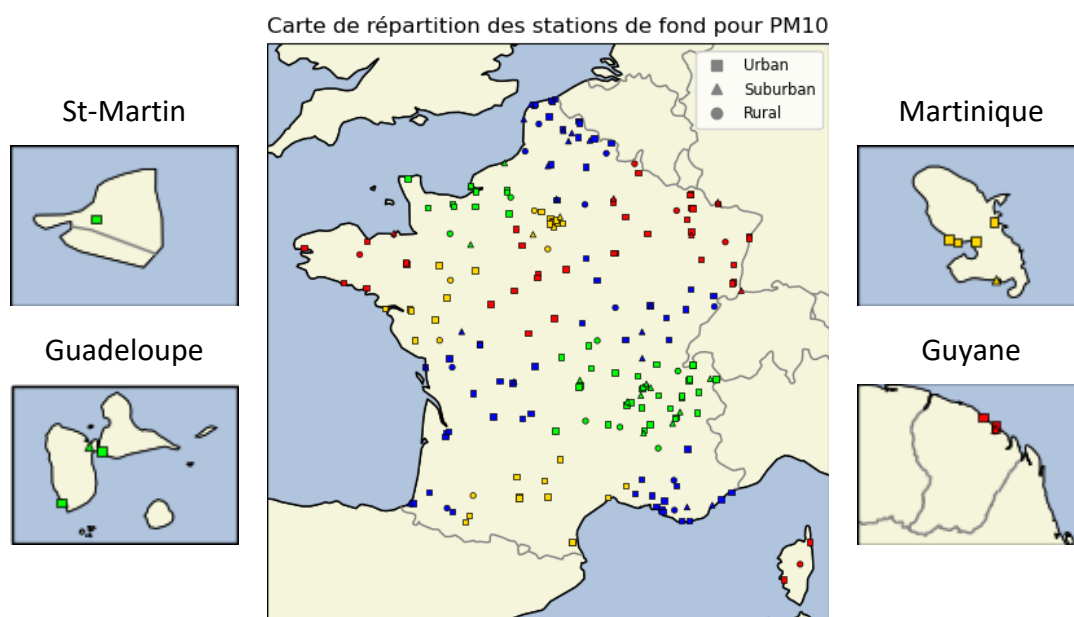


Figure 11 : PM₁₀ – Carte de répartition des stations de fond (urbaines, périurbaines et rurales) pour l'année 2022 en France métropolitaine et dans les départements et régions d'outre-mer avec différenciation des régions par les couleurs

2.2.1 Performances du modèle

Les Figure 12, Figure 13 et Figure 14 présentent pour les PM₁₀ les scores de biais, RMSE et corrélation pour les modèles CHIMERE (CHI) et MOCAGE (MOCA) ainsi que pour l'adaptation statistique de CHIMERE (AS-CHI) pour le jour de prévision J0. Les scores pour les stations des DROM ne sont calculés que pour le modèle CHIMERE brut (CHI).

La Figure 12 montre ces scores sur les régions administratives, le premier groupe de barres, à l'extrême gauche, correspondant aux scores sur l'ensemble des stations françaises.

La Figure 15 présente ces scores sur les jours de prévision J0, J1, J2, J3, correspondant respectivement au jour courant, au lendemain, au surlendemain et au sur-surlendemain.

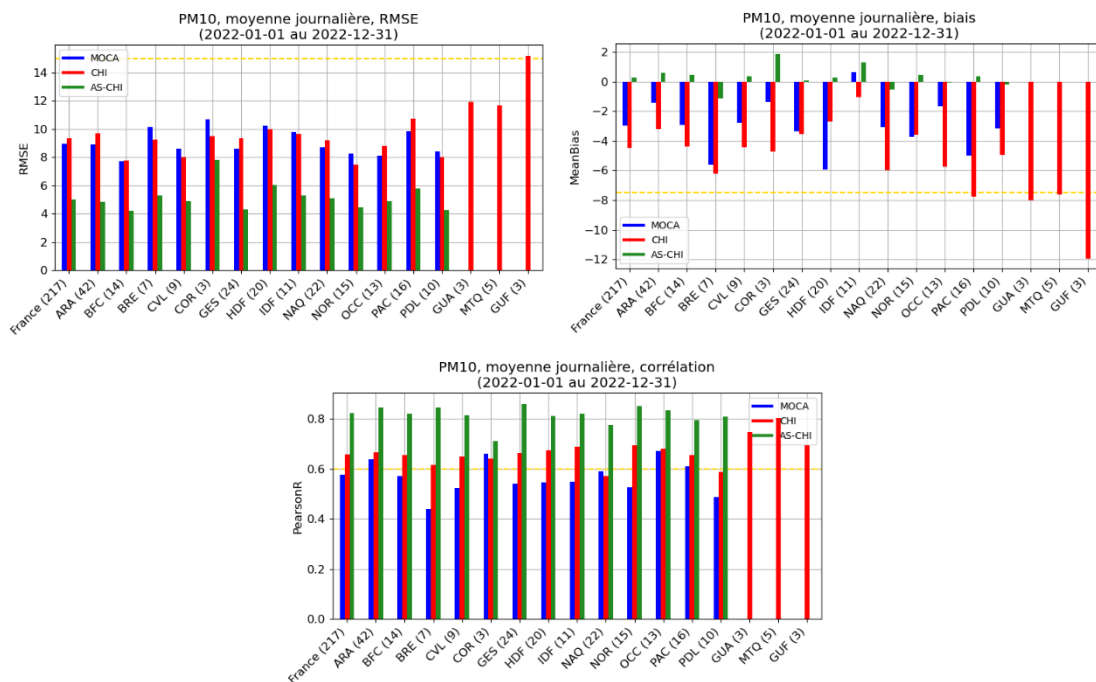


Figure 12 : PM₁₀ - Scores de RMSE, biais et corrélation par région des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2022 sur l'échéance J0

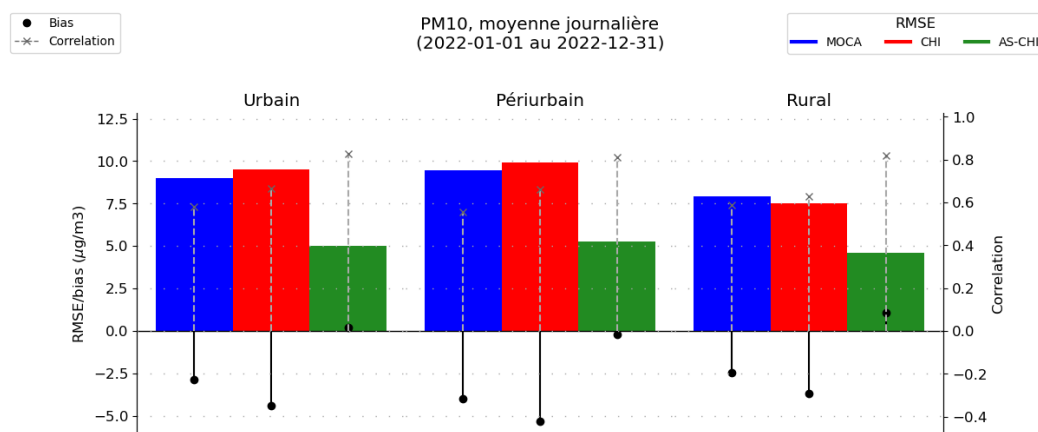


Figure 13 : PM₁₀ - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction de la typologie de station (urbaines, périurbaines, rurales) des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2022 sur l'échéance J0

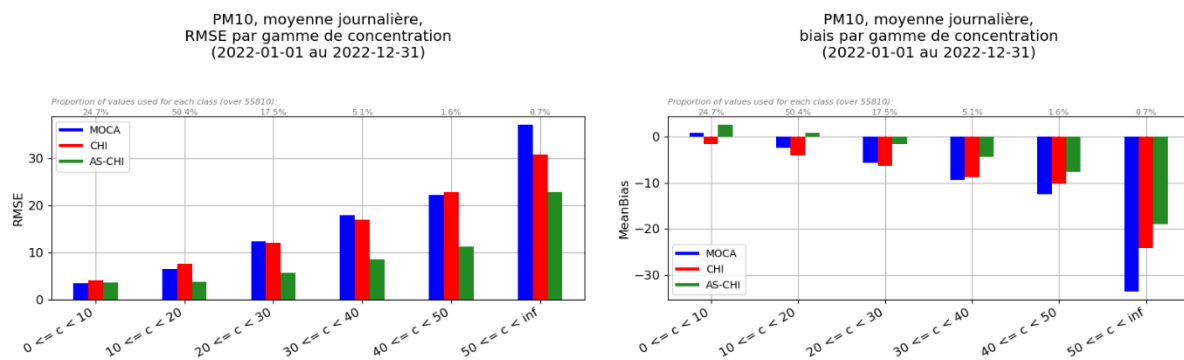


Figure 14 : PM_{10} - Scores de RMSE et biais par gamme de concentration des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2022 sur l'échéance J0

Moins de 10	10 à 20	20 à 30	30 à 40	40 à 50	Plus de 50
24,7%	50,4%	17,5%	5,1%	1,6%	0,7%

Tableau 4 : PM_{10} – Proportion de valeurs utilisées pour le calcul de score de chaque gamme de concentration ($\mu g/m^3$)

Les principaux résultats que nous pouvons relever des Figure 12, Figure 13 et Figure 14 sont :

- Un biais négatif moyen de $-3 \mu g/m^3$ pour MOCAGE et $-4,5 \mu g/m^3$ pour CHIMERE, et un biais positif moyen de $0,3 \mu g/m^3$ pour l'AS.
- Une RMSE globale de $8,8 \mu g/m^3$ pour MOCAGE, $9,4 \mu g/m^3$ pour CHIMERE, et $5 \mu g/m^3$ pour l'AS.
- Une corrélation globale de 0,58 pour MOCAGE, 0,66 pour CHIMERE, et 0,82 pour l'AS.
- De meilleurs scores pour la typologie rurale, par rapport aux autres typologies de station, en particulier pour les modèles bruts.
- Des scores satisfaisants sur les concentrations faibles à moyennes (inférieures à $30 \mu g/m^3$), qui se dégradent cependant pour les concentrations plus élevées.

D'après la Figure 12, en moyenne sur la France métropolitaine à l'échéance J0, les deux modèles et l'adaptation statistique respectent les objectifs qualité pour les PM_{10} sur la RMSE (inférieure à $15 \mu g/m^3$) et sur le biais (inférieur à $\pm 7,5 \mu g/m^3$).

Concernant la corrélation, les modèles bruts ont davantage de difficultés à atteindre le seuil de 0,6. MOCAGE y parvient uniquement pour les régions Auvergne-Rhône-Alpes, Corse, Occitanie et Provence-Alpes-Côte d'Azur, avec à l'inverse des corrélations qui tombent à environ 0,45 pour la Bretagne et les Pays de la Loire. Le modèle CHIMERE n'atteint pas l'objectif pour les régions Nouvelle-Aquitaine et Pays de la Loire, bien qu'il en soit proche. Néanmoins, le traitement de correction statistique qui est fait sur CHIMERE permet d'améliorer fortement les résultats : les corrélations de l'adaptation statistique se trouvent au-delà de 0,8 sur la plupart des régions.

Les modèles bruts sous-estiment les concentrations modélisées sur toutes les régions, avec un biais qui oscille généralement entre -1 et -6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. L'adaptation statistique, quant à elle, a tendance à légèrement surestimer les concentrations, mais dans une mesure bien moindre que la sous-estimation constatée sur CHIMERE. En effet, sur la France entière le biais moyen de l'AS est de 0,25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, largement inférieur en valeur absolue au biais de -4,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de CHIMERE. Le même constat très positif peut être fait sur les autres scores sur la France entière : la RMSE perd 4,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ entre CHIMERE brut et l'AS, et la corrélation passe de 0,66 à plus de 0,8. Au niveau régional, ces gains sont dans le même ordre de grandeur, les performances étant assez homogènes entre les différentes régions.

Concernant les régions d'outre-mer, CHIMERE fait preuve d'une bonne capacité à prévoir la variabilité temporelle des concentrations sur ces territoires influencés par les poussières désertiques en provenance du Sahara, avec des scores de corrélation de respectivement 0,75, 0,8 et 0,7 pour la Guadeloupe, la Martinique et la Guyane. Les scores de RMSE et de biais sont également satisfaisants pour la Guadeloupe et la Martinique, respectant l'objectif qualité pour la RMSE et ne dépassant que de très peu l'objectif qualité pour le biais (avec respectivement -8 et -7,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Ces valeurs élevées comparées aux régions métropolitaines s'expliquent par des niveaux de concentration également plus élevés, comme le montre la Figure 34 (cf. Annexe 5 – Figures additionnelles) présentant la moyenne des concentrations observées par région.

Cette explication n'est cependant pas suffisante pour la Guyane, qui obtient une RMSE de 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et un biais négatif de -12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ces deux scores ne respectent pas les objectifs qualité. La Figure 35, qui présente le biais relatif moyen des prévisions CHIMERE par région, met en évidence le fait que les concentrations de PM_{10} sur la Guyane sont très fortement sous-estimées proportionnellement au niveau des concentrations mesurées : le biais des prévisions est de -12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ alors que la moyenne des observations est de 17,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Il est toutefois difficile de conclure avec certitude sur ces résultats, les stations de mesure étant peu nombreuses, très proches spatialement, et localisées uniquement sur le littoral.

Concernant les performances par typologie de stations présentées en Figure 13, l'adaptation statistique est très homogène, alors que les scores obtenus par les modèles bruts présentent davantage de variabilité, avec notamment de meilleures RMSE pour la typologie rurale mais de meilleures corrélations pour la typologie urbaine.

D'après la Figure 14, la prévision des valeurs hautes pose encore des difficultés aux modèles, ceux-ci ayant tendance à fortement sous-estimer ces plages de valeurs, cependant peu fréquentes. En effet, l'année 2022 ne permet pas de tirer de conclusions parfaitement fiables à ce sujet, les concentrations en moyenne journalière supérieures à 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ne représentant que 7,4% des données totales. MOCAGE montre de meilleures performances que CHIMERE pour les gammes de concentrations faibles (jusqu'à 20-30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), puis la tendance s'inverse. Les deux modèles restent toutefois très proches.

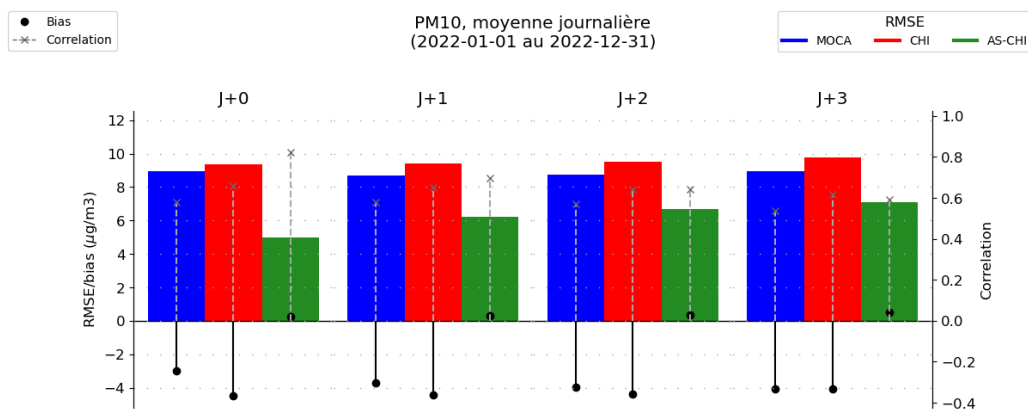


Figure 15 : PM₁₀ - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction du jour de prévision pour MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et pour l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) en 2022

La Figure 15 montre que les modèles bruts conservent des performances quasiment identiques entre les jours de prévision J0, J1, J2 et J3. Pour l'adaptation statistique, le constat est différent, car si le biais reste stable à des valeurs proches de 0 pour toutes les échéances de prévision, les autres scores se dégradent notamment entre les échéances J0 et J1. La RMSE augmente ainsi de 5 à 6,2 µg/m³ entre J0 et J1, pour atteindre 7,1 µg/m³ à J3, tandis que la corrélation est réduite de 0,82 à 0,7 entre les deux premières échéances, pour tomber à 0,6 à J3.

Malgré cela, l'adaptation statistique reste plus performante que le modèle brut aux échéances J0, J1 et J2 et, de surcroît, les objectifs qualité des scores continuent à être respectés à J2.

2.2.2 Performances par rapport aux seuils règlementaires

L'année 2022 a connu peu d'épisodes de pollution aux PM₁₀ d'ampleur nationale. Le principal épisode qui a touché la France métropolitaine a eu lieu du 28 au 30 mars. D'autres de moindre ampleur ont touché principalement le quart sud-est de la France du 13 au 19 janvier, du 24 au 29 janvier (avec également le littoral nord), et du 16 au 19 mars.

Concernant les DROM, notons des vagues de poussières désertiques du 17 au 21 mai et du 11 au 19 juin qui ont majoritairement touché la Martinique et la Guadeloupe.

Les Figure 16 à Figure 18 font état de la capacité des modèles à détecter avec exactitude les dépassements du seuil d'information et de recommandation de 50 µg/m³ en France métropolitaine. La Figure 19 confronte les détections de dépassements de CHIMERE aux observations relevées sur les DROM. Des explications détaillées à propos des indicateurs utilisés dans les Figure 17 et Figure 18 sont présentées en [Annexe 2 – Eléments de table de contingence](#).

Dépassements du seuil de 50 µg/m³,
PM₁₀, moyenne journalière

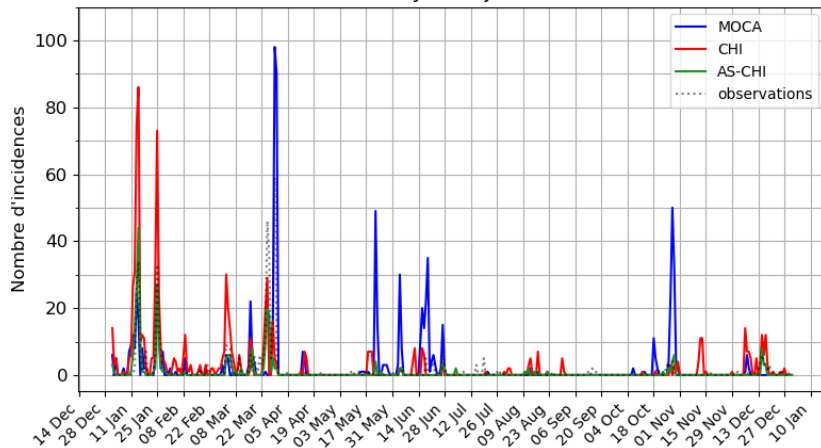


Figure 16 : PM₁₀ - Nombre d'occurrences au cours du temps des dépassements du seuil d'information (50 µg/m³) de MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2022 sur l'échéance J0. Les dépassements survenus dans les DROM ne sont pas pris en compte.

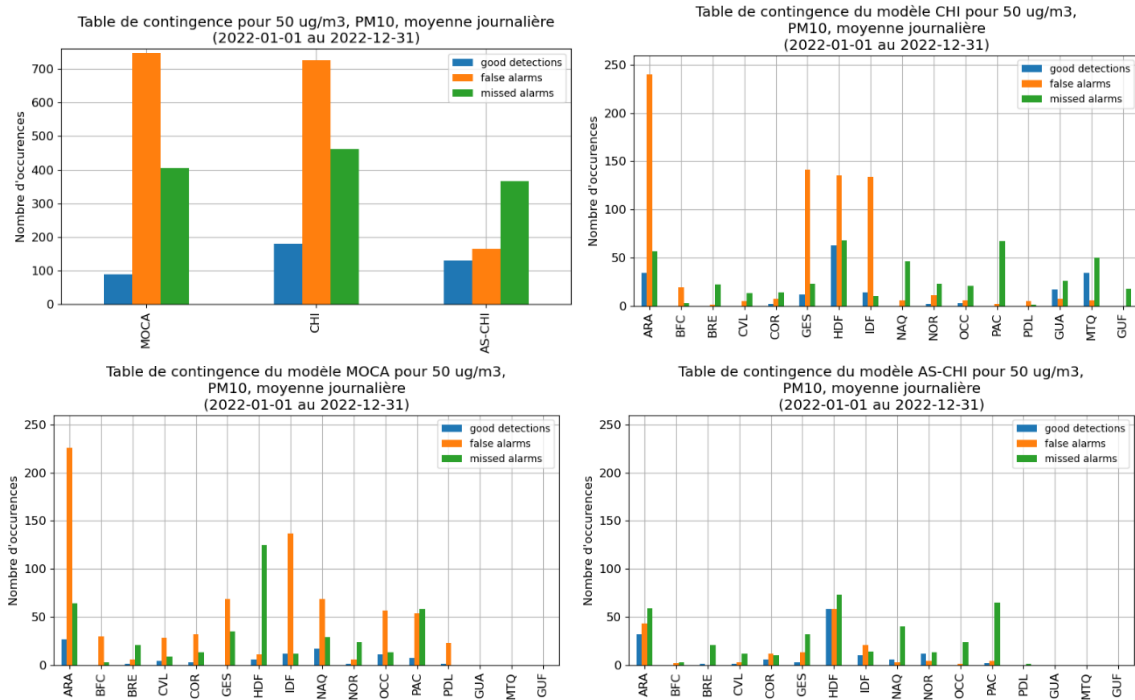


Figure 17 : PM₁₀ - Tables de contingence pour 2022 à l'échéance J0 pour le seuil de 50 µg/m³. Les bonnes détections sont en bleu, les fausses détections en orange, et les détections manquées en vert. En haut à gauche : Tables de contingence de MOCAGE (groupe de gauche), CHIMERE (groupe du milieu), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (groupe de droite) pour la France métropolitaine. En haut à droite : Table de contingence de CHIMERE déclinée par régions, incluant les DROM. En bas : Tables de contingence de MOCAGE et de l'AS de CHIMERE déclinées par régions.

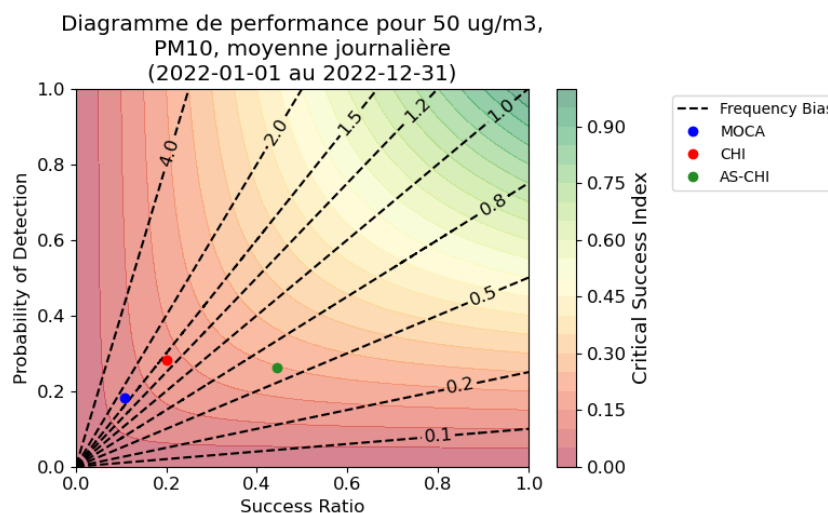


Figure 18 : PM_{10} - Diagramme de performance pour MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge) et l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2022 pour l'échéance J0 en France métropolitaine

Ces figures mettent en évidence des comportements relativement homogènes entre les modèles bruts, avec une difficulté commune à détecter les événements et à les détecter correctement. Sur l'ensemble de la période, MOCAGE totalise 90 bonnes détections et 748 fausses détections pour 496 dépassements observés, soit un taux de succès de 11% et une probabilité de détection de 18%. CHIMERE est à peine plus performant, avec 181 bonnes détections et 725 fausses détections, soit un taux de succès de 20% et une probabilité de détection de 28%. La Figure 16 montre que ces épisodes sont généralement surestimés en termes d'étendue spatiale. Ces performances sont à mettre en perspective de dépassements souvent localisés et peu persistants, qui sont des cas de figure complexes à appréhender pour les modèles.

L'adaptation statistique est nettement meilleure que le modèle brut pour la détection des épisodes de pollution aux PM_{10} : son taux de succès et sa probabilité de détection sont respectivement de 44% et 26%, avec un total de 131 bonnes détections et 164 fausses détections. Elle détecte donc autant d'évènements que le modèle brut, mais s'avère plus fiable dans ses prévisions de dépassements.

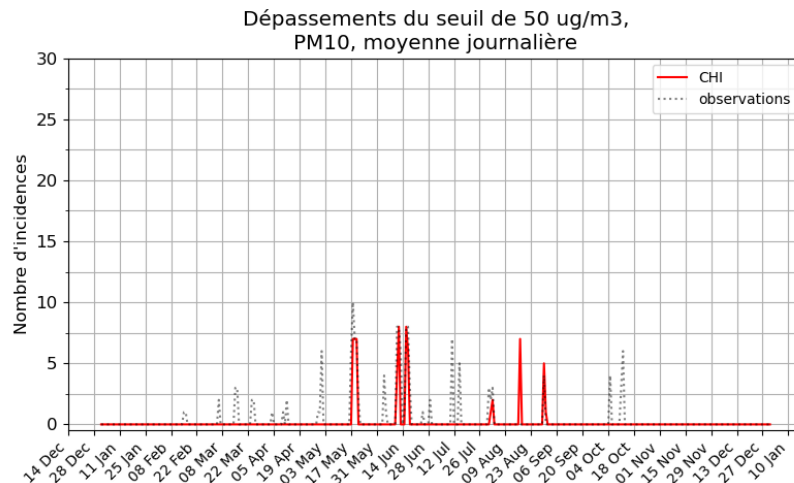


Figure 19 : PM₁₀ – Série temporelle des dépassements du seuil d’information (50 µg/m³) de CHIMERE (rouge) pour 2022 sur l’échéance J0, exclusivement sur les départements et régions d’outre-mer (Guadeloupe, Martinique, Guyane)

La Figure 17 – Haut droite, qui présente les tables de contingence du modèle CHIMERE sur chaque région, montre des performances plutôt satisfaisantes sur la Guadeloupe et la Martinique, avec un taux de succès de respectivement 71% et 90%, et une probabilité de détection de 40% pour les deux régions. La Guyane a été moins bien représentée par le modèle lors des épisodes de dépassements, avec 100% de détections manquées sur l’année 2022.

Au total sur la zone des Caraïbes, CHIMERE a réalisé 51 bonnes détections sur les 145 évènements observés, soit une probabilité de détection de 35%, avec seulement 13 fausses détections, soit un taux de succès de 80%.

La Figure 19 montre toutefois que CHIMERE rencontre encore des difficultés à capter les divers évènements de l’année, notamment du fait de leur faible intensité en 2022. Ces difficultés sont à mettre en perspective avec l’incertitude sur la source de poussières minérales sahariennes et la propagation du panache sur 5000 km pour traverser l’océan Atlantique avant d’atteindre les Caraïbes, ce qui peut conduire à des incertitudes sur son extension spatiale et géographique.

2.2.3 Performances en lien avec les critères AMU

Comme évoqué en introduction de la section 2, l’arrêté du 7 avril 2016 relatif au déclenchement des procédures préfectorales en cas d’épisodes de pollution de l’air ambiant (« Arrêté Mesures d’Urgence (AMU) ») prévoit que les procédures préfectorales se déclenchent sur la base des prévisions de situation de fond, avec des critères sur la surface concernée, le nombre d’habitants exposés, et la persistance des dépassements.

L'ensemble du territoire ne pouvant être couvert par les stations de mesure, dont les mesures sont ponctuelles, c'est l'analyse de la veille (J-1) qui sert de référence pour évaluer les performances des prévisions réalisées par les modèles en regard des critères AMU. Etablie à partir d'une fusion de données entre observations et sorties de modélisation, elle est considérée comme le meilleur estimateur disponible de la répartition spatiale des concentrations de PM₁₀.

Seule l'AS du modèle CHIMERE est évaluée ici.

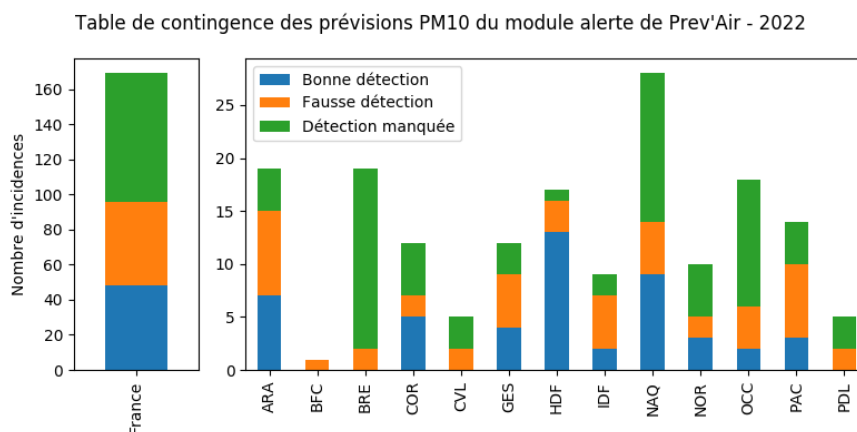


Figure 20 : PM₁₀ - Table de contingence des critères AMU (critère surfacique et critère de population, sans distinction) pour l'AS de CHIMERE sur l'année 2022 à l'échéance J0. Les bonnes détections sont en vert, les fausses détections en orange, et les détections manquées en bleu.

La Figure 20 tend à confirmer le comportement décrit dans le paragraphe 2.1.2, avec un grand nombre de détections manquées (73), mais également autant de bonnes détections (48) que de fausses détections (48), soit un taux de succès de 50%.

Les régions présentant les meilleurs taux de succès sont les Hauts-de-France et Nouvelle-Aquitaine, avec respectivement 81 et 64%. Seuls les Hauts-de-France montrent une probabilité de détection supérieur à 50%. Notons qu'une grande part des dépassements observés en Nouvelle-Aquitaine ont eu lieu dans les environs de Bordeaux lors d'épisodes anthropiques liés aux périodes de froid du mois de janvier. Quelques journées ont également été fortement impactées par les feux de forêt survenus en juillet et août sur une partie de la région.

Le modèle a eu davantage de difficultés à détecter les dépassements des critères AMU sur la Bretagne et Occitanie, générant très peu (voire pas) de bonnes détections relativement au total d'évènements pour ces deux régions.

2.2.4 Evolution des prévisions depuis 2019

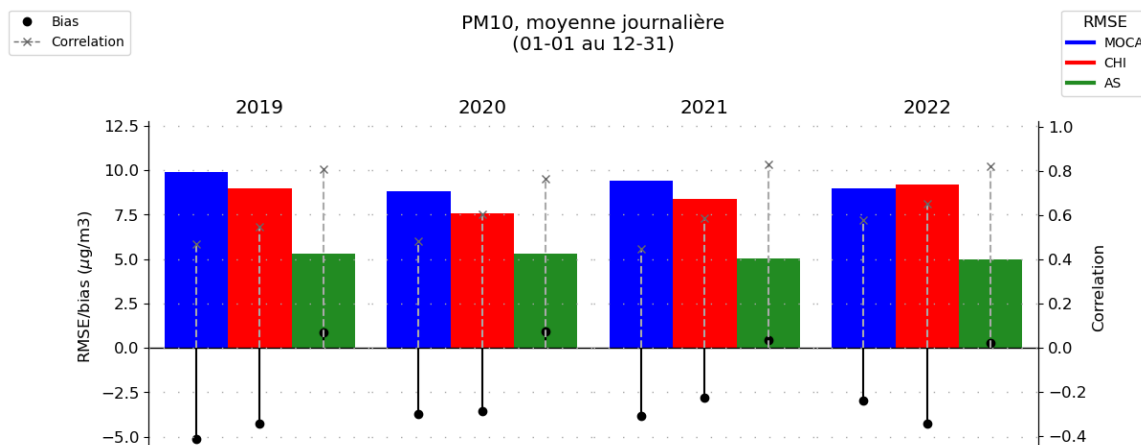


Figure 21 : PM_{10} - Synthèse des scores de RMSE (barres colorées), biais moyen (points noirs) et corrélation (pointillés gris) entre janvier et décembre depuis 2019 pour MOCAGE, CHIMERE et son adaptation statistique

Malgré la variabilité des concentrations observées suivant les années, la Figure 21 montre des performances en PM_{10} cohérentes d'une année à l'autre depuis 2019 pour CHIMERE et MOCAGE. A noter une légère amélioration de la RMSE et du biais des modèles bruts en 2020 due aux réductions d'émissions liées à la crise Covid-19, notamment induites par la réduction du trafic routier durant les périodes de confinement. Pour CHIMERE, les performances sont depuis revenues à un niveau équivalent à ce qu'elles étaient en 2019, avec toutefois une amélioration de la corrélation. Les performances de MOCAGE se sont améliorées par rapport à 2021 et 2019.

L'adaptation statistique de CHIMERE améliore la concordance entre les données issues du modèle et celles des observations, quelles que soient les circonstances et l'année considérées. Ses performances sont très stables d'une année à l'autre.

2.3 Prévisions de PM_{2.5}

Pour les particules fines de diamètre inférieur à 2.5 µm (PM_{2.5}), il n'existe pas de seuils journaliers à respecter dans la réglementation française ou européenne. Ainsi l'évaluation repose uniquement sur le calcul des scores et exclut les tables de contingence pour les dépassements de seuils. Elle est réalisée sur l'année complète, du 1^{er} janvier au 31 décembre, sur la base des moyennes journalières de PM_{2.5}.

Le calcul des scores est réalisé avec les données de mesure validées de la base de données nationale GEOD'AIR, sur un panel de 143 stations de fond disponibles, réparties en 22 stations rurales, 16 stations périurbaines et 105 stations urbaines. Les départements et régions d'outre-mer (Guadeloupe, Martinique et Guyane) comptent 7 stations (6 urbaines, 1 périurbaine).

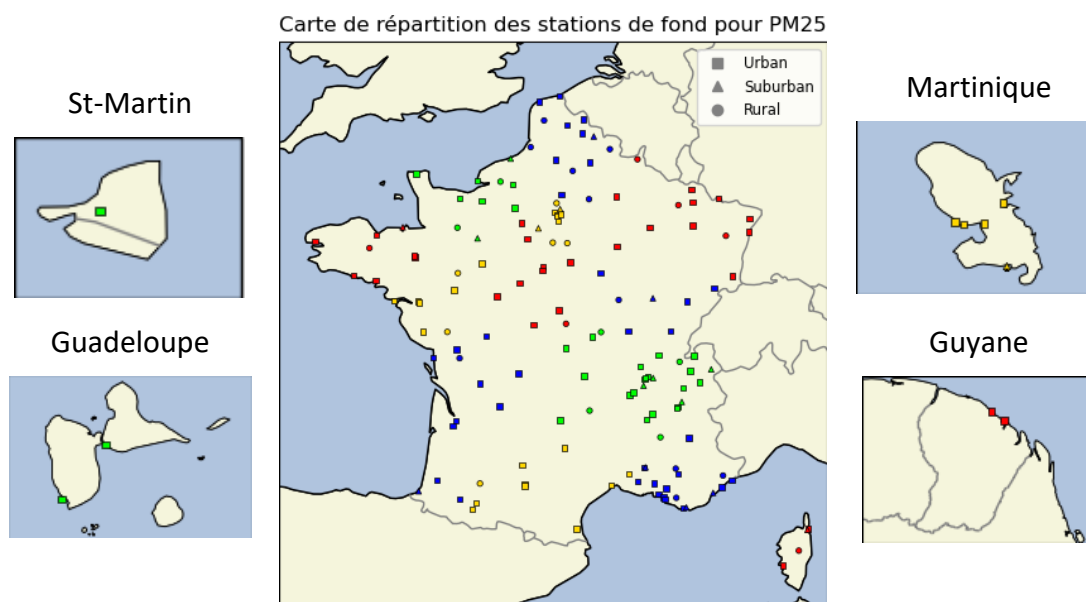


Figure 22 : PM_{2.5} – Carte de répartition des stations de fond (urbaines, périurbaines et rurales) pour l'année 2022 en France métropolitaine et dans les départements et régions d'outre-mer avec différenciation des régions par les couleurs

2.3.1 Performances du modèle

La Figure 23 présente pour les PM_{2.5} les scores de biais, RMSE et corrélation pour les modèles CHIMERE (CHI) et MOCAGE (MOCA) ainsi que pour l'adaptation statistique de CHIMERE (AS-CHI) pour le jour de prévision J0. Les scores pour les stations des DROM ne sont calculés que pour le modèle CHIMERE brut (CHI). Les scores sont déclinés par régions administratives, le premier groupe de barres, à l'extrême gauche, correspondant aux scores sur l'ensemble des stations françaises.

La Figure 24 présente ces scores sur les jours de prévision J0, J1, J2, J3.

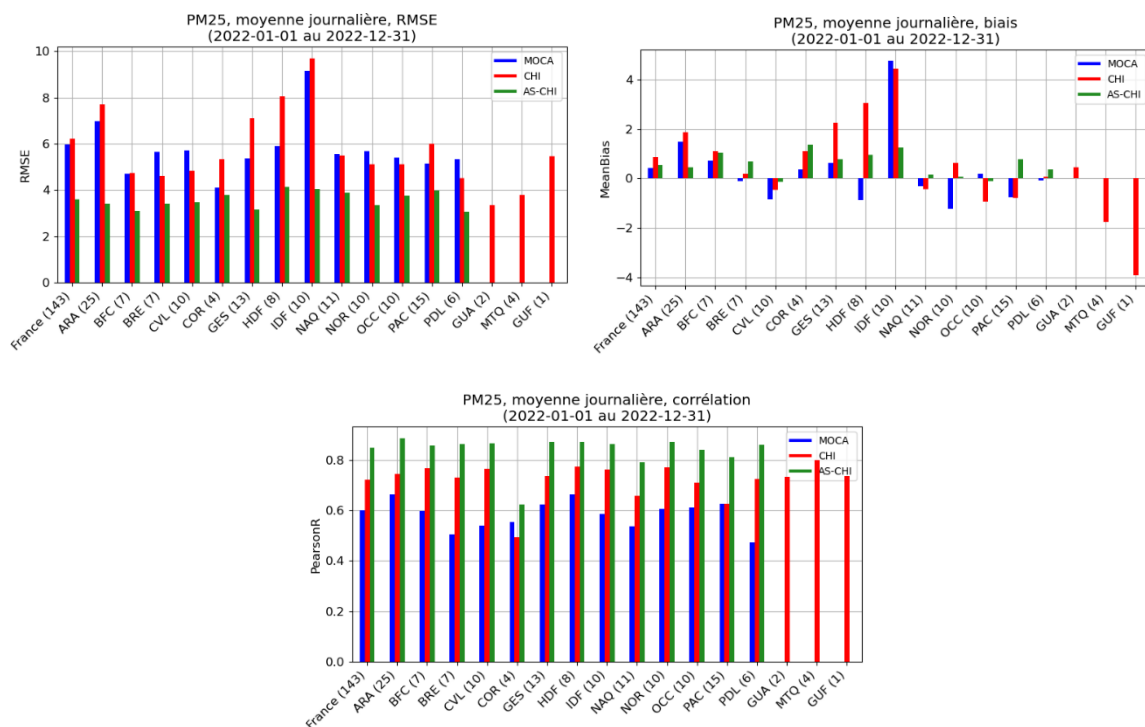


Figure 23 : PM_{2.5} - Scores de RMSE, biais et corrélation par région des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2022 sur l'échéance J0

Les principaux résultats que nous pouvons relever de la Figure 23 sont :

- Un biais positif moyen de 0,43 µg/m³ pour MOCAGE, 0,87 µg/m³ pour CHIMERE et 0,5 µg/m³ pour l'AS
- Une RMSE globale de 6 µg/m³ pour MOCAGE, 6,2 µg/m³ pour CHIMERE, et 3,6 µg/m³ pour l'AS
- Une corrélation globale de 0,6 pour MOCAGE, 0,72 pour CHIMERE, et 0,85 pour l'AS
- Une variabilité des scores pour certaines régions, notamment pour les modèles bruts, qui doit toutefois être relativisée par le faible nombre de stations disponibles

Les trois modèles montrent une légère tendance à surestimer les concentrations de PM_{2.5}, avec toutefois de fortes variations régionales. Ainsi, en moyenne sur la France, les trois modèles ont un biais positif inférieur à 1 µg/m³, mais le biais de MOCAGE et CHIMERE pour l'Île-de-France monte à environ 4,5 µg/m³. CHIMERE présente également des biais compris entre 2 et 3 µg/m³ sur les régions Grand Est et Hauts-de-France. Dans tous les cas cités, l'adaptation statistique parvient à réduire les surestimations du modèle brut à environ 1 µg/m³. Les concentrations de PM_{2.5} en région Auvergne-Rhône-Alpes sont également plus surestimées par les deux modèles bruts que dans la plupart des autres régions.

Ces variations régionales se retrouvent dans les performances en termes de RMSE, où les scores des modèles bruts plus élevés en Ile-de-France et en Auvergne-Rhône-Alpes que sur l'ensemble des autres régions, avec une RMSE d'environ 9 et 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivement. CHIMERE montre également de moins bonnes performances sur les régions Grand Est et Hauts-de-France. Les performances de l'adaptation statistique sont très satisfaisantes, avec des RMSE régionales très homogènes qui ne dépassent pas 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ malgré les difficultés du modèle brut.

En ce qui concerne les corrélations, les trois modèles montrent moins de variabilité. Pour toutes les régions, les corrélations de MOCAGE se maintiennent autour de 0,6, celles de CHIMERE autour de 0,7, et celles de l'AS un peu au-delà de 0,8. Seule la Corse fait exception, avec des corrélations entre 0,5 et 0,6 pour les trois modèles.

Les performances de CHIMERE sur les DROM sont satisfaisantes, avec des corrélations autour de 0,75 et des RMSE du même ordre de grandeur que pour les régions métropolitaines. Seule la Guyane présente davantage de difficultés, avec une large sous-estimation des concentrations de $\text{PM}_{2.5}$ (biais de -4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) menant à une RMSE légèrement plus forte que pour les autres DROM. Ceci peut s'expliquer par l'absence de domaine haute résolution pour prévoir les concentrations des polluants et le fait que l'inventaire utilisé n'est peut être pas assez raffiné sur cette région.

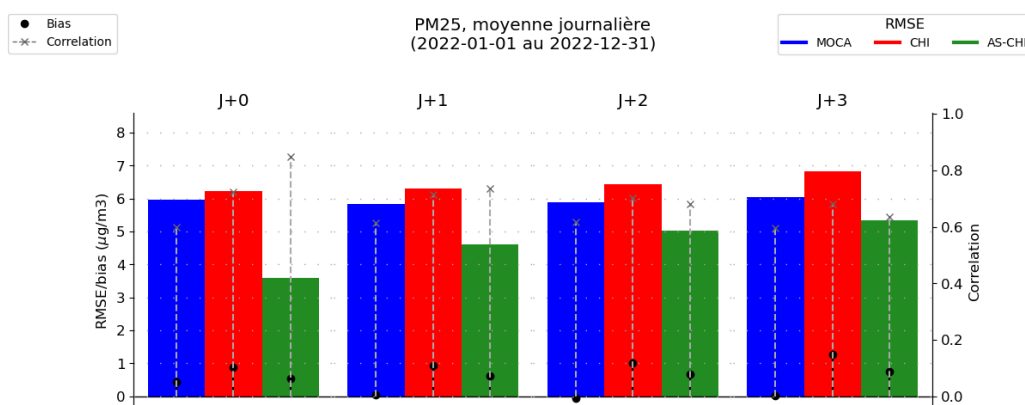


Figure 24 : $\text{PM}_{2.5}$ - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction du jour de prévision pour MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et pour l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) en 2022

Sur la Figure 24 qui fait état des scores des trois modèles en fonction du jour de prévision considéré, CHIMERE et MOCAGE parviennent à maintenir des performances relativement stables entre les différentes échéances. Dans le cas de l'adaptation statistique, une nette dégradation de la corrélation peut être constatée, avec une réduction de 0,2 points entre les échéances J0 et J3, de même que pour la RMSE, qui augmente de 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ entre J0 et J3. Son biais reste stable.

2.3.2 Evolution des prévisions depuis 2019

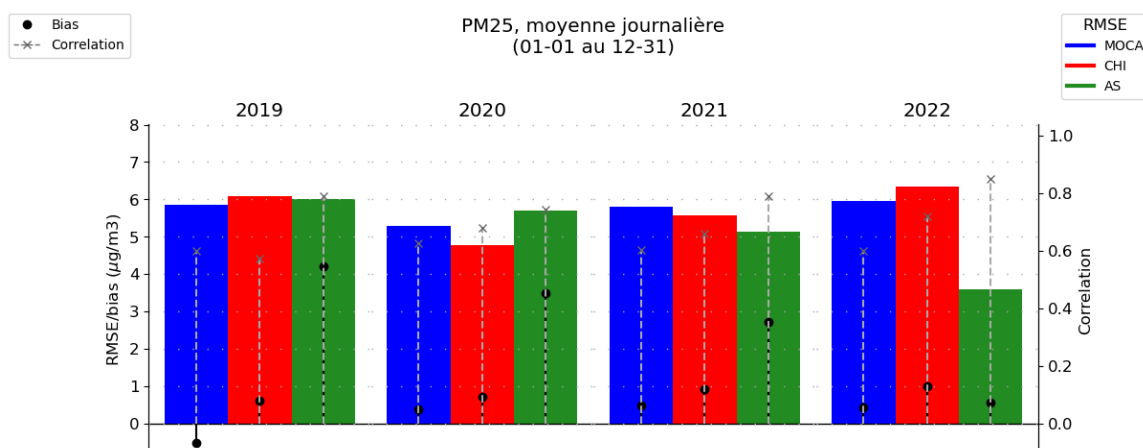


Figure 25 : PM_{2.5} - Synthèse des scores de RMSE (barres colorées), biais moyen (points noirs) et corrélation (pointillés gris) entre janvier et décembre depuis 2019 pour MOCAGE, CHIMERE et son adaptation statistique

Malgré la variabilité des concentrations observées suivant les années, la Figure 25 montre des performances en PM_{2.5} plutôt stables depuis 2019 pour MOCAGE. A contrario, CHIMERE semble avoir plus de difficultés à maintenir ses performances d'une année sur l'autre. La crise Covid-19 peut expliquer l'amélioration des performances constatée en 2020, mais CHIMERE a maintenant retrouvé une RMSE proche de ce qu'elle était en 2019, tandis que sa corrélation s'est nettement améliorée par rapport à cette première année de comparaison.

Depuis la mise en place de la nouvelle version de CHIMERE, la valeur ajoutée de l'adaptation statistique vis-à-vis du modèle brut ne fait plus de doutes, avec une nette amélioration de tous les scores considérés ici.

2.4 Prévisions de NO₂

Pour le dioxyde d'azote (NO₂), l'évaluation est réalisée sur l'année complète, du 1^{er} janvier au 31 décembre. L'indicateur réglementaire considéré est le seuil d'information de 200 µg/m³ en moyenne horaire, mais il est à noter que ce seuil n'a jamais été atteint à l'échelle d'épisodes de pollution d'ampleur nationale au cours de ces dernières années, y compris en 2022. Seul le maximum journalier de NO₂ est considéré dans les figures de cette partie, permettant une comparaison directe avec le seuil d'information et de recommandation.

Le calcul des scores est réalisé avec les données de mesure validées de la base de données nationale GEOD'AIR, sur un panel de 243 stations de fond disponibles, réparties en 24 stations rurales, 51 stations périurbaines et 168 stations urbaines. Les départements et régions d'outre-mer (Guadeloupe, Martinique et Guyane) comptent 9 stations (5 urbaines, 4 périurbaines).

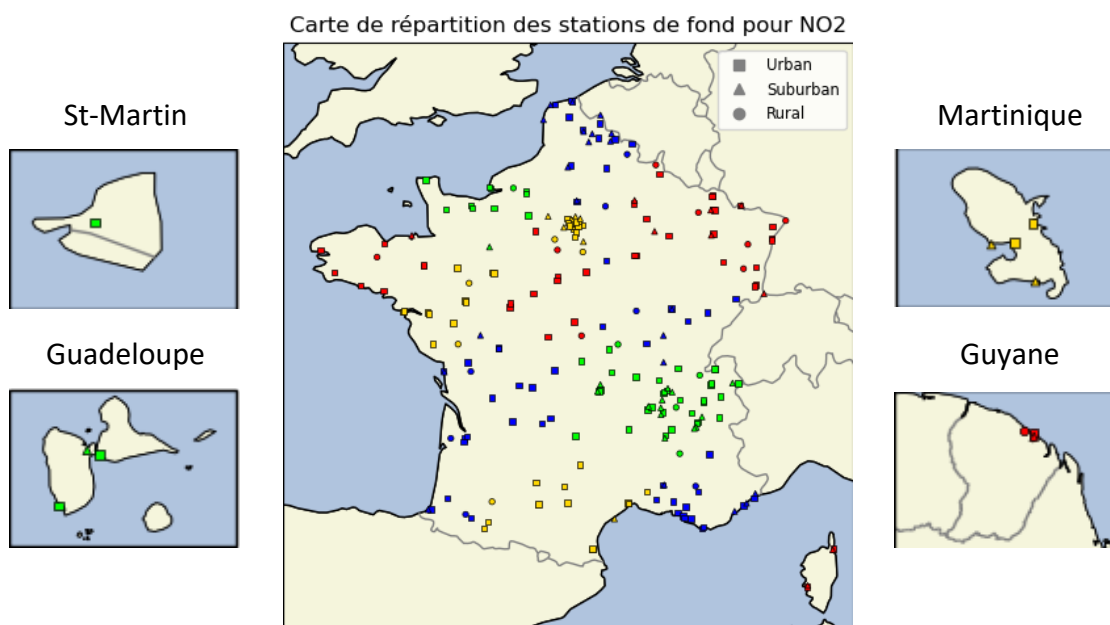


Figure 26 : NO₂ – Carte de répartition des stations de fond (urbaines, périurbaines et rurales) pour l'année 2022 en France métropolitaine et dans les départements et régions d'outre-mer avec différenciation des régions par les couleurs

2.4.1 Performances du modèle

Les Figure 27 et Figure 28 présentent pour le NO₂ les scores de biais, RMSE et corrélation pour les modèles CHIMERE (CHI) et MOCAGE (MOCA) ainsi que pour l'adaptation statistique de CHIMERE (AS-CHI) pour le jour de prévision J0. Les scores pour les stations des DROM ne sont calculés que pour le modèle CHIMERE brut (CHI).

La Figure 27 décline ces scores sur les régions administratives, le premier groupe de barres, à l'extrême gauche, correspondant aux scores sur l'ensemble des stations françaises.

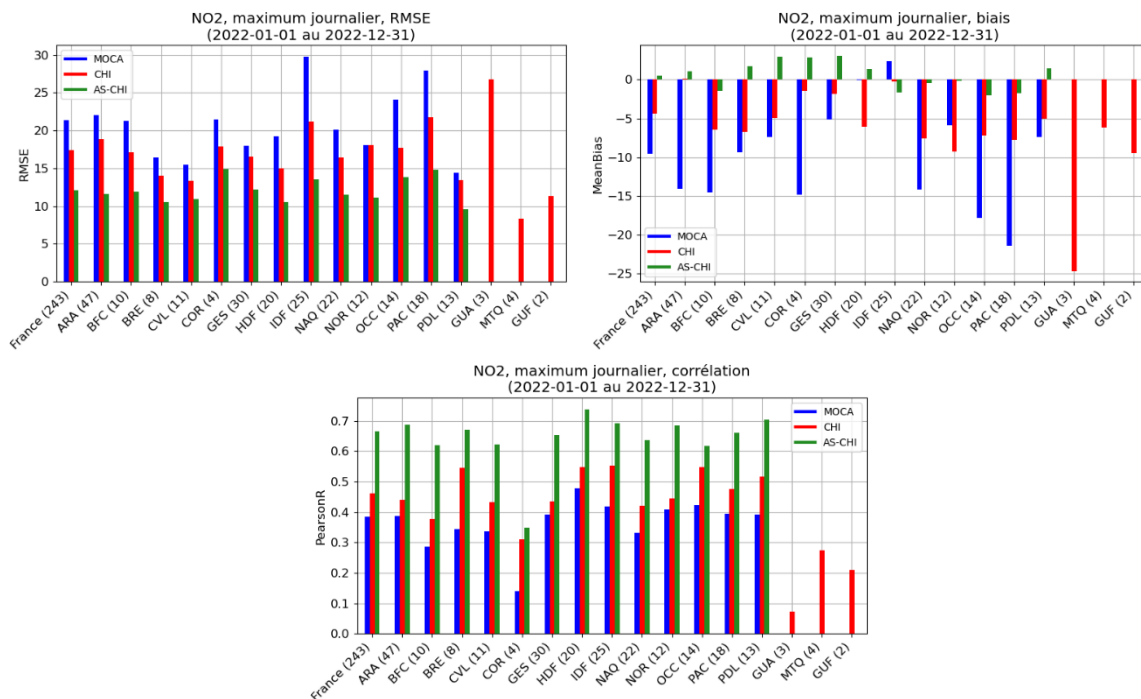


Figure 27 : NO₂ - Scores de RMSE, biais et corrélation par région des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2022 sur l'échéance J0

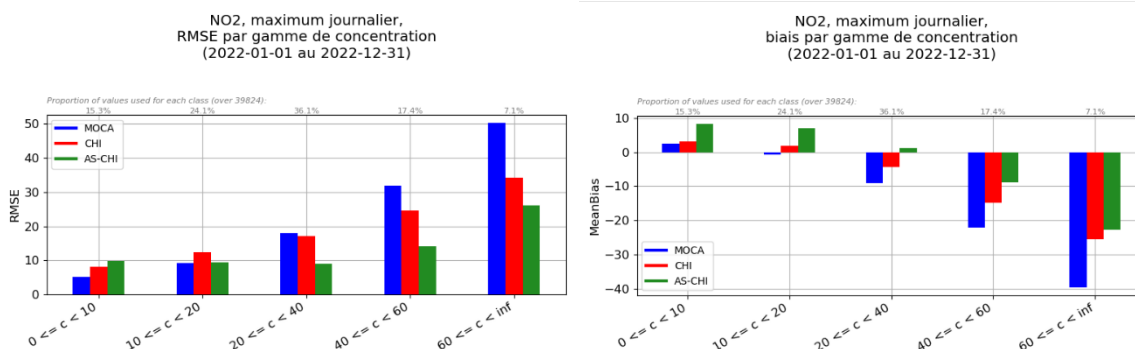


Figure 28 : NO₂ - Scores de RMSE et biais par gamme de concentration des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2022 sur l'échéance J0

Moins de 10	10 à 20	20 à 40	40 à 60	Plus de 60
15,3%	24,1%	36,1%	17,4%	7,1%

Tableau 5 : NO₂ – Proportion de valeurs utilisées pour le calcul de score de chaque gamme de concentration

Les principaux résultats que nous pouvons relever de la Figure 27 sont :

- Un biais négatif moyen de -9,6 µg/m³ pour MOCAGE et de -4,3 µg/m³ pour CHIMERE, et un biais positif moyen de 0,5 µg/m³ pour l'AS
- Une RMSE globale de 21,3 µg/m³ pour MOCAGE, 17,5 µg/m³ pour CHIMERE, et 12,1 µg/m³ pour l'AS

- Une corrélation globale de 0,39 pour MOCAGE, 0,46 pour CHIMERE, et 0,67 pour l'AS

MOCAGE et CHIMERE montrent une forte sous-estimation des concentrations de NO₂ sur la plupart des régions françaises. Leurs corrélations se situent globalement entre 0,3 et 0,5, tandis que l'adaptation statistique de CHIMERE présente des performances d'environ 0,65 sur toutes les régions. Notons une exception pour la Corse, où le modèle brut obtient une corrélation de 0,31 difficilement corrigée à 0,35 par l'AS. MOCAGE a autant de difficultés pour cette région, avec une corrélation très faible de 0,14. Les RMSE se situent autour de 17 µg/m³ pour CHIMERE et 21 µg/m³ pour MOCAGE, avec quelques disparités régionales, notamment pour l'Île-de-France et Provence-Alpes-Côte d'Azur pour MOCAGE.

L'adaptation statistique améliore grandement les performances en RMSE et corrélation du modèle brut. Les biais de CHIMERE sont bien corrigés, l'adaptation statistique ayant des biais proches de zéro ou légèrement positifs pour toutes les régions.

Concernant les DROM, CHIMERE montre des difficultés à prévoir les concentrations de NO₂. La Guadeloupe est très mal représentée et obtient une RMSE de 27 µg/m³ en sus d'une corrélation de 0,1. La Martinique et la Guyane, quant à elles, obtiennent des corrélations de 0,27 et 0,21 respectivement, ainsi que des RMSE plus satisfaisantes de 8,3 et 11,3 µg/m³. Dans l'ensemble, les concentrations de NO₂ sont très sous-estimées sur ces régions. De telles performances sont très certainement attribuables à la qualité de l'inventaire d'émissions global utilisé pour ces prévisions.

En ce qui concerne les scores par gamme de concentration de la Figure 28, les modèles bruts ont tendance à voir leurs performances se dégrader avec les valeurs hautes. À l'inverse, l'adaptation statistique montre des performances très stables d'une gamme de concentration à l'autre, voire meilleures pour les concentrations intermédiaires (entre 20 et 60 µg/m³). Ainsi, sa RMSE se maintient à un niveau de 10-15 µg/m³ jusqu'à des concentrations de 60 µg/m³, alors que les RMSE des modèles bruts, inférieures à 8 µg/m³ pour les concentrations inférieures à 10 µg/m³, dépassent les 25 µg/m³ pour les concentrations supérieures à 40 µg/m³.

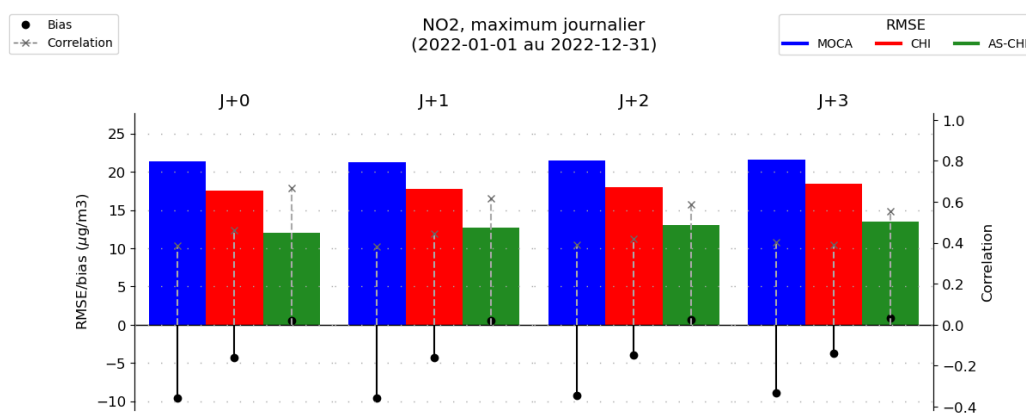


Figure 29 : NO₂ - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction du jour de prévision pour MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et pour l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) en 2022

La Figure 29 montre que les trois modèles conservent des performances quasiment identiques entre les jours de prévision J0, J1, J2 et J3. Seule la corrélation de l'adaptation statistique se dégrade de façon un peu plus visible, perdant presque 0,1 point entre les échéances J0 et J3. Malgré cela, elle reste plus performante que le modèle brut à toutes les échéances.

2.4.2 Performances par rapport aux seuils réglementaires

Comme indiqué en début de chapitre, l'année 2022 n'a connu aucun épisode de pollution au NO₂. Les modèles ont pourtant occasionnellement surestimé les concentrations de ce polluant, comme le montre la Figure 30.

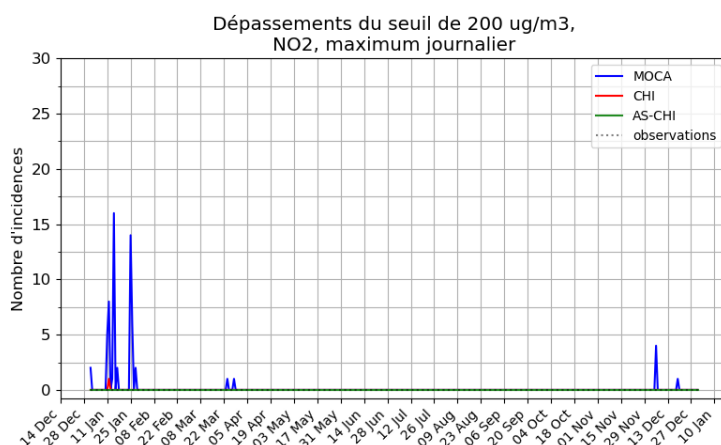


Figure 30 : NO₂ - Nombre d'occurrences au cours du temps des dépassements du seuil d'information (200 µg/m³) en France métropolitaine de MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2022 sur l'échéance J0

Beaucoup plus fidèle aux niveaux de concentration observés que les modèles bruts, l'adaptation statistique est absente de la Figure 30, n'ayant détecté aucun dépassement du seuil réglementaire. Ses performances à ce niveau-là sont ainsi extrêmement bonnes puisqu'elles reflètent parfaitement les observations.

2.4.3 Evolution des prévisions depuis 2019

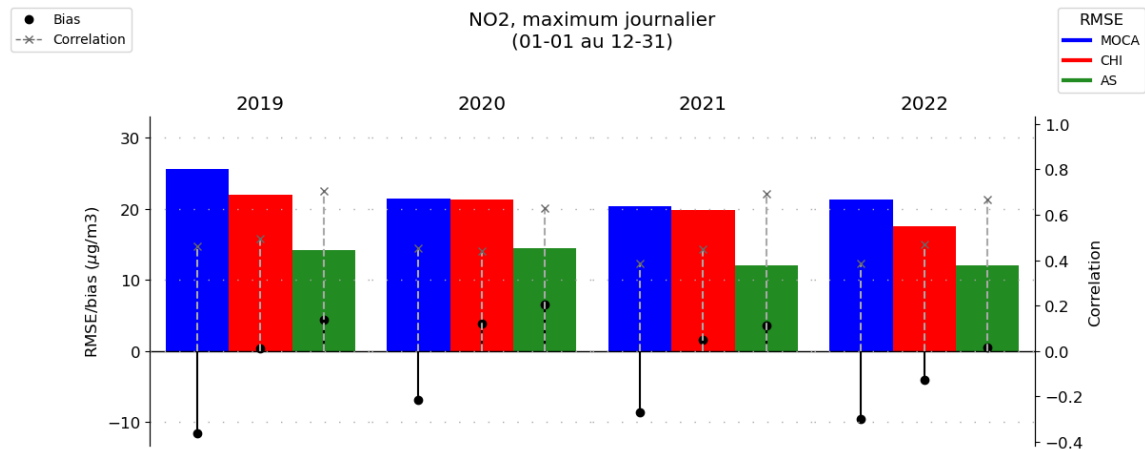


Figure 31 : NO₂ - Synthèse des scores de RMSE (barres colorées), biais moyen (points noirs) et corrélation (pointillés gris) entre janvier et décembre depuis 2019 pour MOCAGE, CHIMERE et son adaptation statistique

Malgré la variabilité des concentrations observées suivant les années, la Figure 31 montre des performances en NO₂ très stables depuis 2020 pour les trois modèles. CHIMERE s'est toutefois légèrement amélioré en termes de corrélation et RMSE en 2022 avec la mise en place de la nouvelle version du modèle.

L'adaptation statistique de CHIMERE améliore la concordance entre les données issues du modèle et celles des observations, quelles que soient les circonstances et l'année considérées. Ses performances sont très stables d'une année à l'autre.

2.5 Evaluation de la composition chimique des PM₁ (CARA)

L'évaluation des composantes de PM₁ de CHIMERE a été réalisée sur l'ensemble de l'année 2022. 12 stations sont disponibles sur la France, réparties sur les régions Auvergne-Rhône-Alpes (1), Bretagne (1), Grand Est (3), Hauts-de-France (2), Ile-de-France (1), Nouvelle-Aquitaine (2), Occitanie (1) et Provence-Alpes-Côte d'Azur (1).

A noter qu'un changement dans les prévisions Prev'Air a eu lieu courant novembre 2021, avec le passage à la version 2020 de CHIMERE.

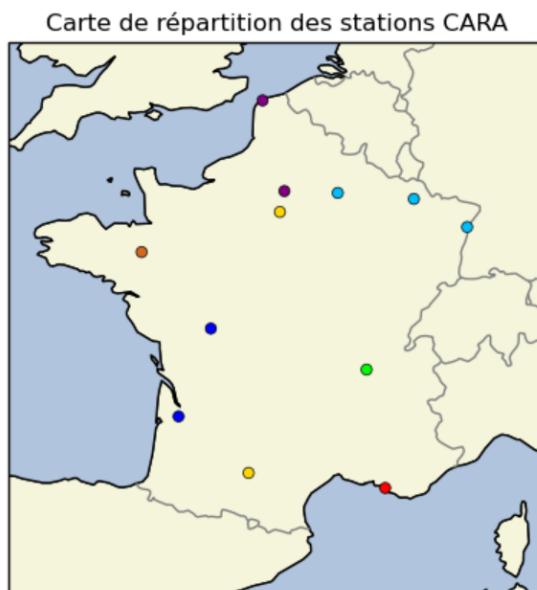


Figure 32 : Carte de répartition des stations de mesure CARA pour l'année 2022, avec différenciation des régions par les couleurs

Les composantes PM₁ qui ont été étudiées sont le chlore (Cl, marqueur des sels de mer), l'ammonium (NH₄), les nitrates (NO₃), les sulfates (SO₄) et la partie organique (Org) en moyenne journalière.

Les scores classiques de biais, RMSE et corrélation ont été résumés dans le Tableau 6. Les performances en RMSE et biais sont dégradées par rapport à l'année passée. L'ammonium, les nitrates et la partie organique conservent toutefois les meilleures corrélations, à l'instar de l'année passée, avec respectivement 0,56, 0,59 et 0,44. La partie organique est toujours sous-estimée, avec un biais de -1,3 µg/m³ pour une moyenne des observations à 4,1 µg/m³. Il semble donc que la prise en compte de la fraction condensable dans les émissions du chauffage résidentiel demeure bénéfique et n'engendre pas de compensation d'erreur, puisque le biais de la fraction organique demeure négatif (y compris en hiver). La surestimation des PM_{2,5} constatées pour CHIMERE serait ainsi plutôt à chercher du côté des inorganiques (sulfates, nitrates et ammonium) qui sont surestimés en termes de biais, même si la variabilité temporelle est plutôt satisfaisante dans les séries temporelles de la Figure 33.

L'amélioration notable du biais pour les prévisions de chlore constatée en 2021 est maintenue cette année, mais la variabilité temporelle reste décevante. Cet aspect sera analysé plus en détail en regard de la corrélation par rapports aux imports de sels marins, mais la densité du réseau de mesure sur la façade océanique reste limitée pour tirer des conclusions robustes.

	Biais moyen ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	RMSE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Corrélation	Moyenne des obs ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Cl	-0,02	0,14	-0,09	0,07
NH₄	1,03	1,75	0,56	0,64
NO₃	2,1	4,2	0,59	1,25
Org	-1,3	3,76	0,44	4,15
SO₄	1,5	2,2	0,3	0,85

Tableau 6 : PM₁ – Tableau des scores de biais, RMSE, corrélation, et moyenne des observations pour les cinq composantes de PM₁ étudiées en 2022

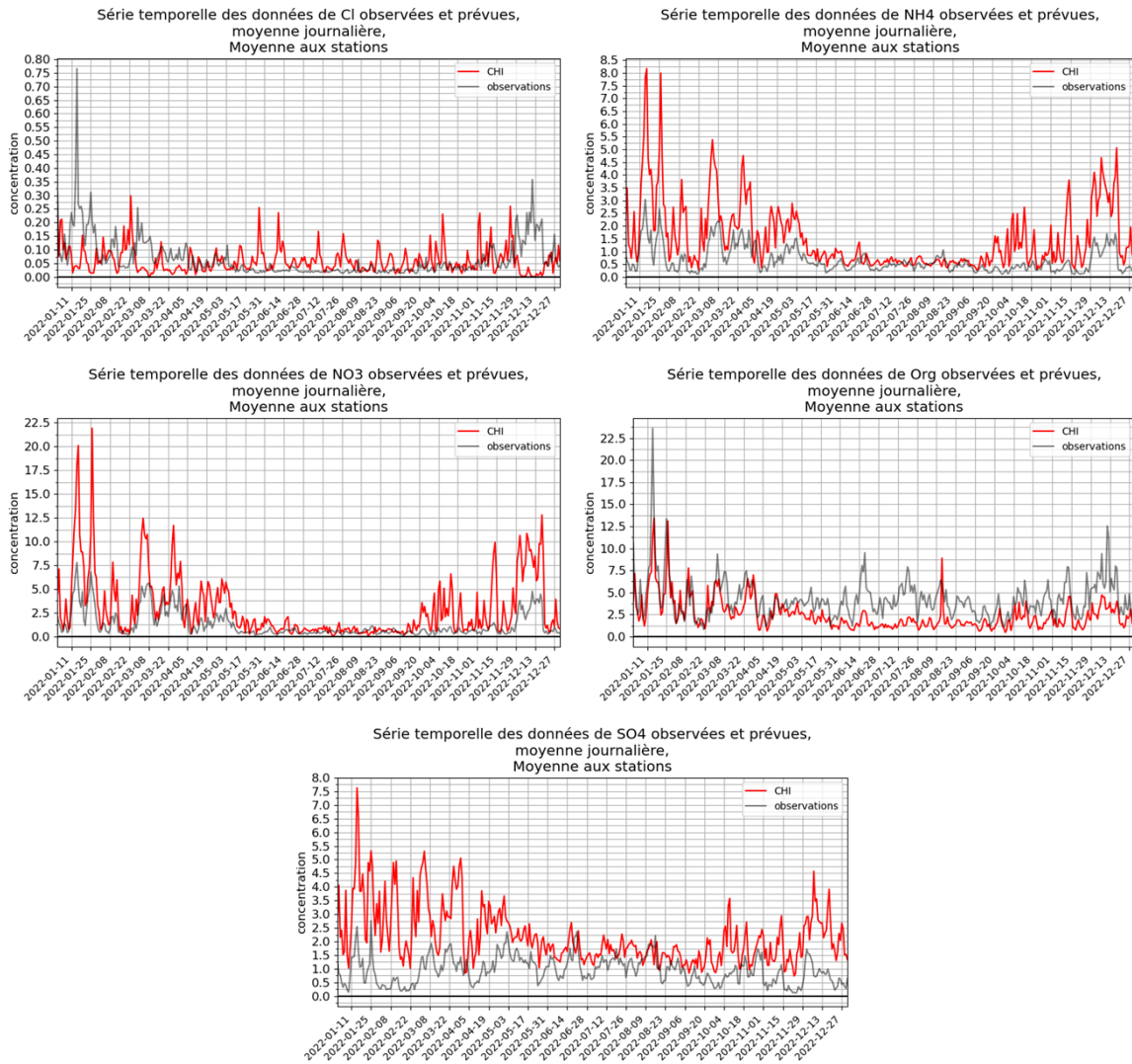


Figure 33 : PM₁ – Séries temporelles (moyennes sur les stations) des moyennes journalières des cinq composantes de PM₁ étudiées (µg/m³) pour 2022. De gauche à droite et de haute en bas : chlore, ammonium, nitrates, partie organique et sulfates

3. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce rapport fournit une évaluation des chaînes de prévisions du système Prev'air. La méthodologie utilisée s'appuie sur les conclusions du groupe de travail prévision (composé du LCSQA et des AASQA), maintenant intégrées au référentiel technique national de surveillance de la qualité de l'air concernant les éléments à analyser dans les rapports annuels décrivant les performances des prévisions. Toutes les prévisions utilisées dans Prev'air sont évaluées, à savoir les prévisions brutes de CHIMERE et MOCAGE et la prévision CHIMERE avec adaptation statistique.

Des mises à jour des outils du système ont été réalisées en fin d'année 2021. Elles comprennent la mise en place d'une nouvelle version de CHIMERE (version 2020), des post-traitements d'analyse, et de l'adaptation statistique (nouvelle méthodologie en lien avec les travaux de développement sur cette thématique réalisé dans le cadre d'un projet Copernicus). Dans l'ensemble, les résultats obtenus cette année permettent de confirmer la pertinence des développements qui ont été mis en œuvre pour améliorer Prev'Air. Les performances du modèle brut sont restées globalement stables malgré le changement de version ; notons en particulier une amélioration légère mais systématique de la corrélation entre le modèle et les observations pour tous les polluants considérés.

L'équipe de développement MOCAGE a également mené à bien un certain nombre de travaux afin d'améliorer les performances du modèle, ce qui a permis une nette amélioration des scores d'ozone et de PM₁₀ en 2022 par rapport aux années précédentes.

Le premier constat est que le traitement d'adaptation statistique qui fournit la prévision principale de Prev'air (affichée sur le site web et utilisée par les prévisionnistes pour expertiser quotidiennement la situation de la qualité de l'air en France) améliore nettement les performances par rapport au modèle brut pour l'ozone, les PM₁₀, les PM_{2.5} et le NO₂.

Déjà observés et documentés par le passé pour l'ozone et les PM₁₀, les scores obtenus cette année sont similaires aux valeurs des années précédentes en France Métropolitaine et confirment la qualité des prévisions sur toutes les typologies de stations et régions. Dans l'ensemble, mais en particulier pour l'adaptation statistique, Prev'Air respecte les objectifs de qualité attribués aux prévisions d'ozone et de PM₁₀ selon les travaux du GT prévision (LCSQA). Des écarts par rapport à ces valeurs peuvent toutefois survenir sur certaines régions pour les modèles bruts.

Pour l'ozone, l'ajout du traitement d'adaptation statistique améliore la prévision des concentrations du polluant du modèle brut, permettant notamment de prévoir davantage de dépassements des seuils réglementaires. La probabilité de détection de l'ensemble des prévisions demeure perfectible.

Pour les PM₁₀, les performances de l'adaptation statistique sont nettement meilleures que celles du modèle brut en France métropolitaine, corrigeant grandement la sous-estimation des concentrations faite par celui-ci, et permettant ainsi d'augmenter la capacité du système à détecter les événements liés aux dépassements des seuils réglementaires.

Pour les $PM_{2.5}$, l'adaptation statistique parvient maintenant à bien corriger les prévisions du modèle brut, permettant une amélioration de l'ensemble des performances.

Pour le NO_2 , l'adaptation statistique permet de stabiliser les performances sur l'ensemble des classes de concentration et d'améliorer la cohérence entre observations et prévisions. Le nombre de fausses détections est réduit à zéro.

Les résultats de l'évaluation de la composition des PM_1 montre une légère dégradation par rapport à 2021. La part d'ammonium, de nitrates, de sulfates et de matière organique est moins bien représentée dans la spéciation des PM_1 qu'avec la version précédente de CHIMERE ce qui constitue un point de vigilance pour de plus amples investigations en cours.

Tous polluants confondus, les prévisions sur les régions d'Outre-mer des Caraïbes¹¹ sont satisfaisantes et généralement conformes aux scores obtenus en France métropolitaine, avec quelques nuances liées aux caractéristiques de ces zones et à la forte incidence des panaches de poussières désertiques d'origine saharienne sur les concentrations en particules. A noter que le nombre souvent limité de stations de mesure sur ces régions de faibles superficies peut affecter la qualité de l'évaluation.

¹¹ Prev'air est opérationnel sur les DROM Caraïbes depuis février 2018.

4. GLOSSAIRE

Abréviations	Libellés
Régions :	
ARA	Auvergne-Rhône-Alpes
BFC	Bourgogne-Franche-Comté
BRE	Bretagne
CVL	Centre-Val de Loire
COR	Corse
EST	Grand Est
HDF	Hauts-de-France
IDF	Ile-de-France
NAQ	Nouvelle-Aquitaine
NOR	Normandie
OCC	Occitanie
PAC	Provence-Alpes-Côte d'Azur
PDL	Pays de la Loire
DROM :	Départements et régions d'outre-mer :
GUA	Guadeloupe
MTQ	Martinique
GUF	Guyane (française)
AMU	Arrêté Mesures d'Urgence (réfère à l'arrêté du 7 avril 2016)
AS ou AS-CHI	Adaptation Statistique de CHIMERE
CHI	CHIMERE
MOCA	MOCAGE
J0, J1, J2, J3	Jours de prévision correspondant respectivement au jour-même, au lendemain, au surlendemain, et au sur-surlendemain

5. LISTE DES ANNEXES

Annexes	titres
Annexe 1	L'adaptation statistique dans Prev'Air
Annexe 2	Eléments de table de contingence
Annexe 3	Scores statistiques classiques
Annexe 4	Liste des figures
Annexe 5	Figures additionnelles

ANNEXES

Annexe 1 - L'adaptation statistique dans Prev'Air

L'adaptation statistique est un post-traitement qui permet de corriger les erreurs de prédiction d'un modèle déterministe en prenant en compte les mesures de terrain. Elle consiste à prévoir une concentration aux stations de mesure à partir des observations, des variables météorologiques et des prévisions déterministes, et de spatialiser ces informations. Ce croisement de l'informations spatiale contenue dans un champ de concentration surfacique CHIMERE avec des données statistiques issues de la mesure permet de tirer le meilleur de la modélisation et de la mesure. L'objectif final étant pour l'opérateur en qualité de l'air de produire des cartes de prévision les plus fiables et les plus abouties pour répondre aux missions d'alerte en cas d'arrivée d'épisode.

L'adaptation statistique est une méthodologie en deux étapes. La première étape utilise les connaissances de pollution sur un historique passé (mesure et prévision) et des champs de météorologie afin d'établir une estimation statistique aux N stations du niveau de pollution à l'échéance J0. Elle est étendue par la suite aux échéances J1 puis J2. Afin de limiter le nombre de calculs, seuls les indicateurs du maximum journalier et de la moyenne journalière sont considérés. La méthodologie utilise la régression multilinéaire afin d'estimer une concentration à l'aide de facteurs appelés « variables explicatives ». Les variables explicatives identifiées lors du projet CITEAIR2 et à travers des travaux menés avec d'autres partenaires (AIRAQ, Univ. Nantes, IMT) sont :

- La température prévue à 2m (K)
- La hauteur prévue de la couche limite (m ou log)
- L'humidité relative prévue
- La vitesse de vent horizontal prévue (m/s)
- Les concentrations prévues (CHIMERE) et observées (stations) de la veille pour les différents polluants considérés (O₃, NO₂, PM₁₀, PM_{2.5})
- Les concentrations moyennes de la veille mesurées aux stations pour les différents polluants
- La moyenne des concentrations mesurées sur les six premières heures de la journée pour chaque polluant
- Le jour de la semaine (lundi à dimanche)

Dans la deuxième étape, à partir de ces N estimations aux stations, une spatialisation est opérée par krigeage avec le modèle CHIMERE en dérive externe. La grille d'entrée de krigeage est celle de CHIMERE, FRA4k, avec une résolution de 4 km environ sur la France. La grille de sortie est FRA2k, de résolution intermédiaire 2 km afin d'atteindre la résolution de 1 km nécessaire pour Prev'Air Urgence et pour le calcul des populations exposées à des valeurs de concentrations excédant les seuils réglementaires ainsi que le calcul des surfaces avec des concentrations dépassant les seuils réglementaires.

La méthodologie de spatialisation mise en œuvre depuis plusieurs années pour l'ozone et le NO₂ est un krigeage, avec CHIMERE en dérive externe.

Pour les particules PM₁₀ et PM_{2,5}, un co-krigeage est mis en œuvre (avec CHIMERE en dérive externe) afin d'assurer une cartographie conjointe de ces deux polluants¹².

¹² Beauchamp, M., LCSQA notes, <https://www.lcsqa.org/fr/rapport/2015/ineris/synthese-developpements-recents-matiere-cartes-analysees-resultats-modelisation-> 2015b

Annexe 2 - Eléments de table de contingence

La table de contingence des prévisions d'un modèle se présente comme suit :

	<i>Obs > seuil</i>	<i>Obs < seuil</i>
<i>Prévi > seuil</i>	Bonne détection (BD+)	Fausse détection (FD)
<i>Prévi < seuil</i>	Détection manquée (DM)	Bonne non-détection (BD-)

Bonne détection +, ou BD+ : bonne prévision de dépassement du seuil

Bonne détection -, ou BD- : bonne prévision de non-dépassement du seuil

Détection manquée, ou DM : dépassement de seuil observé en station mais non prévu par le modèle

Fausse détection, ou FD : dépassement de seuil prévu par le modèle mais non observé en station

A partir de ces paramètres, il est possible de calculer plusieurs indicateurs permettant de mieux formaliser les performances d'un modèle vis-à-vis de la détection des dépassements.

	<i>Obs > seuil</i>	<i>Obs < seuil</i>	<i>Total</i>
<i>Prévi > seuil</i>	a	b	a+b
<i>Prévi < seuil</i>	c	d	c+d
<i>Total</i>	a+c	b+d	a+b+c+d

POD = « Probability of Detection », ou probabilité de détection

C'est le taux de bonnes prévisions de dépassements de seuil par rapport au nombre total de dépassements observés.

$$POD = \frac{a}{a + c}$$

FAR = « False Alarm Ratio », ou taux de fausses alertes

C'est le taux de mauvaises prévisions de dépassements de seuil par rapport au nombre total de dépassements prévus par le modèle.

$$FAR = \frac{b}{a + b}$$

SR = « Success Ratio », ou taux de succès

C'est le taux de bonnes prévisions de dépassements de seuil par rapport au nombre total de dépassements prévus par le modèle.

$$SR = \frac{a}{a + b} = 1 - FAR$$

FB = « Frequency Bias », ou biais de prévision

C'est le biais de prévision des dépassements de seuils. S'il est inférieur à 1, la prévision a tendance à faire plus de détections manquées que de fausses détections.

$$FB = \frac{a + b}{a + c}$$

CSI = « Critical Success Index » ou « Threat Score »

C'est le taux de bonnes prévisions de dépassements de seuil par rapport au nombre total d'évènements prédits et manqués.

$$CSI = \frac{a}{a + b + c}$$

Annexe 3 - Scores statistiques classiques

Biais moyen : Estimateur des écarts entre prévisions et observations, exprimé en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Il indique si la simulation surestime (valeurs positives) ou sous-estime (valeurs négatives) les concentrations réellement mesurées.

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

avec N 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.

RMSE : « Root Mean Square Error », exprimée en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Elle informe sur la capacité du modèle à reproduire les niveaux de concentrations observés et doit être la plus faible possible.

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

avec N 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.

Corrélation : exprimée sans dimension, elle informe sur la cohérence des variabilités temporelle ou spatiale des concentrations observées et prévues. Plus elle est proche de 1, et plus la simulation reproduit correctement les variations des concentrations observées.

$$R = \frac{\text{cov}(P, O)}{\sqrt{\text{var}(P)} \cdot \sqrt{\text{var}(O)}} = \frac{\sum_{i=0}^N (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=0}^N (P_i - \bar{P})^2} \sqrt{\sum_{i=0}^N (O_i - \bar{O})^2}}$$

avec N le nombre de stations de mesure, P_i la valeur de prévision à la station i , \bar{P} la moyenne des prévisions, O_i la valeur observée à la station, et \bar{O} la moyenne des observations.

Annexe 4 - Liste des figures

Figure 1 : Ozone – Carte de répartition des stations de fond (urbaines, périurbaines et rurales) pour l’année 2022 en France métropolitaine et dans les départements et régions d’outre-mer avec différenciation des régions par les couleurs	12
Figure 2 : Ozone - Scores de RMSE, biais et corrélation par région des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l’adaptation statistique de CHIMERE (vert) d’avril à septembre 2022 sur l’échéance J0. Les objectifs de qualité sont indiqués par les lignes horizontales oranges.....	13
Figure 3 : Ozone - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction de la typologie de station (urbaines, périurbaines, rurales) des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l’adaptation statistique de CHIMERE (vert) d’avril à septembre 2022 sur l’échéance J0	14
Figure 4 : Ozone - Scores de RMSE et biais par gamme de concentration des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l’adaptation statistique de CHIMERE (vert) d’avril à septembre 2022 sur l’échéance J0	14
Figure 5 : Ozone - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction du jour de prévision pour MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et pour l’adaptation statistique de CHIMERE (vert) d’avril à septembre 2022	16
Figure 6 : Ozone - Tables de contingence sur la période d’avril à septembre 2022 à l’échéance J0 pour le seuil de 180 µg/m ³ . Les bonnes détections sont en bleu, les fausses détections en orange, et les détections manquées en vert. Gauche : Tables de contingence de MOCAGE (groupe de gauche), CHIMERE (groupe du milieu), et de l’adaptation statistique de CHIMERE (groupe de droite) pour la France entière. Droite : Table de contingence de l’adaptation statistique de CHIMERE déclinée par région	17
Figure 7 : Ozone - Nombre d’occurrences au cours du temps des dépassements du seuil d’information (180 µg/m ³) de MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l’adaptation statistique de CHIMERE (vert) d’avril à septembre 2022 sur l’échéance J0	17
Figure 8 : Ozone - Diagramme de performance pour MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge) et l’adaptation statistique de CHIMERE (vert) d’avril à septembre 2022 pour l’échéance J0	18
Figure 9 : Ozone - Table de contingence des critères AMU (critère surfacique et critère de population, sans distinction) pour l’AS de CHIMERE sur la période d’avril à septembre 2022 à l’échéance J0. Les bonnes détections sont en vert, les fausses détections en orange, et les détections manquées en bleu.....	19
Figure 10 : Ozone - Synthèse des scores de RMSE (barres colorées), biais moyen (points noirs) et corrélation (pointillés gris) entre avril et septembre depuis 2019 pour MOCAGE, CHIMERE et son adaptation statistique	19
Figure 11 : PM ₁₀ – Carte de répartition des stations de fond (urbaines, périurbaines et rurales) pour l’année 2022 en France métropolitaine et dans les départements et régions d’outre-mer avec différenciation des régions par les couleurs	21

Figure 12 : PM ₁₀ - Scores de RMSE, biais et corrélation par région des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2022 sur l'échéance J0.....	22
Figure 13 : PM ₁₀ - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction de la typologie de station (urbaines, périurbaines, rurales) des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2022 sur l'échéance J0	22
Figure 14 : PM ₁₀ - Scores de RMSE et biais par gamme de concentration des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2022 sur l'échéance J0.....	23
Figure 15 : PM ₁₀ - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction du jour de prévision pour MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et pour l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) en 2022	25
Figure 16 : PM ₁₀ - Nombre d'occurrences au cours du temps des dépassements du seuil d'information (50 µg/m ³) de MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2022 sur l'échéance J0. Les dépassements survenus dans les DROM ne sont pas pris en compte.....	26
Figure 17 : PM ₁₀ - Tables de contingence pour 2022 à l'échéance J0 pour le seuil de 50 µg/m ³ . Les bonnes détections sont en bleu, les fausses détections en orange, et les détections manquées en vert. En haut à gauche : Tables de contingence de MOCAGE (groupe de gauche), CHIMERE (groupe du milieu), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (groupe de droite) pour la France métropolitaine. En haut à droite : Table de contingence de CHIMERE déclinée par régions, incluant les DROM. En bas : Tables de contingence de MOCAGE et de l'AS de CHIMERE déclinées par régions.	26
Figure 18 : PM ₁₀ - Diagramme de performance pour MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge) et l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2022 pour l'échéance J0 en France métropolitaine.....	27
Figure 19 : PM ₁₀ – Série temporelle des dépassements du seuil d'information (50 µg/m ³) de CHIMERE (rouge) pour 2022 sur l'échéance J0, exclusivement sur les départements et régions d'outre-mer (Guadeloupe, Martinique, Guyane)	28
Figure 20 : PM ₁₀ - Table de contingence des critères AMU (critère surfacique et critère de population, sans distinction) pour l'AS de CHIMERE sur l'année 2022 à l'échéance J0. Les bonnes détections sont en vert, les fausses détections en orange, et les détections manquées en bleu.	29
Figure 21 : PM ₁₀ - Synthèse des scores de RMSE (barres colorées), biais moyen (points noirs) et corrélation (pointillés gris) entre janvier et décembre depuis 2019 pour MOCAGE, CHIMERE et son adaptation statistique.....	30
Figure 22 : PM _{2.5} – Carte de répartition des stations de fond (urbaines, périurbaines et rurales) pour l'année 2022 en France métropolitaine et dans les départements et régions d'outre-mer avec différenciation des régions par les couleurs	31
Figure 23 : PM _{2.5} - Scores de RMSE, biais et corrélation par région des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2022 sur l'échéance J0.....	32

Figure 24 : PM _{2.5} - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction du jour de prévision pour MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et pour l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) en 2022	33
Figure 25 : PM _{2.5} - Synthèse des scores de RMSE (barres colorées), biais moyen (points noirs) et corrélation (pointillés gris) entre janvier et décembre depuis 2019 pour MOCAGE, CHIMERE et son adaptation statistique	34
Figure 26 : NO ₂ – Carte de répartition des stations de fond (urbaines, périurbaines et rurales) pour l'année 2022 en France métropolitaine et dans les départements et régions d'outre-mer avec différenciation des régions par les couleurs	35
Figure 27 : NO ₂ - Scores de RMSE, biais et corrélation par région des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2022 sur l'échéance J0	36
Figure 28 : NO ₂ - Scores de RMSE et biais par gamme de concentration des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2022 sur l'échéance J0	36
Figure 29 : NO ₂ - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction du jour de prévision pour MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et pour l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) en 2022	37
Figure 30 : NO ₂ - Nombre d'occurrences au cours du temps des dépassements du seuil d'information (200 µg/m ³) en France métropolitaine de MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2022 sur l'échéance J0	38
Figure 31 : NO ₂ - Synthèse des scores de RMSE (barres colorées), biais moyen (points noirs) et corrélation (pointillés gris) entre janvier et décembre depuis 2019 pour MOCAGE, CHIMERE et son adaptation statistique	39
Figure 32 : Carte de répartition des stations de mesure CARA pour l'année 2022, avec différenciation des régions par les couleurs.....	40
Figure 33 : PM ₁ – Séries temporelles (moyennes sur les stations) des moyennes journalières des cinq composantes de PM ₁ étudiées (µg/m ³) pour 2022. De gauche à droite et de haute en bas : chlore, ammonium, nitrates, partie organique et sulfates	42
Figure 34 : PM ₁₀ – Moyenne des observations par région des prévisions CHIMERE pour 2022 sur l'échéance J0	57
Figure 35 : PM ₁₀ – Biais relatif (biaispct) par région des prévisions CHIMERE pour 2022 sur l'échéance J0	57
Figure 36 : Ozone – Moyenne des observations par région des prévisions CHIMERE pour 2022 sur l'échéance J0	58
Figure 37 : Ozone – Biais relatif (biaispct) par région des prévisions CHIMERE pour 2022 sur l'échéance J0	58

Annexe 5 - Figures additionnelles

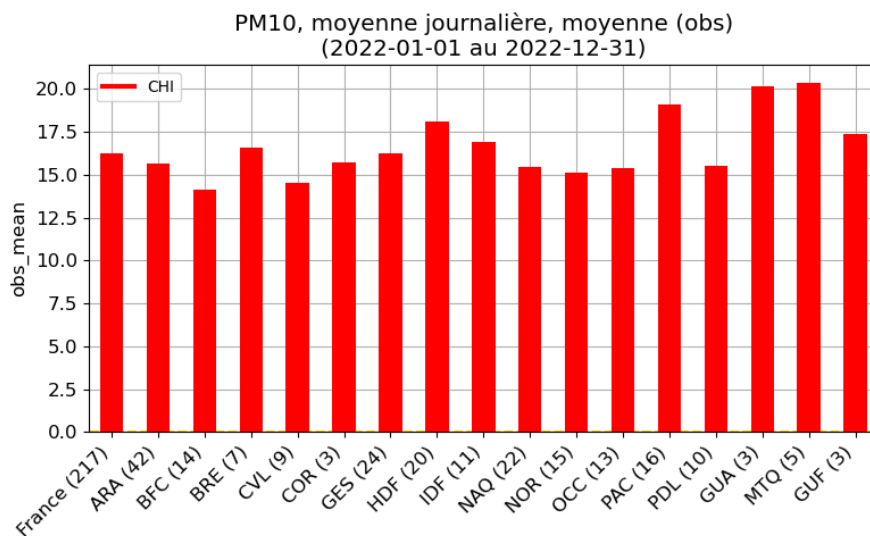


Figure 34 : PM₁₀ – Moyenne des observations par région des prévisions CHIMERE pour 2022 sur l'échéance J0

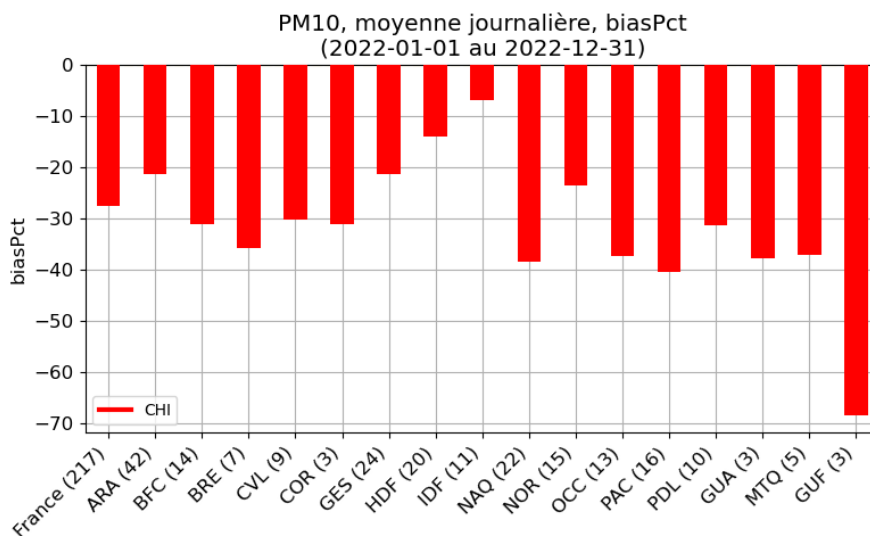


Figure 35 : PM₁₀ – Biais relatif (biaspct) par région des prévisions CHIMERE pour 2022 sur l'échéance J0

$$biasPct = \frac{\bar{y} - \bar{x}}{\bar{x}} \times 100$$

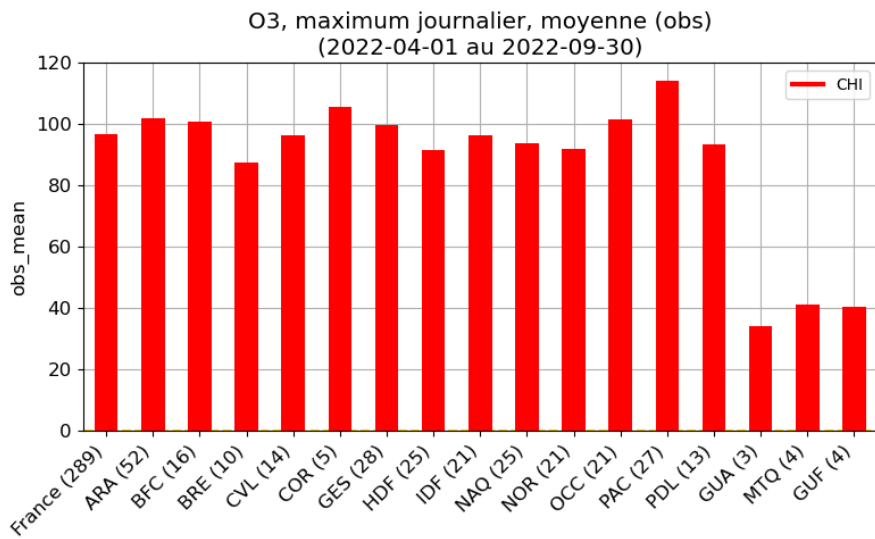


Figure 36 : Ozone – Moyenne des observations par région des prévisions CHIMERE pour 2022 sur l'échéance J0

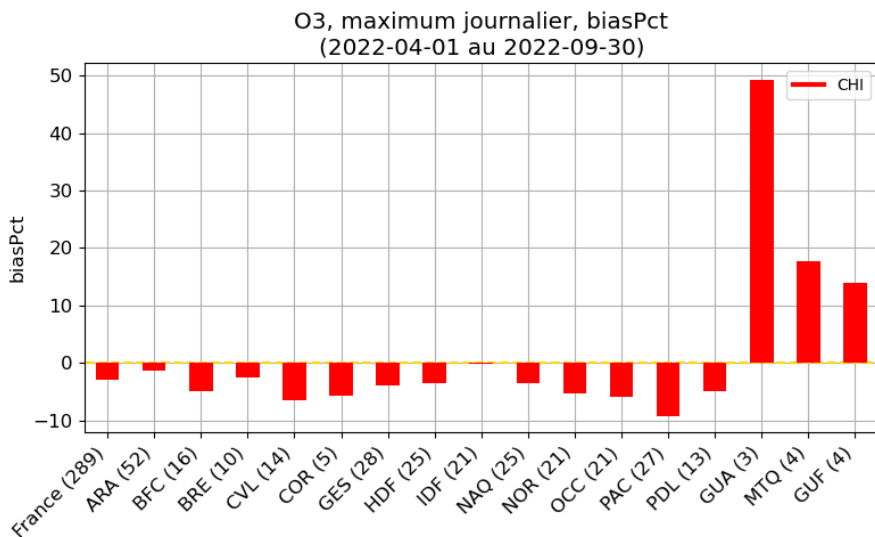


Figure 37 : Ozone – Biais relatif (biaspct) par région des prévisions CHIMERE pour 2022 sur l'échéance J0

