LCSQA

Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air

# Rapport de performances PREV'AIR 2020

INERIS maîtriser le risque pour un développement durable

LNE Laboratoire National de Métrologie et d'Essais

IMT Nord Europe
École Mines-Télécom
IMT-Université de Lille

"L'expertise au service de la qualité de l'air"

# Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air

# RAPPORT DE PERFORMANCES PREV'AIR 2020

**Blandine Raux, Anthony Ung et Frédérik Meleux**
**INERIS**

**Février 2022**

*Vérification : MELEUX FREDERIK; COLETTE AUGUSTIN*
*Approbation : Document approuvé le 23/02/2022 par BOUDET CELINE*

MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
ET SOLIDAIRE

*Liberté*
*Égalité*
*Fraternité*

# LE LABORATOIRE CENTRAL DE SURVEILLANCE DE LA QUALITE DE L'AIR

Le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air est constitué des laboratoires de l'IMT Lille Douai, de l'INERIS et du LNE. Il mène depuis 1991 des études et des recherches à la demande du Ministère chargé de l'environnement, 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) du Ministère chargé de l'Environnement. 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.

L'objectif principal 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. Cette action est menée dans le cadre des réglementations nationales et européennes mais aussi dans un cadre plus prospectif destiné à fournir aux AASQA de nouveaux outils permettant d'anticiper les évolutions futures.

# TABLE DES MATIERES

**RESUME** ..... **7**

**ABSTRACT** ..... **9**

**REMERCIEMENTS ET COLLABORATIONS** ..... **11**

**1. INTRODUCTION** ..... **12**

**2. PERFORMANCES DES PREVISIONS DE QUALITE DE L'AIR POUR 2020** ..... **13**

2.1 Prévisions d'ozone ..... 14

2.1.1 Performances du modèle ..... 14
2.1.2 Performances par rapport aux seuils règlementaires ..... 18
2.1.3 Performances en lien avec les critères AMU ..... 20
2.1.4 Evolution de l'adaptation statistique de CHIMERE depuis 2017 ..... 21
2.1.5 Performances sur les DROM ..... 22

2.2 Prévisions de $PM_{10}$ ..... 23

2.2.1 Performances du modèle ..... 23
2.2.2 Performances par rapport aux seuils règlementaires ..... 27
2.2.3 Performances en lien avec les critères AMU ..... 29
2.2.4 Evolution de l'adaptation statistique de CHIMERE depuis 2017 ..... 30
2.2.5 Performances sur les DROM ..... 31

2.3 Prévisions de $PM_{2.5}$ ..... 33

2.3.1 Performances du modèle ..... 33
2.3.2 Performances sur les DROM ..... 35

2.4 Prévisions de $NO_2$ ..... 37

2.4.1 Performances du modèle ..... 37
2.4.2 Performances par rapport aux seuils règlementaires ..... 40
2.4.3 Performances sur les DROM ..... 41

2.5 Evaluation de la composition des $PM_1$ (CARA) ..... 43

**3. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES** ..... **45**

**4. 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 régions et abréviations ..... 54

Annexe 5 – Liste des figures ..... 55

## RESUME

Ce rapport présente les performances des prévisions nationales opérées dans le cadre de la plateforme Prev'Air (www.prevair.org). L'objectif est de montrer en toute transparence 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 $O_3$, $NO_2$, $PM_{10}$ 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 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 2020 (avril à septembre). Les autres polluants ($PM_{10}$, $PM_{2.5}$, $NO_2$) sont évalués sur l'ensemble de l'année 2020.

L'année 2020 a été marquée par la crise Covid-19 et par les confinements que celle-ci a entraînés au sein des pays de l'Europe, perturbant ainsi les activités humaines habituelles et les émissions de polluants associées. Le système Prev'Air a cependant continué de produire des prévisions sur la base de ses émissions standard, donc sans modulation vis-à-vis de ces perturbations. Notons toutefois que le système Prev'Air bénéficie d'une approche de correction automatique statistique et géostatistique qui repose sur les observations en temps réel, permettant ainsi de prendre en compte indirectement l'effet des confinements. Une prévision opérationnelle complémentaire a été produite à partir de mars 2020, intégrant une estimation de baisse des émissions liée aux mesures de lutte contre la pandémie Covid[1], mais elle ne fait pas l'objet d'une évaluation dans le cadre de ce rapport.

Peu d'épisodes persistants d'ampleur nationale ont été relevés sur les périodes étudiées : un pour l'ozone, du 6 au 12 août, et trois pour les $PM_{10}$, du 21 au 26 janvier (avec dépassement du seuil d'alerte), du 27 au 28 mars, et du 22 au 27 novembre. L'évaluation de ces épisodes est effectuée à la fois sur les prévisions brutes de Prev'Air et sur les calculs de l'adaptation statistique, qui visent à corriger les biais systématiques du modèle brut par un processus d'apprentissage historique. Les gains obtenus par le modèle statistique résident dans sa capacité à corriger les biais de représentativité du modèle brut. 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'urgence[2].

Les prévisions Prev'Air pour les DROM des caraïbes ont également été évaluées et montrent des performances satisfaisantes.

[1]https://www.ineris.fr/fr/ineris/actualites/confinement-environnement-nouvel-outil-visualiser-quotidiennement-effets

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

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 national[3] qui a établi ces valeurs cibles pour les différents scores ainsi que le contenu à faire figurer dans les rapports annuels d'évaluation des plateformes de prévisions constituant le dispositif national de surveillance de la qualité de l'air. 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 des $PM_1$ prévue par Prev'air a été évaluée pour la première fois avec l'aide des données CARA[4]. L'ammonium, les nitrates et les sulfates sont relativement bien prévus par le modèle CHIMERE. La partie organique est fortement sous-estimée. Quant au chlore, une nette amélioration devrait être constatée à partir de fin 2021 avec la mise en place de la nouvelle version de CHIMERE (v2020).

[3] https://www.lcsqa.org/fr/referentiel-technique-national

[4] Favez et al. (Atmosphere, 2021) CARA program

## ABSTRACT

This report presents the performance 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 $O_3$, $NO_2$, $PM_{10}$ 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 (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 2020 (April to September). The other pollutants ($PM_{10}$, $PM_{2.5}$, $NO_2$) are assessed over the whole year 2020.

The year 2020 was affected by the Covid-19 crisis and by the lockdowns that occurred in European countries, thus disrupting the usual human activities and associated emissions of pollutants. However, the Prev'Air system continued to produce forecasts based on its standard emissions, without modulation regarding these disturbances. However, it should be noted that the Prev'Air system benefits from an automatic statistical and geostatistical correction approach based on real-time observations, thus making it possible to indirectly consider the effect of confinements. An additional operational forecast was produced starting from March 2020, implementing an estimation of the reduction in emissions due to measures taken against the Covid pandemic[5], but its assessment is not included in this report.

Few persistent episodes of national scope were noted over the studied periods: one for ozone, from August 6 to 12, and three for PM10, from January 21 to 26 (with exceedances of the alert threshold), from March 27 to 28, and from November 22 to 27.

The evaluation of these episodes is carried out both on Prev'Air's raw forecasts and on the statistical adaptation of the Chimere which aims at correcting the systematic biases of the raw model through a historical learning process. The gains obtained by the statistical model lie in its ability to correct the representativeness bias of the raw model. 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 decree[6].

The Prev'air forecasts for the Caribbean DROMs have been assessed as well and show satisfactory performances.


[5]https://www.ineris.fr/fr/ineris/actualites/confinement-environnement-nouvel-outil-visualiser-quotidiennement-effets

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

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 document[7] which established these target values for the different scores 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 $PM_1$ predicted by Prev'air was assessed for the first-time using CARA[8] data. Ammonium, nitrates and sulphates are predicted relatively well by the CHIMERE model. The organic part is greatly underestimated. Concerning chlorine, an improvement should be noted from the end of 2021 with the implementation of the new version of CHIMERE (v2020).

[7] https://www.lcsqa.org/fr/referentiel-technique-national
[8] Favez et al. (Atmosphere, 2021) CARA program

## REMERCIEMENTS ET COLLABORATIONS

Le consortium Prev'Air (Ineris, Météo-France, CNRS et LCSQA) 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 le mise à disposition de l'outils d'évaluation statistique Evaltools.

Prev'Air remercie également ECMWF et les services COPERNICUS pour la fourniture de données alimentant le système.

# 1. INTRODUCTION

Quotidiennement depuis 2003, Prev'Air fournit des prévisions de qualité de l'air en France en modélisant les concentrations des principaux polluants atmosphériques règlementés (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).

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.prevair.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 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 2020 et répond au besoin de transparence sur l'aptitude des modèles 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.prevair.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.

Pour chaque polluant, ce rapport s'intéresse dans un premier temps aux performances globales des modèles bruts et de l'adaptation statistique, avant d'étudier de manière plus approfondie leurs comportements vis-à-vis de la détection de dépassements de seuils règlementaires et de leur respect des critères définis dans l'arrêté mesure d'urgence AMU (Arrêté du 7 avril 2016[9]). Une comparaison des performances sur plusieurs années est finalement faite pour conclure la discussion.

Pour la première fois, ce rapport est complété par une évaluation comparant la composition des $PM_1$ (Cl, $NO_3$, $NH_4$, $SO_4$ et Organique) établie par Chimere et les données d'observation relevées dans le cadre du programme CARA[10].

[9] 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

[10] Favez et al. (Atmosphere, 2021) CARA program

## 2. PERFORMANCES DES PREVISIONS DE QUALITE DE L'AIR POUR 2020

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 qualité[11] à respecter pour les scores statistiques de l'ozone et des $PM_{10}$ sont détaillés dans le Tableau 1 ci-dessous :

| Polluant | Biais (µg/m³) | RMSE (µg/m³) | Corrélation |
|---|---|---|---|
| **$O_3$** | -10/+10 | 25 | 0,7 |
| **$PM_{10}$** | -7,5/+7,5 | 15 | 0,6 |

*Tableau 1 : Objectifs de qualité définis pour $O_3$ et $PM_{10}$ pour le biais, la RMSE et la corrélation*

L'analyse du comportement des modèles vis-à-vis de la détection des dépassements des seuils règlementaires 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/m³ en moyenne journalière | 80 µg/m³ en moyenne journalière |
| **$O_3$** | 180 µg/m³ en moyenne horaire | 240 µg/m³ en moyenne horaire |
| **$NO_2$** | 200 µg/m³ en moyenne horaire | 400 µg/m³ 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 de situation 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 règlementaire est supérieure à 100 km².

[11] 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.

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.

## 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, où les concentrations sont les plus élevées et donc 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 µg/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'AIR, sur un panel de 272 stations de fond disponibles, réparties en 50 stations rurales, 81 stations périurbaines et 141 stations urbaines.

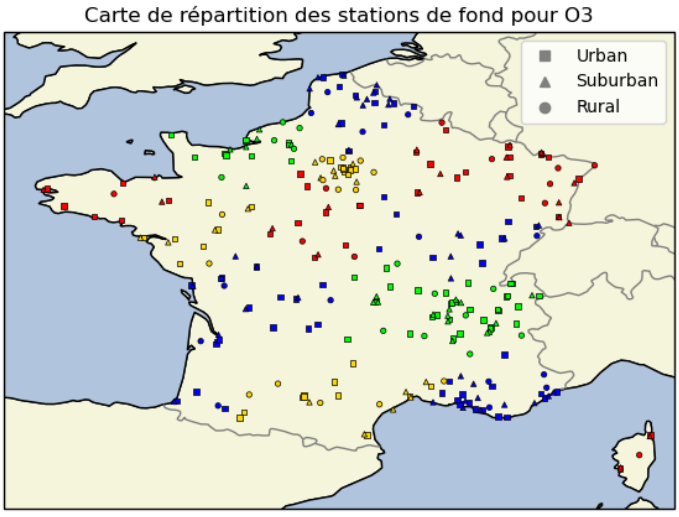


*Figure 1 : Ozone – Carte de répartition des stations de fond (urbains, périurbaines et rurales) avec différenciation des régions par les couleurs*

### 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 en France Métropolitaine pour les modèles CHIMERE (CHI) et MOCAGE (MOCA) ainsi que pour l'adaptation statistique de CHIMERE (AS-CHI) pour le jour de prévision J0.

La Figure 2 décline ces mêmes scores sur les régions administratives, le premier groupe de barres, à l'extrême gauche, correspondant aux scores sur l'ensemble des 272 stations françaises.

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

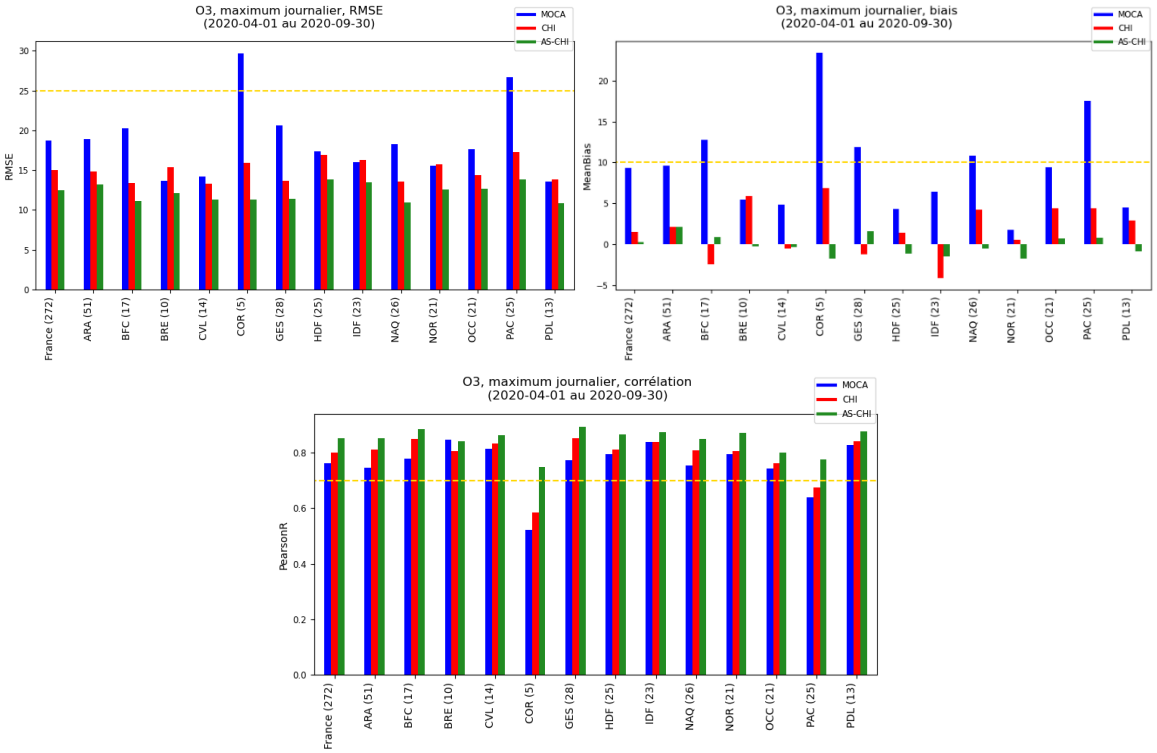


*Figure 2 : Ozone - Scores de RMSE, biais et corrélation par région métropolitaine des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) d'avril à septembre 2020 sur l'échéance J0. Les objectifs de qualité sont indiqués par les lignes horizontales oranges.*

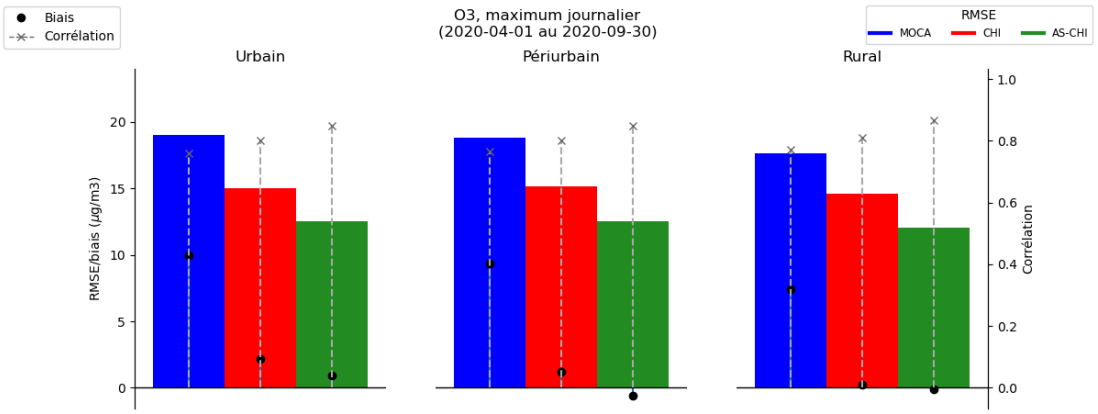


*Figure 3 : Ozone - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction de la typologie de station (urbaines, périurbaines, rurales) des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) d'avril à septembre 2020 sur l'échéance J0*

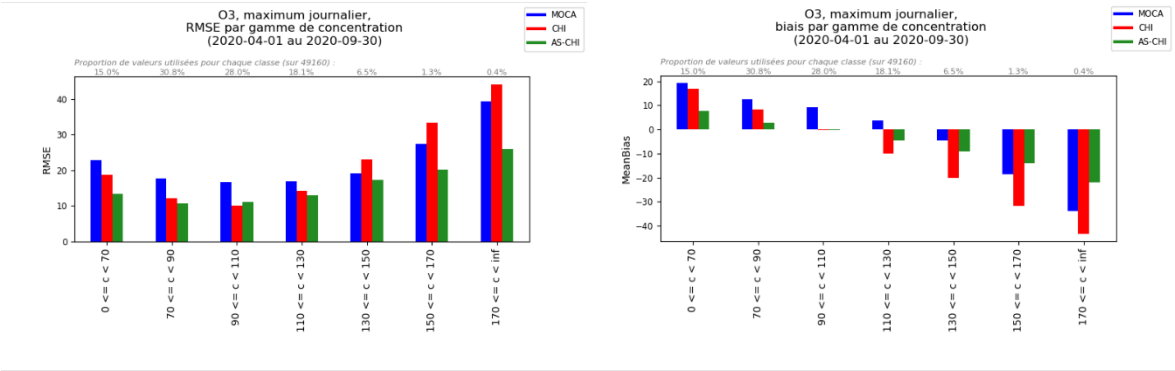


*Figure 4 : Ozone - Scores de RMSE et biais par gamme de concentration des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) d'avril à septembre 2020 sur l'échéance J0*

| Moins de 70 | 70 à 90 | 90 à 110 | 110 à 130 | 130 à 150 | 150 à 170 | Plus de 170 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 15% | 30,8% | 28% | 18,1% | 6,5% | 1,3% | 0,4% |

*Tableau 3 : Ozone – Proportion de valeurs utilisées pour le calcul de score de chaque gamme de concentration (µg/m³)*

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

- Un biais positif moyen sur la France de 9,3 µg/m$^3$ pour MOCAGE, 1,5 µg/m$^3$ pour CHIMERE, et 0,3 µg/m$^3$ pour l'AS.
- Une RMSE moyenne sur la France de 18,7 µg/m$^3$ pour MOCAGE, 15 µg/m$^3$ pour CHIMERE, et 12,5 µg/m$^3$ pour l'AS.
- Une corrélation moyenne sur la France de 0,76 pour MOCAGE, 0,8 pour CHIMERE, et 0,85 pour l'AS.
- Des scores relativement homogènes entre les trois typologies de stations étudiées.
- Quelques variations des scores selon les régions considérées, notamment pour le biais.
- Des performances « en U » selon les gammes de concentrations (observées), c'est-à-dire que les valeurs intermédiaires (entre 70 et 130 µg/m$^3$) sont les mieux prévues, tandis que les performances des valeurs basses ou extrêmes hautes (supérieures à 150 µg/m$^3$) sont dégradées.
- Une proximité des performances des prévisions sur toutes les régions à l'exception de la Corse et PACA, où la RMSE et le biais de MOCAGE sont plus élevés et les corrélations de CHIMERE et de MOCAGE sont plus faibles que dans les autres régions.

En moyenne sur la France, à l'échéance J0, les deux modèles et l'adaptation statistique respectent tous les objectifs de qualité pour l'ozone (biais inférieur à +10 µg/m$^3$ en valeur absolue, RMSE inférieure à 25 µg/m$^3$, corrélation supérieure à 0,7). Il est toutefois possible de noter quelques écarts locaux avec non-respect des objectifs de qualité, notamment en Corse et Provence-Alpes Côte d'Azur (RMSE, biais et corrélation pour MOCAGE, corrélation pour CHIMERE).

Le modèle CHIMERE présente globalement de meilleures performances que MOCAGE. Ce dernier surestime fortement les concentrations observées dans les régions du sud et de l'est, provoquant un biais proche ou supérieur à l'objectif qualité de 10 µg/m$^3$ dans celles-ci (Auvergne-Rhône-Alpes, Bourgogne-Franche-Comté, Corse, Grand Est, Nouvelle-Aquitaine, Occitanie, Provence-Alpes-Côte d'Azur).

L'adaptation statistique, quant à elle, améliore nettement les résultats sur toutes les régions par rapport à CHIMERE, prouvant ainsi que ce traitement statistique reproduit mieux les évolutions et l'amplitude des concentrations modélisées que le modèle brut. Pour la Corse et Provence-Alpes-Côte d'Azur, les corrélations de l'adaptation statistique respectent l'objectif qualité de 0,6, contrairement au 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 µg/m$^3$).

Les performances sont homogènes entre les différentes typologies de stations. Seule la typologie rurale présente des performances légèrement meilleures que dans les deux autres cas, avec notamment une réduction du biais et de la RMSE pour MOCAGE, et une augmentation de la corrélation pour l'adaptation statistique.

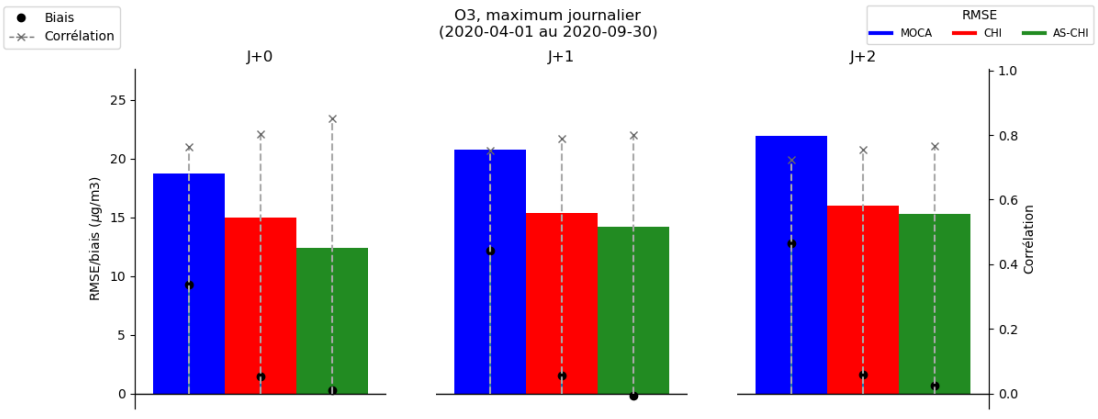


*Figure 5 : Ozone - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction du jour de prévision pour MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et pour l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) d'avril à septembre 2020*

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 la dégradation au fur et à mesure des échéances.

CHIMERE est globalement celui qui maintient le mieux ses performances. MOCAGE montre une nette dégradation dès le second jour de prévision (J1), avec une RMSE et un biais qui passent respectivement de 18,7 à 22 µg/m$^3$ et de 9,3 à 12,8 µg/m$^3$ entre J0 et J2. L'adaptation statistique, quant à elle, a une RMSE qui augmente de 1,8 µg/m$^3$ entre les échéances J0 et J1, et perd presque 0,1 de corrélation entre J0 et J2. Le biais oscille autour de 0, mais sans jamais dépasser 0,7 µg/m$^3$ en valeur absolue.

Quelle que soit l'échéance considérée, l'adaptation statistique conserve de meilleures performances que le modèle brut.

### 2.1.2 Performances par rapport aux seuils règlementaires

L'année 2020 a connu un seul épisode de pollution à l'ozone d'ampleur nationale du 6 au 12 août. Il a touché l'Ile-de-France, la Normandie, Grand Est, les Hauts-de-France, et le Centre-Val de Loire.

Les figures Figure 6 à Figure 8 font état de la capacité des modèles à détecter les dépassements du seuil d'information et de recommandation de 180 µg/m$^3$. Des explications détaillées à propos des indicateurs utilisés dans les Figure 7 et Figure 8 sont présentes dans *Annexe 2 – Eléments de table de contingence*.

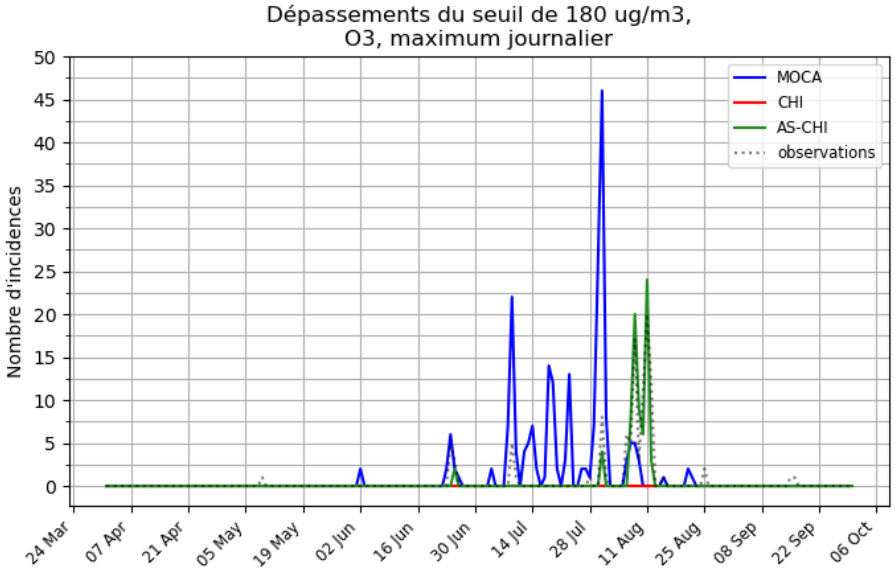


*Figure 6 : Ozone - Série temporelle des dépassements du seuil d'information (180 µg/m$^3$) de MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) d'avril à septembre 2020 sur l'échéance J0*

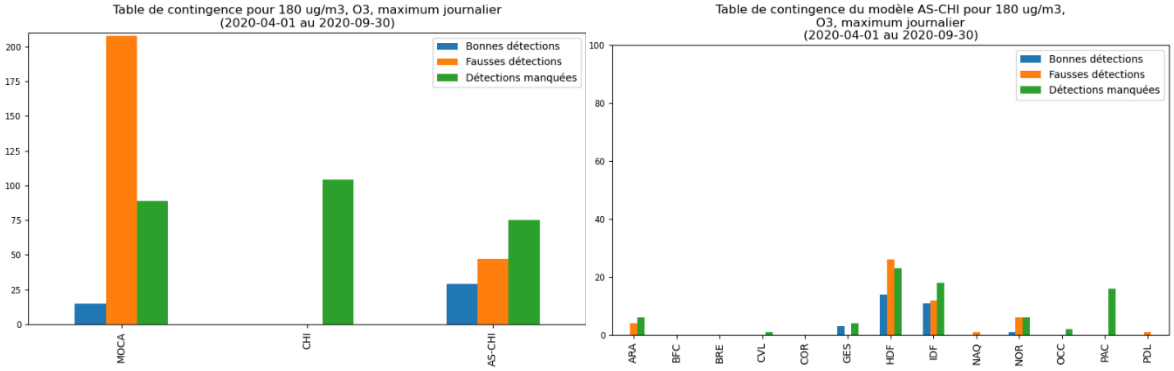


*Figure 7 : Ozone - Tables de contingence sur la période d'avril à septembre 2020 à l'échéance J0 pour le seuil de 180 µg/m³. Les bonnes détections sont en bleu, les fausses détections en orange, et les détections manquées en vert. Gauche : Tables de contingence de MOCAGE (groupe de gauche), CHIMERE (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*

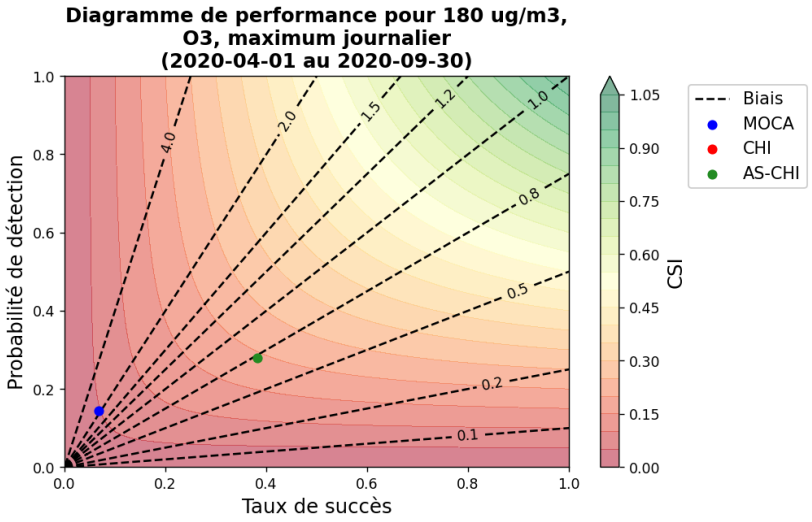


*Figure 8 : Ozone - Diagramme de performance pour MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge) et l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) d'avril à septembre 2020 pour l'échéance J0*

Ces figures permettent de distinguer trois comportements différents :

- MOCAGE surestime fortement les concentrations, ce qui conduit à de très nombreuses prévisions de dépassements qui ne correspondent que rarement à la réalité (15 bonnes détections sur la période, sur 104 au total) et sont très souvent de fausses détections (208, soit 93%). A cela il faut rajouter de nombreuses détections manquées (84). La Figure 6 indique plusieurs jours où MOCAGE prévoyait de nombreux dépassements sans que cela ne soit confirmé par l'observation.
- CHIMERE sous-estime largement les fortes concentrations et n'a détecté aucun dépassement sur la période (raison pour laquelle il n'apparaît pas sur le diagramme de performance).

- L'adaptation statistique sous-estime les fortes concentrations, ce qui implique peu de détections mais également proportionnellement moins d'erreurs. Ainsi, elle a prévu 76 dépassements sur la période, dont 47 fausses détections (soit un taux de succès de 38%). Précisons que les fausses détections illustrent les incertitudes de localisation géographique des zones en dépassement lors de journées avec des épisodes de pollution. Ce qui, d'un point de vue prévisionniste, est moins compliqué à analyser que des fausses alertes sur des journées où aucun dépassement n'est observé.

Ainsi, et comme le confirme la Figure 8, l'adaptation statistique de CHIMERE permet de détecter des dépassements du seuil de 180 µg/m$^3$, là où le modèle brut ne prévoyait rien. La probabilité de détection est ainsi de 28%, contre 0% pour le modèle brut. Les capacités de détection des dépassements de seuil de l'adaptation statistique sont de ce fait satisfaisantes. Le modèle MOCAGE détecte beaucoup plus de dépassements que CHIMERE et son adaptation statistique, mais avec un taux de succès bien plus faible (7%).

En ce qui concerne les détections d'un point de vue spatial, la Figure 7 – Droite montre que l'adaptation statistique parvient plutôt bien à respecter la répartition géographique des dépassements. Le nombre de fausses détections est ainsi minimisé dans toutes les régions ne présentant pas ou peu de dépassements (Bourgogne-Franche-Comté, Bretagne, Centre-Val de Loire, Corse, Nouvelle-Aquitaine, Occitanie, Pays de la Loire). A contrario, les Hauts-de-France et l'Ile-de-France sont les régions où se sont concentrées la majorité des dépassements de la période ; ce sont également les régions pour lesquelles l'adaptation statistique obtient le plus de bonnes détections.

### 2.1.3 Performances en lien avec les critères AMU

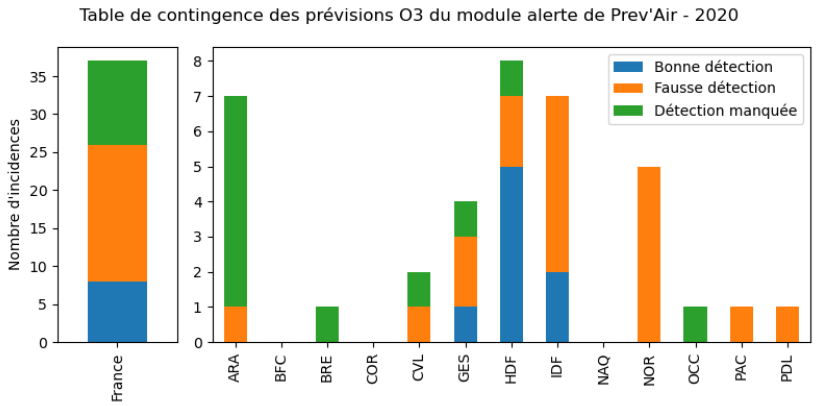


*Figure 9 : Ozone - Table de contingence des critères AMU (critère surfacique et critère de population, sans distinction) sur la période d'avril à septembre 2020 à l'échéance J0. Les bonnes détections sont en vert, les fausses détections en orange, et les détections manquées en bleu.*

La Figure 9 confirme le comportement décrit dans le paragraphe 2.1.2. Le nombre de fausses détections (18) et de détections manquées (11) est élevé relativement au nombre d'évènements considéré, toutefois l'année 2020 ne présente que peu d'épisodes de pollution, ce qui peut fausser les conclusions quant à la capacité du modèle à détecter ces évènements.

Au total, 8 validations du critère AMU ont été prévues correctement sur la période, soit 42% de l'ensemble des évènements qui ont eu lieu, réparties sur les régions Grand Est (1), Hauts-de-France (5) et Ile-de-France (2). La tendance à la surestimation spatiale des panaches d'ozone par l'AS Chimere engendre une occurrence de validation des critères AMU trop importante.

### 2.1.4 Evolution de l'adaptation statistique de CHIMERE depuis 2017

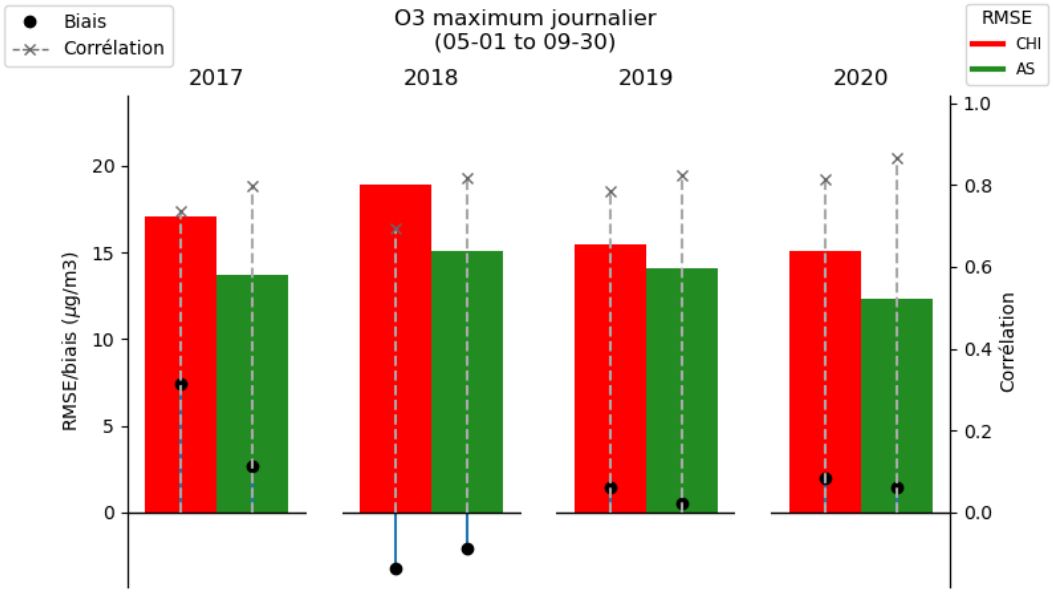


*Figure 10 : Ozone - Synthèse des scores de RMSE (barres colorées), biais moyen (points noirs) et corrélation (pointillés gris) entre mai et septembre depuis 2017 pour CHIMERE et pour son adaptation statistique*

Malgré les différences induites par la variabilité des concentrations observées suivant les années, la Figure 10 montre des performances pour l'ozone relativement stables depuis 2017 pour CHIMERE et pour son adaptation statistique. Une très légère dégradation pour le modèle brut peut être notée en 2017 et 2018, cependant rattrapée dès 2019. L'adaptation statistique n'a été que peu impactée par les variations de performances du modèle brut, et seule l'année 2018 montre des scores légèrement moins bons que ceux des autres années. Quelle que soit l'année considérée, l'adaptation statistique améliore bien la concordance entre les données issues du modèle et celles des observations.

A noter que les performances en 2020 montrent un léger mieux par rapport aux années antérieures. Cela peut s'expliquer par une sous-estimation des émissions en conditions normales corrigée en 2020 par les baisses d'activité liées à la crise du Covid, qui ne sont pas retranscrites dans les émissions de la plateforme Prev'air.

## 2.1.5 Performances sur les DROM

A l'instar de la Figure 2, la Figure 11 présente des scores sur 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 en France métropolitaine. Elle est cependant complétée par les scores obtenus par CHIMERE sur les départements et régions d'Outre-mer modélisés de la zone caraïbes : Guadeloupe, Martinique et Guyane.

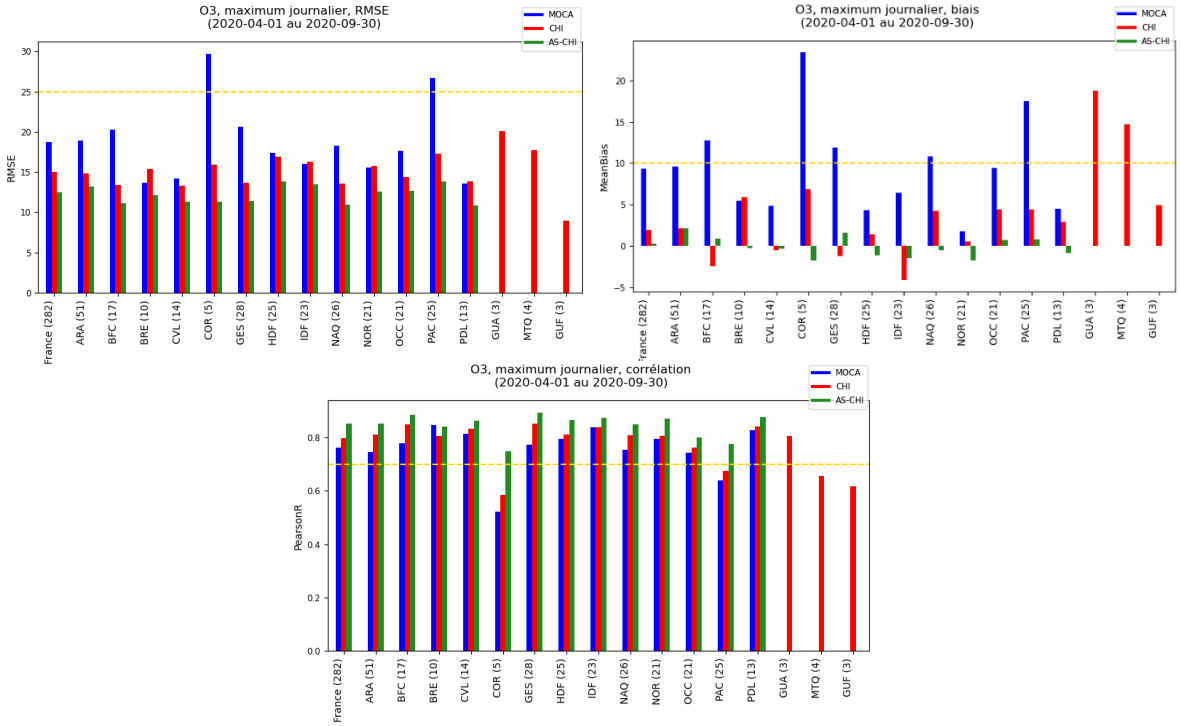


*Figure 11 : Ozone sur la métropole et les Antilles - Scores de RMSE, biais et corrélation par région française des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) d'avril à septembre 2020 sur l'échéance J0*

CHIMERE présente des scores de RMSE et de biais moins performants sur la Guadeloupe et la Martinique que sur les autres régions. Bien que les RMSE de ces deux départements respectent l'objectif qualité, elles demeurent supérieures aux performances obtenues sur le reste de la France, avec respectivement 20 et 17,7 µg/m$^3$. Leurs biais, en revanche, dépassent largement l'objectif de 10 µg/m$^3$ en valeur absolue, avec des biais positifs de 18,7 et 14,7 µg/m$^3$ respectivement, marquant une forte surestimation des concentrations. Finalement, la corrélation de 0,8 de la Guadeloupe est très bonne, proche de celles des autres régions, alors que la corrélation de 0,65 de la Martinique se trouve en-dessous de l'objectif qualité.

En ce qui concerne la Guyane, les performances de CHIMERE sont plutôt satisfaisantes, avec une RMSE et un biais réduits malgré une corrélation qui se trouve à 0,1 points en-dessous de l'objectif qualité.

Les prévisions CHIMERE sur ces trois régions d'Outre-mer s'avèrent plutôt bonnes pour l'ozone, avec notamment une grande capacité à prédire les évolutions de concentration sur la Guadeloupe ainsi qu'une propension à bien prévoir les niveaux de concentration sur la Guyane. Un axe d'amélioration pour ces prévisions serait d'intégrer des émissions plus représentatives que celles actuellement utilisées dans la chaine de prévision.

## 2.2 Prévisions de $PM_{10}$

Pour les particules fines de diamètre inférieur à 10 µm ($PM_{10}$), l'évaluation est réalisée sur l'année complète, du 1er 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, lorsque les vents faibles (accumulation des particules, sans dispersion) et les fortes variations de température (nuits froides et journées plus douces) favorisent des émissions importantes.

Pour l'analyse des épisodes de $PM_{10}$, l'indicateur réglementaire considéré est le seuil d'information de 50 µg/m$^3$ en moyenne journalière. Seule la moyenne journalière de $PM_{10}$ 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 215 stations de fond disponibles, réparties en 26 stations rurales, 36 stations périurbaines et 153 stations urbaines.

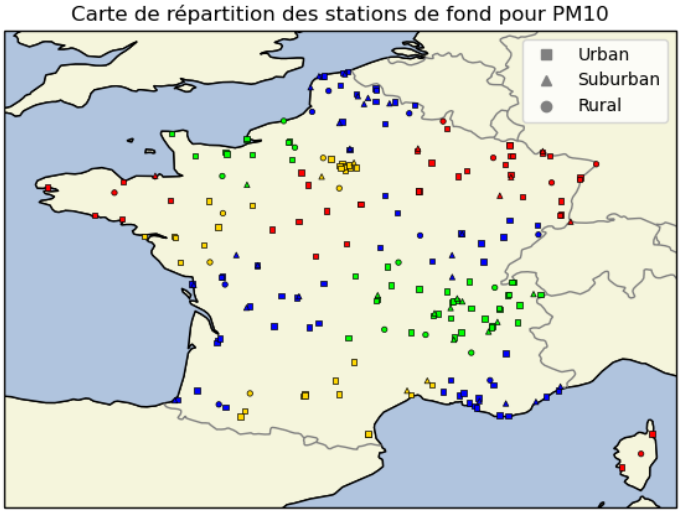


*Figure 12 : $PM_{10}$ – Carte de répartition des stations de fond (urbains, périurbaines et rurales) avec différenciation des régions par les couleurs*

### 2.2.1 Performances du modèle

Les Figure 13, Figure 14 et Figure 15 présentent pour les $PM_{10}$ les scores de biais, RMSE et corrélation en France Métropolitaine pour les modèles CHIMERE (CHI) et MOCAGE (MOCA) ainsi que pour l'adaptation statistique de CHIMERE (AS-CHI) pour le jour de prévision J0.

La Figure 13 montre ces scores sur les régions administratives, le premier groupe de barres, à l'extrême gauche, correspondant aux scores sur l'ensemble des 215 stations françaises.

La Figure 16 présente ces scores sur les jours de prévision J0, J1, J2, correspondant respectivement au jour courant, au lendemain et au surlendemain.

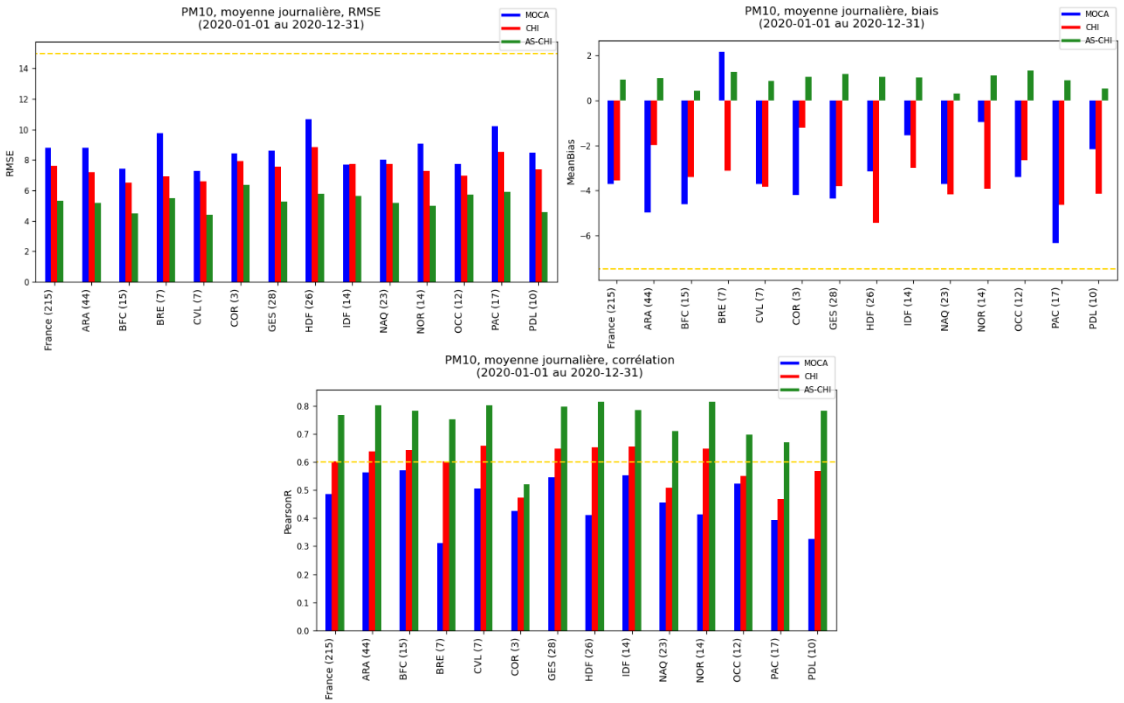


*Figure 13 : $PM_{10}$ - Scores de RMSE, biais et corrélation par région métropolitaine des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2020 sur l'échéance J0*

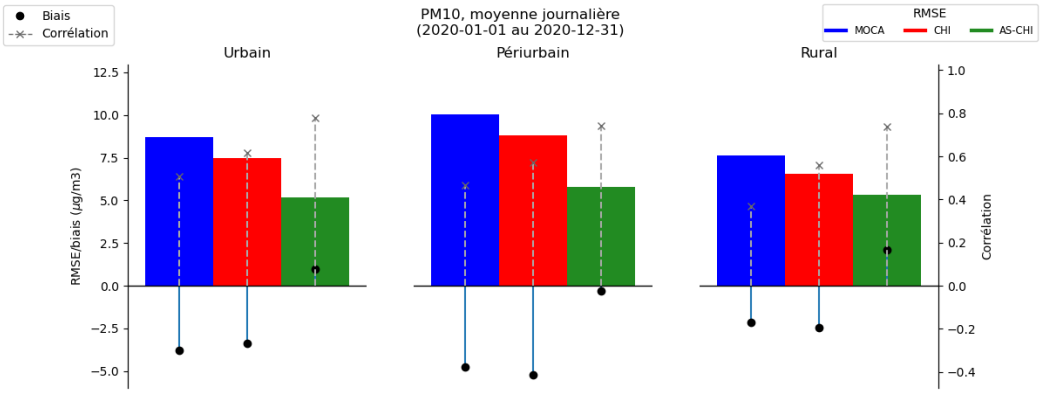


*Figure 14 : $PM_{10}$ - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction de la typologie de station (urbaines, périurbaines, rurales) des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2020 sur l'échéance J0*

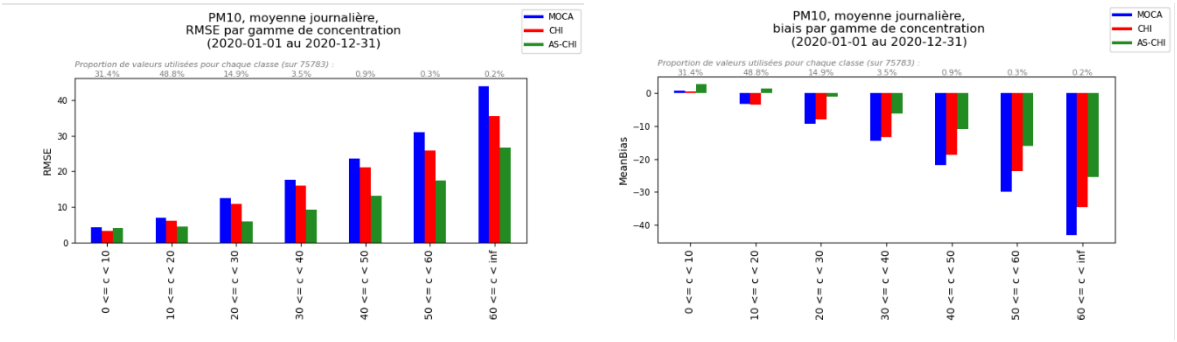


*Figure 15 : $PM_{10}$ - Scores de RMSE et biais par gamme de concentration des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2020 sur l'échéance J0*

| Moins de 10 | 10 à 20 | 20 à 30 | 30 à 40 | 40 à 50 | 50 à 60 | Plus de 60 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 31,4% | 48,8% | 14,9% | 3,5% | 0,9% | 0,3% | 0,2% |

*Tableau 4 : $PM_{10}$ – Proportion de valeurs utilisées pour le calcul de score de chaque gamme de concentration (µg/m³)*

Les principaux résultats que nous pouvons relever des Figure 13, Figure 14 et Figure 15 sont :

- Un biais négatif moyen de -3,7 µg/m³ pour MOCAGE et -3,5 µg/m³ pour CHIMERE, et un biais positif moyen de 0,9 µg/m³ pour l'AS.
- Une RMSE globale de 8,8 µg/m³ pour MOCAGE, 7,6 µg/m³ pour CHIMERE, et 5,3 µg/m³ pour l'AS.
- Une corrélation globale de 0,48 pour MOCAGE, 0,6 pour CHIMERE, et 0,77 pour l'AS.
- Des scores légèrement meilleurs pour la typologie rurale, par rapport aux autres typologies de station, en particulier pour les modèles bruts.
- Des scores satisfaisants sur les faibles concentrations (inférieures à 30 µg/m³), qui se dégradent cependant pour les concentrations plus élevées.

A l'échéance J0, les deux modèles et l'adaptation statistique respectent les objectifs qualité pour les $PM_{10}$ sur la RMSE (inférieure à 15 µg/m³) et sur le biais (inférieur à +/-7,5 µg/m³) sans exceptions. En revanche pour la corrélation, les modèles bruts ont davantage de difficultés à atteindre le seuil de 0,6 : MOCAGE n'y parvient sur aucune région, et CHIMERE reste en-dessous de ce seuil pour 5 des 13 régions métropolitaines (Corse, Nouvelle-Aquitaine, Occitanie, Provence-Alpes-Côte d'Azur, Pays de la Loire). Néanmoins, le traitement de correction statistique qui est fait sur CHIMERE permet d'améliorer fortement ce point : à l'exception de la Corse, où l'objectif qualité n'est pas respecté non plus, les corrélations de l'adaptation statistique se trouvent entre 0,7 et 0,82 quelles que soient les régions considérées.

Les modèles bruts sous-estiment les concentrations modélisées sur toutes les régions, exception faite de la Bretagne pour MOCAGE, où une légère surestimation peut être constatée. Du point de vue RMSE et corrélation, le modèle CHIMERE montre de meilleures performances que le modèle MOCAGE. En ce qui concerne les biais, MOCAGE présente des valeurs moins élevées que CHIMERE (en valeur absolue) pour la moitié des régions : Bretagne, Centre-Val de Loire, Hauts-de-France, Ile-de-France, Nouvelle-Aquitaine, Normandie et Pays de la Loire.

L'adaptation statistique, quant à elle, a tendance à 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 est réduit de 75% (en valeur absolue) entre le modèle brut et son adaptation statistique. Le même constat très positif peut être fait sur les autres scores : la RMSE est réduite de 30% et la corrélation augmentée de 28% (France entière). Au niveau régional, ces gains sont compris entre 18% et 38% pour la RMSE et entre 10% et 43% pour la corrélation. Les performances sont assez homogènes sur les régions.

L'adaptation statistique est peu impactée par les différentes typologies, 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 15, la prévision des valeurs hautes pose encore des difficultés aux modèles, ceux-ci ayant tendance à fortement sous-estimer ces plages de valeurs. Cependant, l'année 2020 ne permet pas de tirer de conclusions parfaitement fiables à ce sujet, les concentrations supérieures à 30 µg/m$^3$ ne représentant que 5% des données totales.

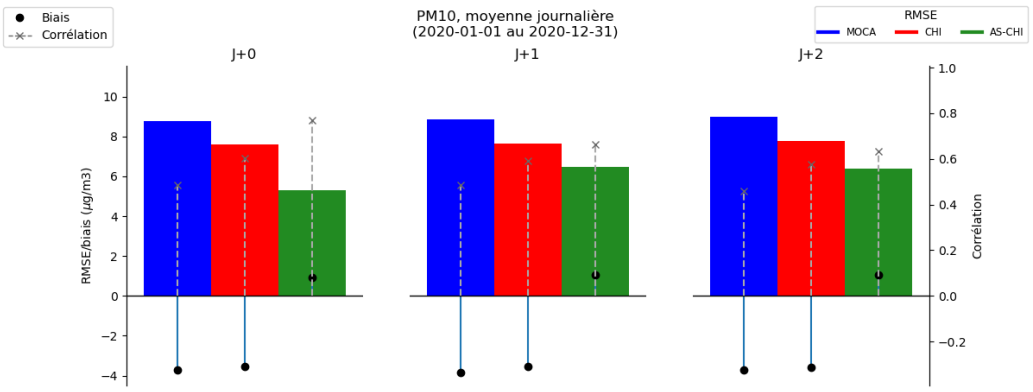


*Figure 16 : $PM_{10}$ - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction du jour de prévision pour MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et pour l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) en 2020*

La Figure 16 montre que les modèles bruts conservent des performances quasiment identiques entre les jours de prévision J0, J1 et J2. Pour l'adaptation statistique, le constat est différent, car les scores se dégradent davantage entre les échéances J0 et J1. La RMSE augmente ainsi de 5,3 à 6,5 µg/m$^3$, tandis que la corrélation est réduite de 0,77 à 0,63. 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 cette dernière échéance.

### 2.2.2 Performances par rapport aux seuils règlementaires

L'année 2020 a connu peu d'épisodes de pollution aux $PM_{10}$ d'ampleur nationale. Le premier, survenu du 21 au 26 janvier, a touché l'Auvergne-Rhône-Alpes, la Bourgogne-Franche-Comté, le Centre-Val de Loire et l'Ile-de-France. Des dépassements du seuil d'alerte ont pu être constatés durant cette période. Un second épisode a eu lieu du 27 au 28 mars, touchant la Bourgogne-Franche-Comté, les Pays de la Loire, la Bretagne, Le Centre-Val de Loire, l'Ile-de-France, la Nouvelle-Aquitaine, la Normandie, les Hauts-de-France et la Corse. Un dernier épisode est survenu du 22 au 27 novembre et a concerné l'Auvergne-Rhône-Alpes, l'Occitanie, la Normandie et l'Ile-de-France.

Les Figure 17 à Figure 19 font état de la capacité des modèles à détecter avec exactitude les dépassements du seuil d'information et de recommandation de 50 µg/m$^3$. Des explications détaillées à propos des indicateurs utilisés dans les Figure 18 et Figure 19 sont présentées en *Annexe 2 – Eléments de table de contingence*.

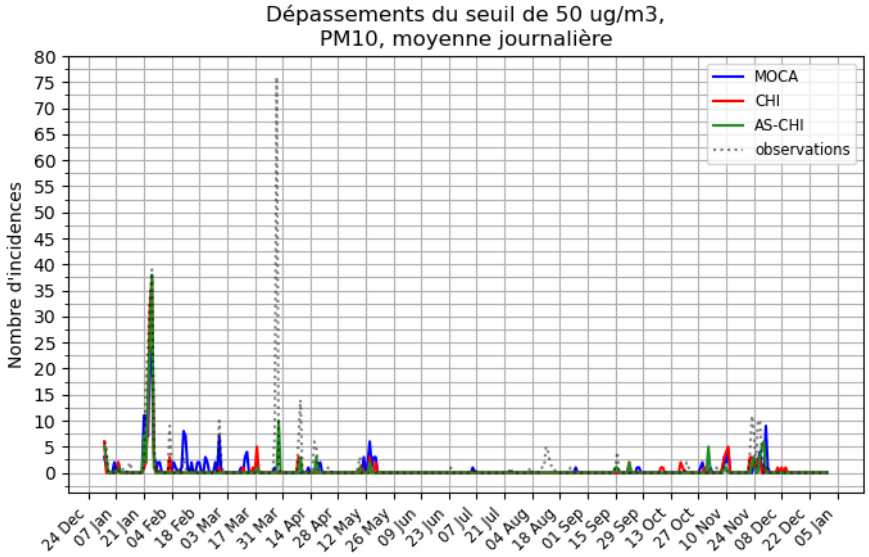


*Figure 17 : $PM_{10}$ - Série temporelle des dépassements du seuil d'information (50 µg/m$^3$) de MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2020 sur l'échéance J0 en métropole.*

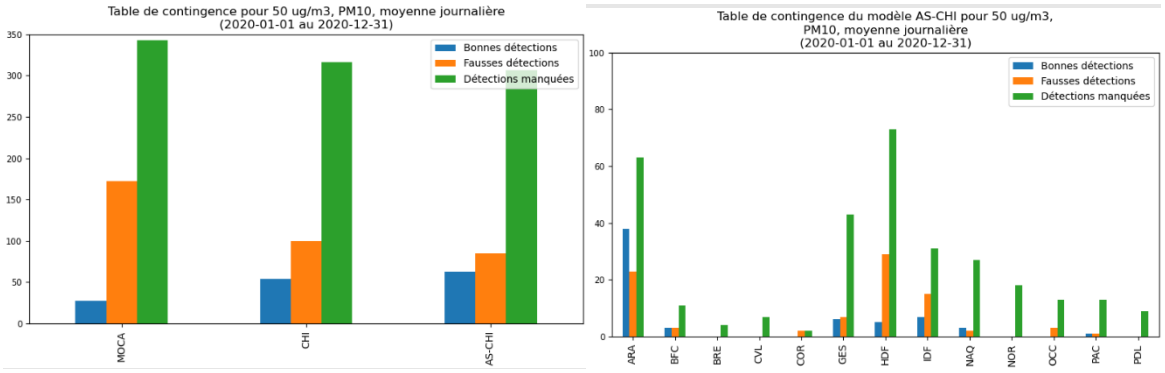


*Figure 18 : $PM_{10}$ - Tables de contingence pour 2020 à l'échéance J0 pour le seuil de 50 µg/m³. Les bonnes détections sont en bleu, les fausses détections en orange, et les détections manquées en vert. Gauche : Tables de contingence de MOCAGE (groupe de gauche), CHIMERE (groupe du milieu), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (groupe de droite) pour la France entière. Droite : Table de contingence de l'adaptation statistique de CHIMERE déclinée par régions*

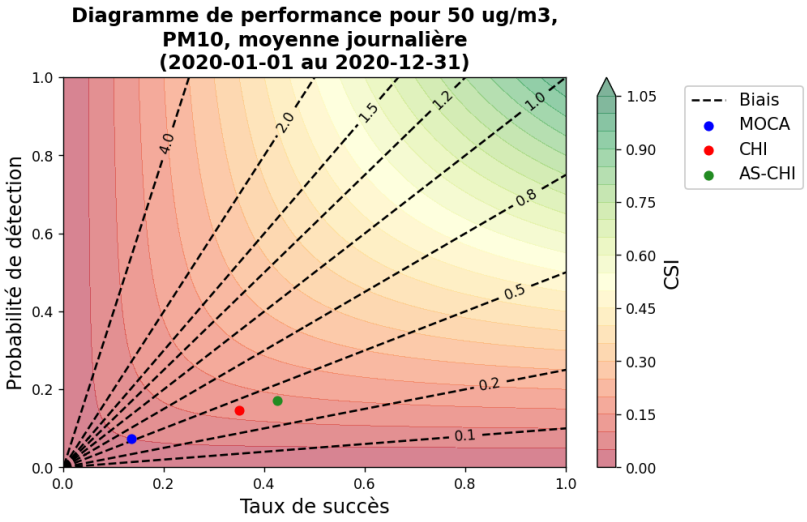


*Figure 19 : $PM_{10}$ - Diagramme de performance pour MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge) et l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2020 pour l'échéance J0*

Ces figures mettent en évidence des comportements relativement homogènes entre les trois modèles, bien que MOCAGE montre davantage de difficultés à détecter correctement les évènements, avec 27 bonnes détections sur un total de 370 dépassements observés, soit un taux de succès de 0,14 et une probabilité de détection de 0,07. CHIMERE et son adaptation statistique sont plus proches l'un de l'autre, avec respectivement 54 et 63 bonnes détections, mais l'adaptation statistique est meilleure : son taux de succès et sa probabilité de détection sont de 0,43 et 0,17, contre 0,35 et 0,15 pour le modèle brut.

La Figure 18 – Droite montre que Auvergne-Rhône-Alpes est la seule région pour laquelle l'adaptation statistique présente un grand nombre de bonnes détections. Pour les autres régions, le nombre de détections manquées est très supérieur au nombre de bonnes détections, notamment pour Grand Est et Hauts-de-France. Beaucoup de fausses détections sont également à noter. De plus, pour quatre régions l'adaptation statistique ne présente que des détections manquées : Bretagne, Centre-Val de Loire, Normandie et Pays de la Loire.

La Figure 20 présente la carte analysée de l'épisode de pollution des 27 et 28 mars, caractérisé par un nombre important de dépassements du seuil d'information et recommandation (> 70). La défaillance de la prévision à détecter cet épisode est due à une augmentation des concentrations de particules fines ($PM_{2.5}$, dont nitrate d'ammonium et matière organique) ainsi qu'à l'apport de poussières désertiques mal prévus par le modèle. Face au peu d'épisodes $PM_{10}$ de l'année 2020, cette défaillance influe significativement sur les scores de performance de détection du seuil d'information et de recommandation.

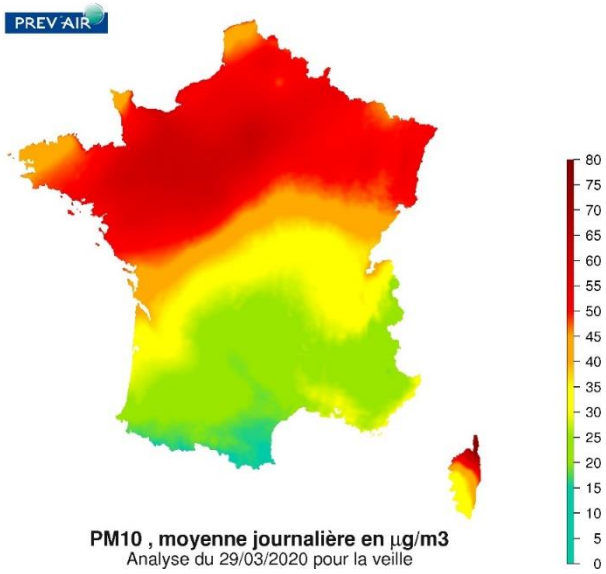


*Figure 20 : $PM_{10}$ - Concentration moyenne des $PM_{10}$ (en µg/m³) lors de la journée du 28 mars 2020*

## 2.2.3 Performances en lien avec les critères AMU

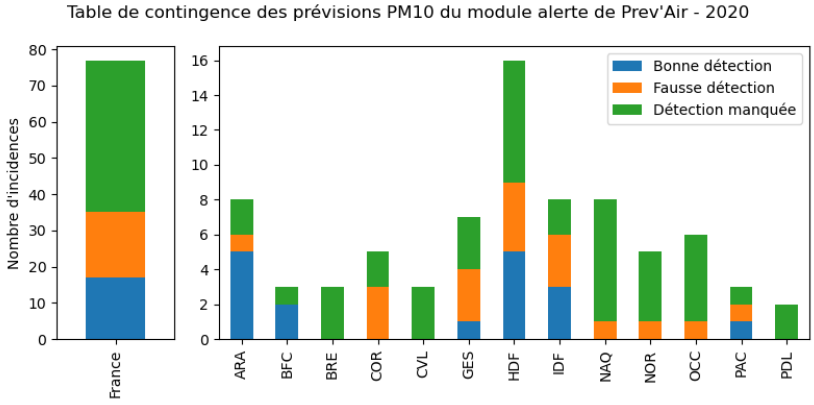


*Figure 21 : $PM_{10}$ - Table de contingence des critères AMU (critère surfacique et critère de population, sans distinction) sur l'année 2020 à l'échéance J0. Les bonnes détections sont en vert, les fausses détections en orange, et les détections manquées en bleu.*

La Figure 21 tend à confirmer le comportement décrit dans le paragraphe 2.2.2, avec un grand nombre de détections manquées (42), principalement dues à la journée du 28 mars, mais également presque autant de bonnes détections (17) que de fausses détections (18), soit un taux de succès de 0,49.

Les régions présentant un taux de succès supérieur à 0,5 sont Bourgogne-Franche-Comté (1), Auvergne-Rhône-Alpes (0,83), les Hauts-de-France (0,55), l'Ile-de-France (0,5), et Provence-Alpes-Côte d'Azur (0,5). A contrario, sept régions présentent une probabilité de détection nulle : Bretagne, Corse, Centre-Val de Loire, Nouvelle-Aquitaine, Normandie, Occitanie, et Pays de la Loire. Celles-ci ne sont pas forcément représentatives de la capacité du modèle à détecter les dépassements des critères AMU, et traduit simplement les difficultés que le modèle présente encore pour représenter finement les évènements proches de ces critères. Les conditions des dépassements souvent localisés et avec une faible persistance sont difficiles à appréhender par les modèles et expliquent en partie la faiblesse de ces résultats.

### 2.2.4 Evolution de l'adaptation statistique de CHIMERE depuis 2017

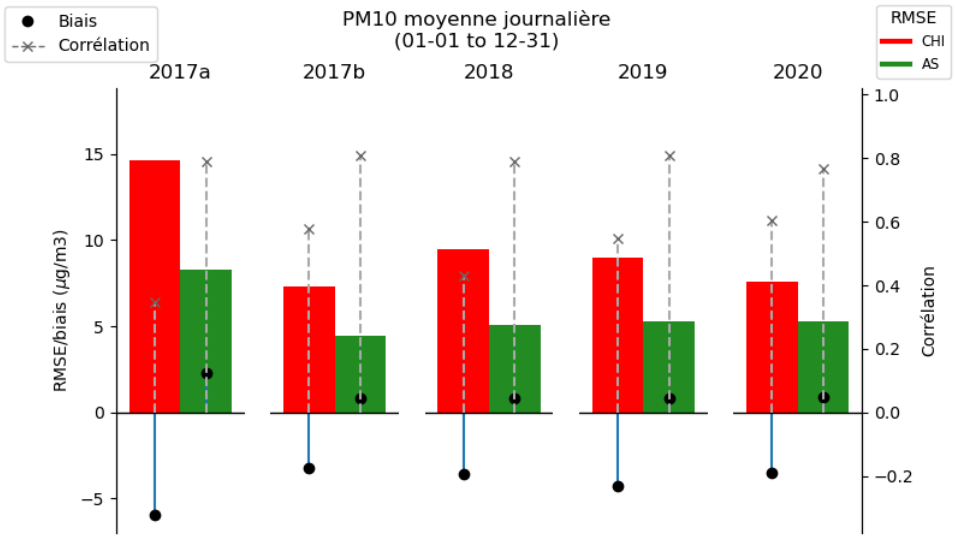


*Figure 22 : $PM_{10}$ - Synthèse des scores de RMSE (barres colorées), biais moyen (points noirs) et corrélation (pointillés gris) entre janvier et décembre depuis 2017 pour CHIMERE et pour son adaptation statistique. L'année 2017 a été scindée en 2017a (du 01-01 au 30-04) et 2017b (du 01-05 au 31-12) du fait d'un changement de configuration de Chimere de la version 2008 à la version 2016 en cours d'année*

Malgré la variabilité des concentrations observées suivant les années, la Figure 22 montre des performances en $PM_{10}$ plutôt stables depuis 2018 pour CHIMERE et une amélioration de son adaptation statistique à partir de 2017 à l'issue de la remise à jour de la méthodologie en lien avec le passage à une nouvelle version de CHIMERE. Cette dernière améliore la concordance entre les données issues du modèle et celles des observations, quelles que soient les circonstances et l'année considérées.

A noter toutefois une légère amélioration de la RMSE et du biais du modèle brut 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.

### 2.2.5 Performances sur les DROM

A l'instar de la Figure 13, la Figure 23 présente les scores pour les particules $PM_{10}$ des modèles CHIMERE (CHI) et MOCAGE (MOCA) ainsi que pour l'adaptation statistique de CHIMERE (AS-CHI) pour le jour de prévision J0. Elle est complétée par les performances sur les départements et régions d'Outre-mer des prévisions CHIMERE : Guadeloupe, Martinique et Guyane.

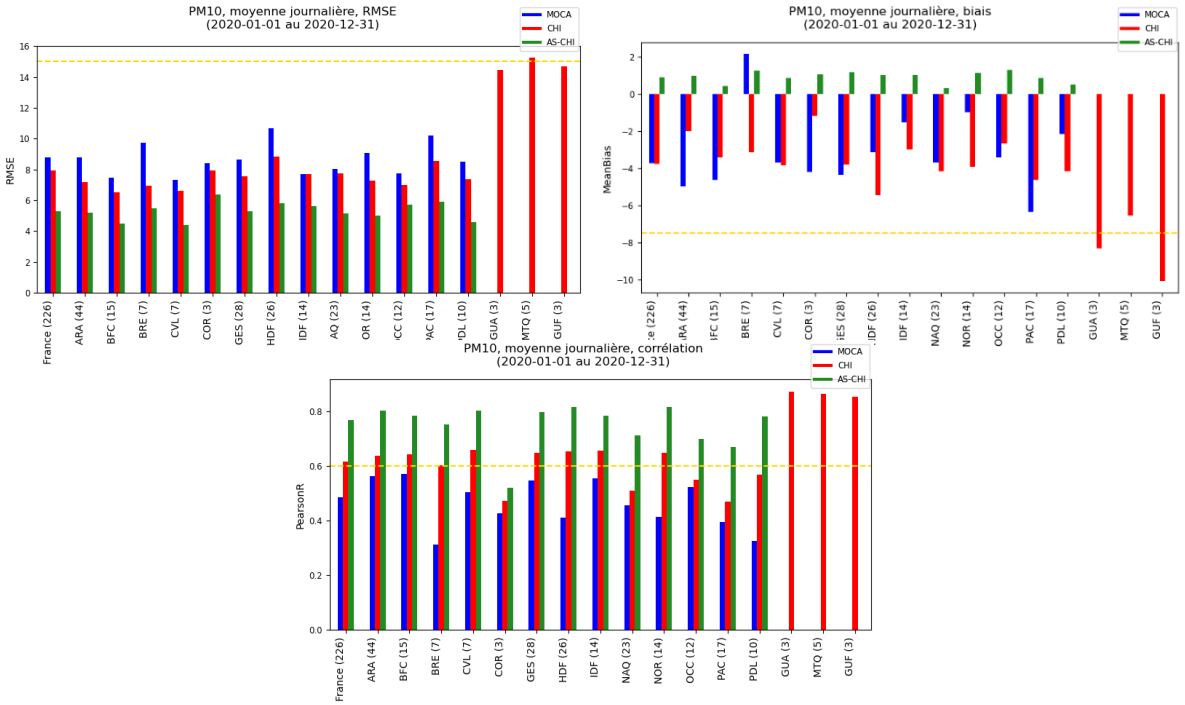


*Figure 23 : $PM_{10}$ - Scores de RMSE, biais et corrélation par région française des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2020 sur l'échéance J0*

La Guadeloupe, la Martinique et la Guyane présentent de très bonnes corrélations avec les observations des onze stations de ces régions, avec respectivement 0,87, 0,86, et 0,85. Vis-à-vis de ce score, ce sont les régions où CHIMERE brut obtient les valeurs les plus élevées, montrant la capacité assez importante de CHIMERE à reproduire la dynamique temporelle des concentrations sur ces régions.

Cependant, ce constat est atténué par le fait que leurs scores de biais moyen et de RMSE se situent à proximité ou au-delà des objectifs de qualité. Ainsi, seule la Martinique respecte l'objectif qualité de 7,5 µg/m$^3$ pour le biais en valeur absolue, avec -6,5 µg/m$^3$. La Guadeloupe et la Guyane présentent des biais plus élevés, respectivement à -8,3 µg/m$^3$ et -10,1 µg/m$^3$. En ce qui concerne la RMSE, les scores sont respectivement de 14,4 µg/m$^3$, 15,2 µg/m$^3$, et 14,7 µg/m$^3$. L'objectif qualité de 15 µg/m$^3$ n'est donc pas respecté sur la Martinique, même s'il faut noter que la région reste relativement proche de ce seuil. La Guadeloupe et la Guyane présentent des scores de RMSE moins bons que sur l'ensemble des autres régions métropolitaines, bien que l'objectif qualité soit respecté.

A noter que ces trois régions sont essentiellement affectées par les panaches de brumes désertiques provenant du Sahara et traversant l'océan Atlantique. Si l'occurrence de ces événements semble assez bien reproduite, l'intensité des concentrations en poussières des masses d'air advectées sur ces zones est plus incertaine. Cela conduit à légèrement dépasser les objectifs de qualité pour le biais et la RMSE pour certaines d'entre elles, mais il faut aussi souligner que ces régions ont des moyennes de concentrations annuelles plus élevées que les régions de métropole (qui ont servi à estimer ces seuils), ainsi que le montre la Figure 24. Cette évaluation est conforme avec les conclusions du rapport LCSQA concernant les évaluations de Prev'Air DROM réalisées avec les filtres CARA relevés sur une partie de l'année 2018 sur la Martinique[12]. Ce rapport avait conclu sur une bonne capacité de la prévision à estimer les contributions naturelles de poussières et sels marins sur une année partielle (mars-décembre), avec toutefois des erreurs légèrement supérieures aux objectifs de qualité pour les $PM_{10}$ en Martinique. L'évaluation conduite ici pour 2020 sur une année complète indique que les objectifs de qualité biais et corrélation sont maintenant atteints pour ce territoire, tandis que l'objectif de qualité RMSE est encore légèrement dépassé.

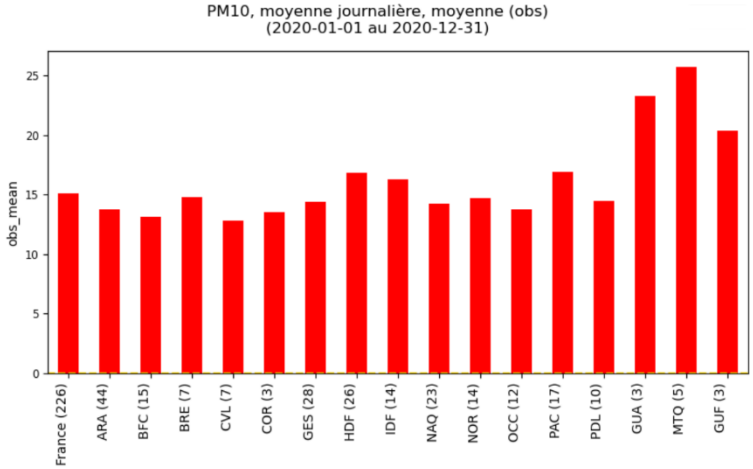


*Figure 24 : $PM_{10}$ – Moyenne annuelle des concentrations de $PM_{10}$ observées (moyennes journalières) par région française pour 2020 sur l'échéance J0*

[12] Note technique 2020 LCSQA : Evaluation de la filière de prévision Prev'air sur Antilles Guyane

## 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. Elle est réalisée sur l'année complète, du 1er janvier au 31 décembre, sur la base de la moyenne journalière 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 113 stations de fond disponibles, réparties en 23 stations rurales, 9 stations périurbaines et 81 stations urbaines.

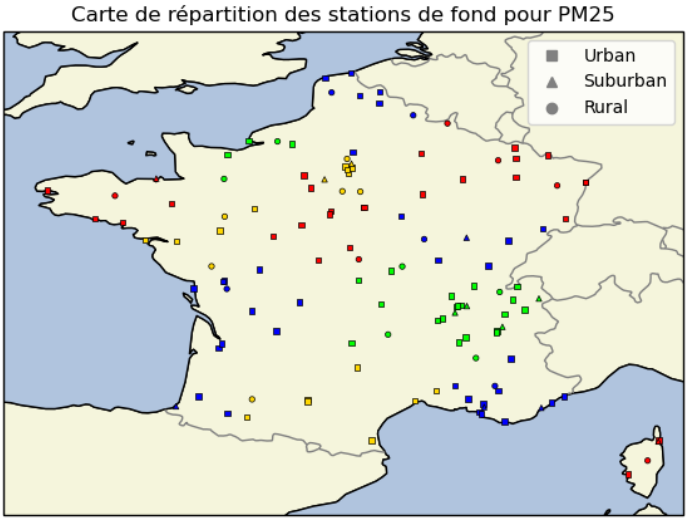


*Figure 25 : $PM_{2.5}$ – Carte de répartition des stations de fond (urbains, périurbaines et rurales) avec différenciation des régions par les couleurs*

### 2.3.1 Performances du modèle

La Figure 26 présente pour les $PM_{2.5}$ les scores de biais, RMSE et corrélation en France Métropolitaine 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 sont déclinés par régions administratives, le premier groupe de barres, à l'extrême gauche, correspondant aux scores sur l'ensemble des 113 stations françaises.

La Figure 27 présente ces scores sur les jours de prévision J0, J1, J2.

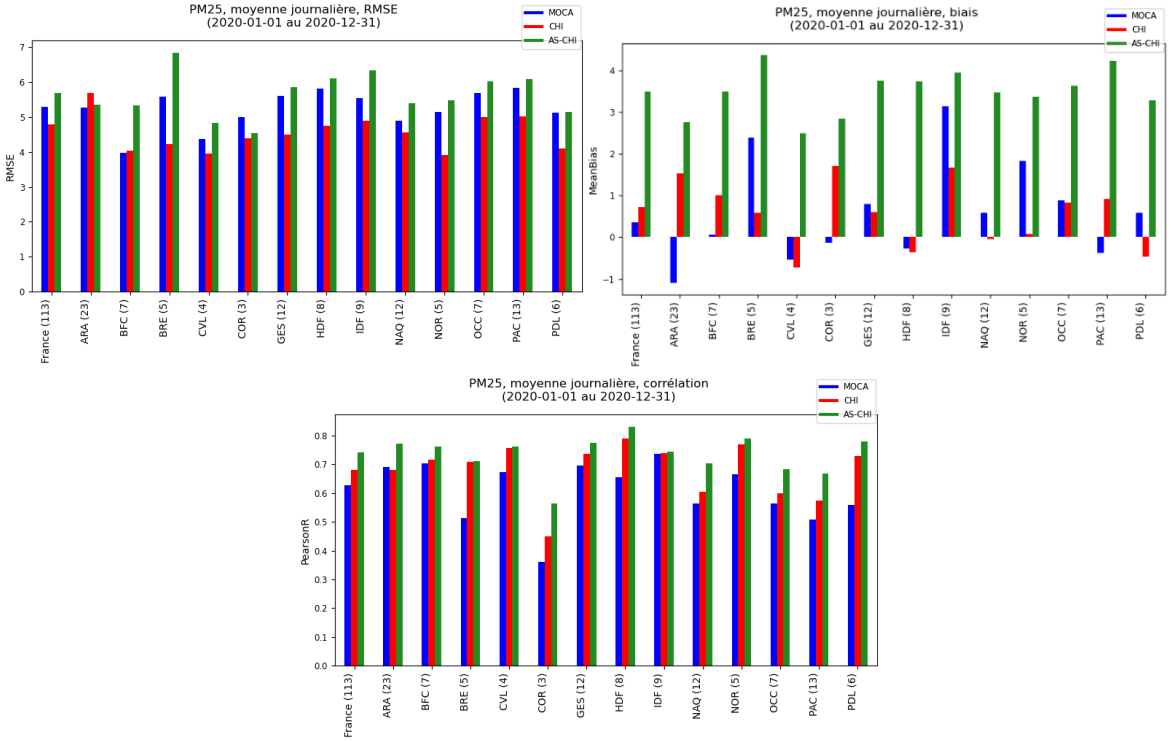


*Figure 26 : PM2.5 - Scores de RMSE, biais et corrélation par région métropolitaine des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2020 sur l'échéance J0*

Les principaux résultats que nous pouvons relever de la Figure 26 sont :

- Un biais positif moyen de 0,36 µg/m$^3$ pour MOCAGE, 0,72 µg/m$^3$ pour CHIMERE et 3,5 µg/m$^3$ pour l'AS
- Une RMSE globale de 5,3 µg/m$^3$ pour MOCAGE, 4,8 µg/m$^3$ pour CHIMERE, et 5,7 µg/m$^3$ pour l'AS
- Une corrélation globale de 0,63 pour MOCAGE, 0,68 pour CHIMERE, et 0,74 pour l'AS
- Une variabilité régionale des scores, notamment pour les modèles bruts, qui doit toutefois être relativisée par le faible nombre de stations sur la plupart des régions

Le modèle MOCAGE présente légèrement plus de difficultés que le modèle CHIMERE pour prévoir les concentrations de $PM_{2.5}$ en termes de RMSE et corrélation, aussi bien sur la France qu'au niveau régional, à l'exception de l'Auvergne-Rhône-Alpes et de la Bourgogne-Franche-Comté où les performances de MOCAGE sont semblables voire meilleures que celles de CHIMERE.

En ce qui concerne l'adaptation statistique, elle s'avère bien moins performante que le modèle brut avec un biais positif très en hausse (+3,2 µg/m$^3$) et une RMSE dégradée (+19%). Toutefois, elle améliore la corrélation, avec un gain de 9% par rapport à celle de CHIMERE sur la France et une amélioration semblablement positive sur chacune des régions.

L'adaptation statistique pour les $PM_{2.5}$ améliore donc la corrélation entre les observations et les prédictions, mais en induisant une forte surestimation des concentrations. Ce point devra faire l'objet d'une étude pour comprendre les raisons des différences de comportement de l'adaptation statistique entre $PM_{10}$ et $PM_{2.5}$, en analysant le ratio entre ces deux espèces pour le modèle, l'AS, et les observations.

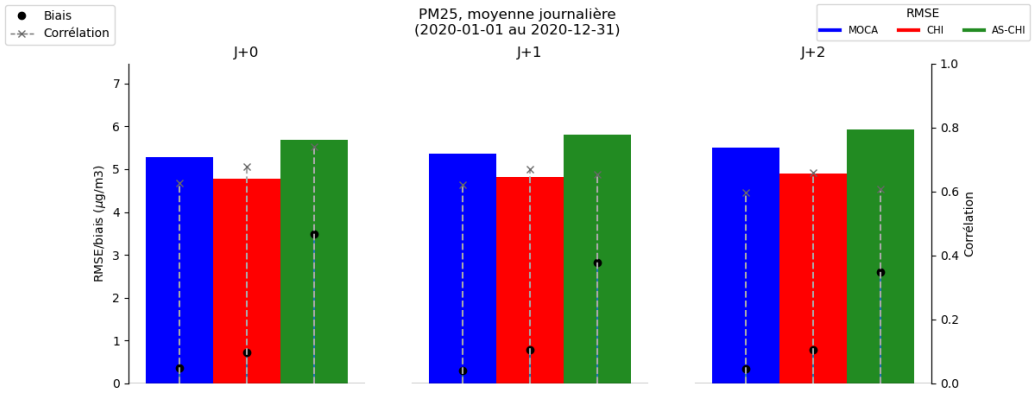


*Figure 27 : PM2.5 - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction du jour de prévision pour MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et pour l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) en 2020*

Sur la Figure 27 qui fait état des scores des trois modèles en fonction du jour de prévision considéré, CHIMERE et MOCAGE parviennent à maintenir leurs performances égales entre les différentes échéances. Dans le cas de l'adaptation statistique, une dégradation de la corrélation peut être constatée, avec une réduction de 0,74 à 0,61 entre les échéances J0 et J2.

### 2.3.2 Performances sur les DROM

A l'instar de la Figure 26, la Figure 28 présente des scores sur les $PM_{2.5}$ pour les modèles CHIMERE (CHI) et MOCAGE (MOCA) ainsi que pour l'adaptation statistique de CHIMERE (AS-CHI) pour le jour de prévision J0 incluant les scores de CHIMERE pour les départements et régions d'Outre-mer : Guadeloupe, Martinique et Guyane.

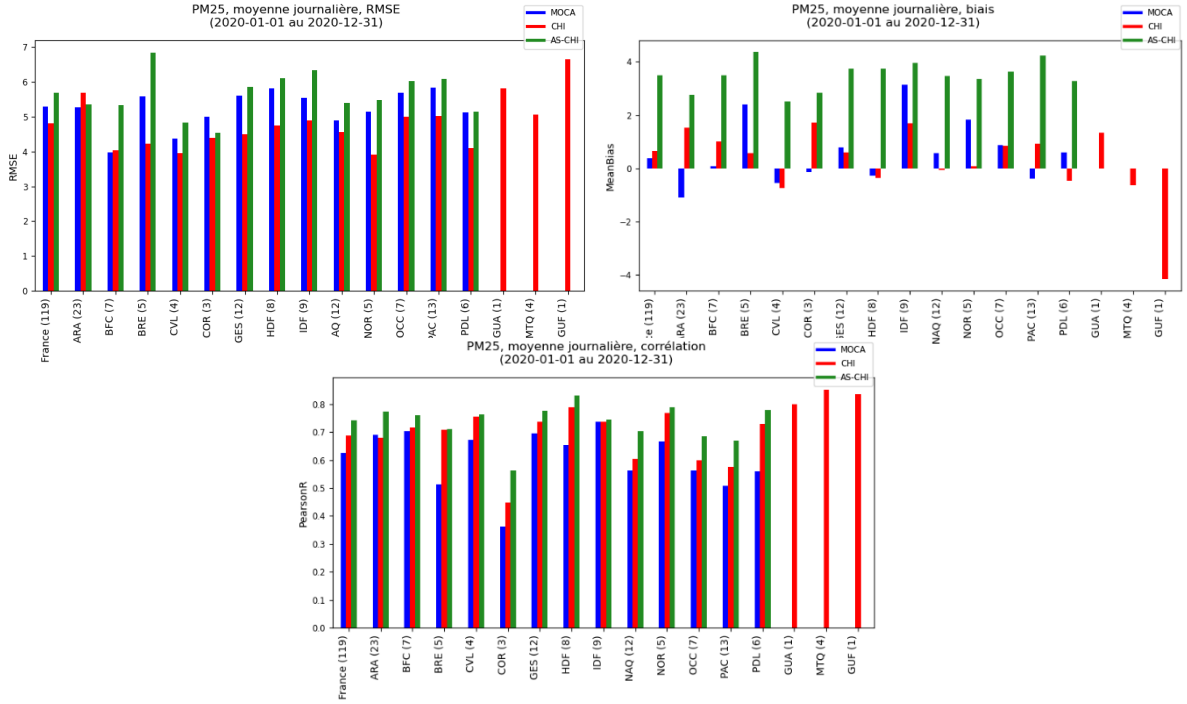


*Figure 28 : $PM_{2.5}$ - Scores de RMSE, biais et corrélation par région française des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2020 sur l'échéance J0*

La Guadeloupe, la Martinique et la Guyane présentent de très bonnes corrélations avec les observations qui ont été faites sur les six stations de ces départements, avec respectivement 0,8, 0,85, et 0,84. Les biais sont également relativement faibles pour la Guadeloupe et la Martinique, avec respectivement 1,3 µg/m$^3$, -0,6 µg/m$^3$. La Guyane présente un biais important de -4,2 µg/m$^3$ avec l'unique station de mesure du département.

En ce qui concerne les scores de RMSE, ils sont plus élevés que sur les régions métropolitaines, avec respectivement 5,8 µg/m$^3$, 5 µg/m$^3$ et 6,6 µg/m$^3$ pour la Guadeloupe, la Martinique et la Guyane.

Les prévisions CHIMERE sur ces trois régions d'Outre-mer semblent ainsi montrer une bonne capacité à prédire les niveaux de concentration en $PM_{2.5}$ ainsi que leur évolution, malgré une légère variabilité des résultats d'une région à l'autre. Cela tend à montrer que la différence de scores pour les $PM_{10}$ entre la métropole et les DROM des Caraïbes est expliquée par la fraction grossière des particules (dite « coarse »), très influencée par les épisodes de poussières désertiques.

## 2.4 Prévisions de $NO_2$

Pour le dioxyde d'azote ($NO_2$), l'évaluation est réalisée sur l'année complète, du 1er janvier au 31 décembre. L'indicateur réglementaire considéré est le seuil d'information de 200 µg/m$^3$ en moyenne horaire, mais il est à noter que l'année 2020 n'a connu aucun épisode de pollution d'ampleur nationale. Seul le maximum journalier de $NO_2$ 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 235 stations de fond disponibles, réparties en 23 stations rurales, 48 stations périurbaines et 164 stations urbaines.

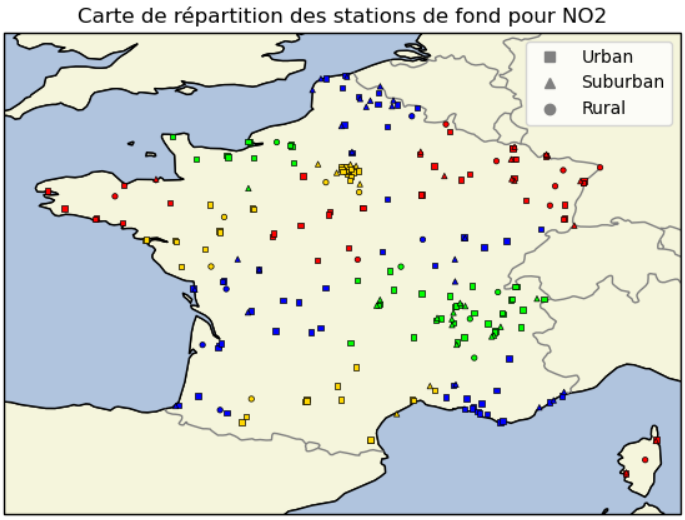


*Figure 29 : $NO_2$ – Carte de répartition des stations de fond (urbains, périurbaines et rurales) avec différenciation des régions par les couleurs*

### 2.4.1 Performances du modèle

Les Figure 30 et Figure 31 présentent pour le $NO_2$ les scores de biais, RMSE et corrélation en France Métropolitaine pour les modèles CHIMERE (CHI) et MOCAGE (MOCA) ainsi que pour l'adaptation statistique de CHIMERE (AS-CHI) pour le jour de prévision J0.

La Figure 30 décline ces scores sur les régions administratives, le premier groupe de barres, à l'extrême gauche, correspondant aux scores sur l'ensemble des 235 stations françaises.

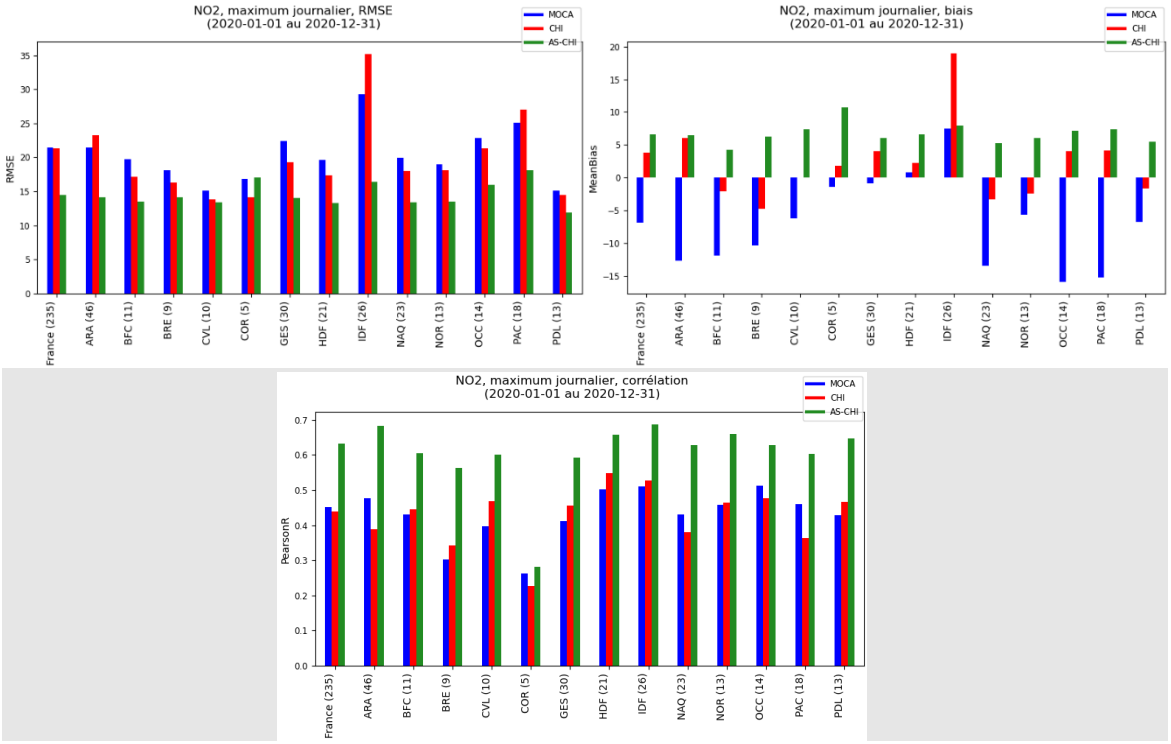


*Figure 30 : $NO_2$ - Scores de RMSE, biais et corrélation par région métropolitaine des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2020 sur l'échéance J0*

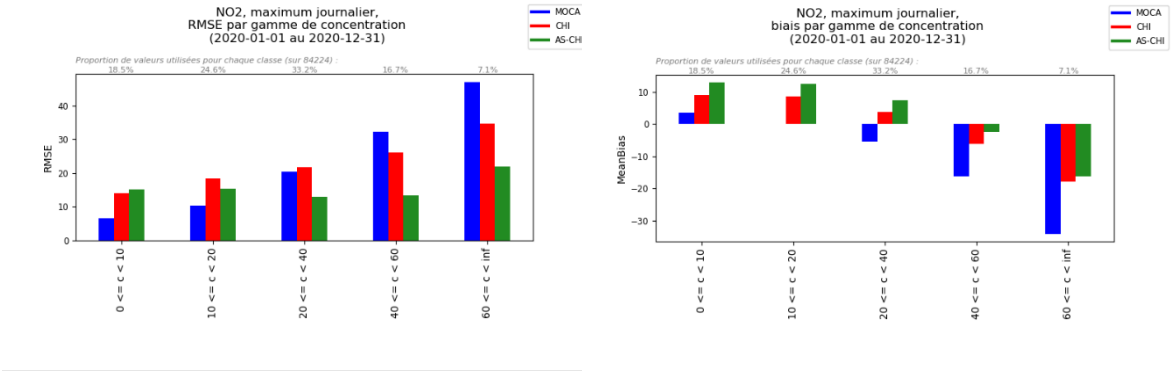


*Figure 31 : $NO_2$ - Scores de RMSE et biais par gamme de concentration des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2020 sur l'échéance J0*

| Moins de 10 | 10 à 20 | 20 à 40 | 40 à 60 | Plus de 60 |
|---|---|---|---|---|
| 18,5% | 24,6% | 33,2% | 16,7% | 7,1% |

*Tableau 5 : $NO_2$ – Proportion de valeurs utilisées pour le calcul de score de chaque gamme de concentration*

Les principaux résultats que nous pouvons relever de la Figure 30 sont :

- Un biais négatif moyen de -6,9 µg/m$^3$ pour MOCAGE, et un biais positif moyen de 3,8 µg/m$^3$ pour CHIMERE et de 6,5 µg/m$^3$ pour l'AS

- Une RMSE globale de 21,4 µg/m$^3$ pour MOCAGE, 21,3 µg/m$^3$ pour CHIMERE, et 14,5 µg/m$^3$ pour l'AS
- Une corrélation globale de 0,45 pour MOCAGE, 0,44 pour CHIMERE, et 0,63 pour l'AS

MOCAGE montre une forte sous-estimation des concentrations de $NO_2$ sur la plupart des régions françaises, avec cependant une exception notable pour l'Ile-de-France. Les concentrations sont globalement surestimées à cet endroit, induisant une RMSE très élevée. Le modèle CHIMERE présente le même problème pour cette région, avec des scores encore plus dégradés.

Les corrélations des deux modèles bruts se situent globalement entre 0,4 et 0,5. Les régions présentant les moins bons scores sont la Bretagne et la Corse, avec des corrélations autour de 0,3 et 0,25 respectivement.

De manière générale, CHIMERE a tendance à surestimer les concentrations des régions du sud et de l'est (Auvergne-Rhône-Alpes, Corse, Grand Est, Occitanie, Provence-Alpes-Côte d'Azur). Les RMSE s'avèrent également légèrement moins bonnes sur ces régions, à l'exception de la Corse, dont la RMSE de 14,2 µg/m$^3$ est l'une des meilleures RMSE du modèle.

L'adaptation statistique améliore grandement les performances en RMSE et corrélation du modèle brut, avec respectivement des gains de 32 et 43% sur ces scores en moyenne sur la France. Elle surestime pourtant les concentrations sur toutes les régions, avec un biais moyen de 6,55 µg/m$^3$. A noter toutefois qu'elle corrige le fort biais que CHIMERE présente sur l'Ile-de-France, le réduisant de 19 à 7,9 µg/m$^3$, permettant également d'obtenir une RMSE dans la moyenne des autres régions, avec 16,4 µg/m$^3$.

En ce qui concerne les scores par gamme de concentration de la Figure 31, les modèles bruts ont tendance à voir leurs performances se dégrader avec les valeurs hautes. A 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/m$^3$). Ainsi, sa RMSE se maintient à un niveau de 15 µg/m$^3$ alors que la RMSE des modèles bruts, comprise entre 5 et 15 µg/m$^3$ pour les concentrations inférieures à 10 µg/m$^3$, dépasse les 25 µg/m$^3$ pour les concentrations supérieures à 40 µg/m$^3$.

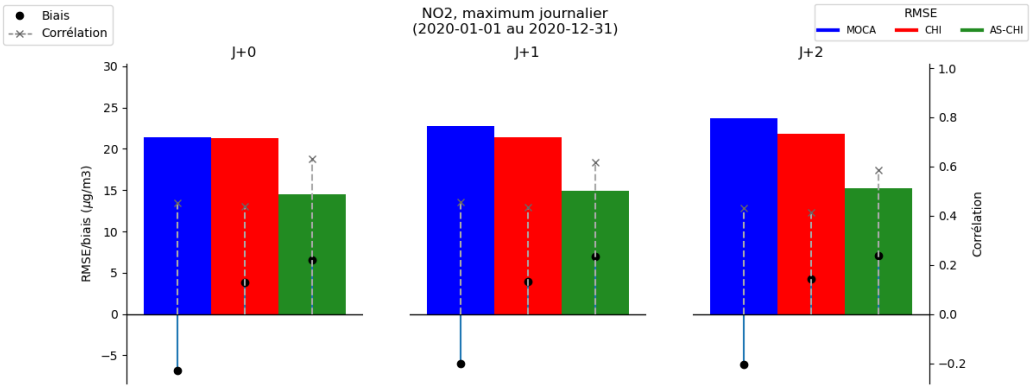


*Figure 32 : $NO_2$ - Synthèse des scores de RMSE, biais et corrélation en fonction du jour de prévision pour MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et pour l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) en 2020*

La Figure 32 montre que les trois modèles conservent des performances quasiment identiques entre les jours de prévision J0, J1 et J2. 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 J2. Malgré cela, elle reste plus performante que le modèle brut aux échéances J0, J1 et J2.

### 2.4.2 Performances par rapport aux seuils règlementaires

Comme indiqué en début de chapitre, l'année 2020 n'a connu aucun épisode de pollution au $NO_2$. Les modèles ont pourtant surestimé les concentrations de ce polluant à plusieurs reprises, comme le montre la Figure 33.

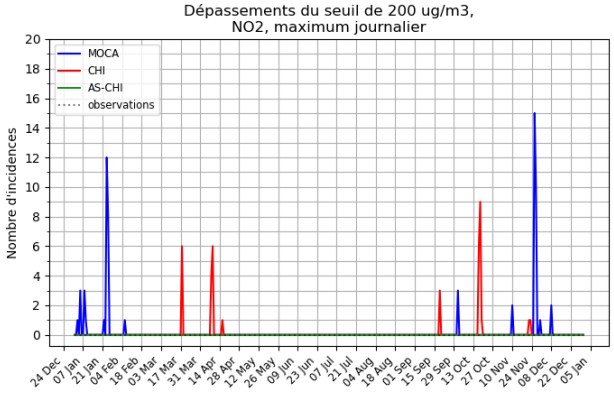


*Figure 33 : $NO_2$ - Série temporelle des dépassements du seuil d'information (200 µg/m³) de MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2020 sur l'échéance J0*

Beaucoup plus fidèle aux niveaux de concentration observés que les modèles bruts, l'adaptation statistique est absente de la Figure 33, n'ayant détecté aucun dépassement du seuil règlementaire. Ses performances à ce niveau-là sont ainsi extrêmement bonnes puisqu'elles reflètent parfaitement les observations.

### 2.4.3 Performances sur les DROM

A l'instar de la Figure 30, la Figure 34 présente des scores sur le $NO_2$ pour les modèles CHIMERE (CHI) et MOCAGE (MOCA) ainsi que pour l'adaptation statistique de CHIMERE (AS-CHI) pour le jour de prévision J0 incluant les scores de CHIMERE pour les départements et régions d'Outre-mer : Guadeloupe, Martinique et Guyane.

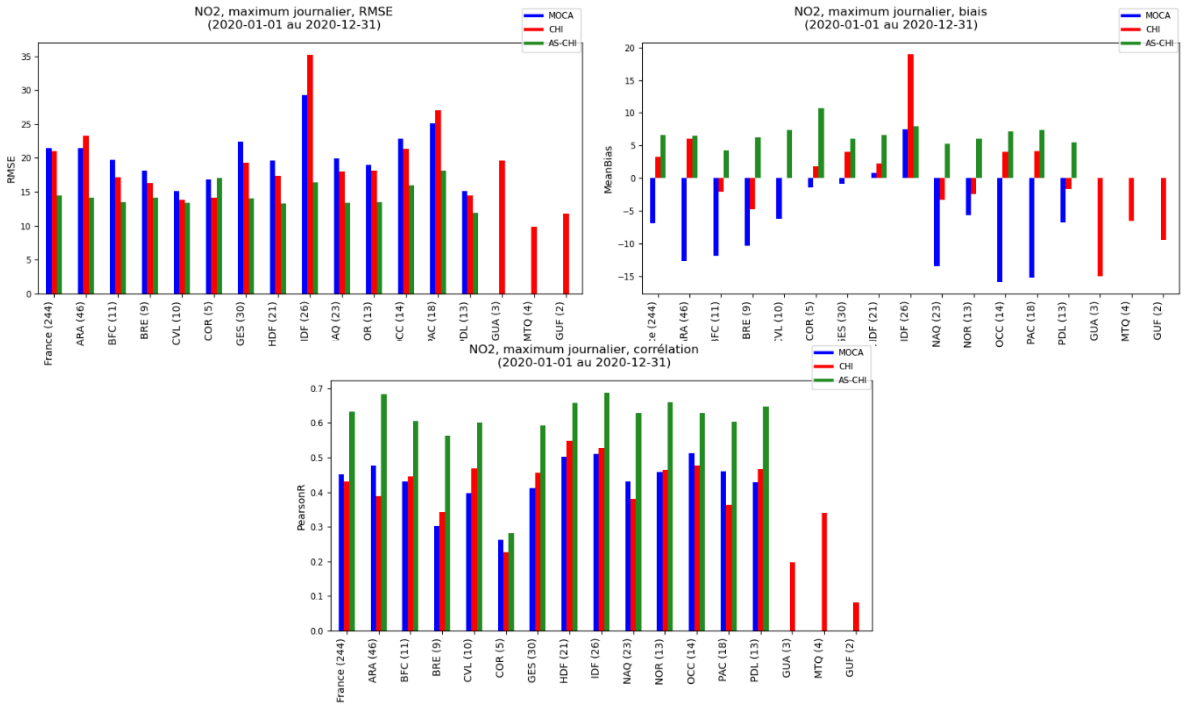


*Figure 34 : $NO_2$ - Scores de RMSE, biais et corrélation par région française des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2020 sur l'échéance J0*

La Guadeloupe, la Martinique et la Guyane présentent des corrélations assez faibles avec les observations qui ont été faites sur les neuf stations de ces départements, avec respectivement 0,2, 0,34, et 0,08. Les sous-estimations sont relativement élevées, notamment pour la Guadeloupe, avec respectivement -15 µg/m$^3$, -6,6 µg/m$^3$ et -9,4 µg/m$^3$. Ces lacunes sont à relier à la qualité de l'inventaire d'émissions utilisé, qui, pour le moment, ne s'appuie pas sur les données régionales.

Seule la RMSE est plutôt bonne, voire très bonne, vis-à-vis des autres régions : avec 19,6 µg/m$^3$, la Guadeloupe se situe au même niveau qu'une partie des régions métropolitaines, tandis que la Martinique et la Guyane se situent bien en-dessous de la moyenne en France métropolitaine, avec respectivement 9,8 µg/m$^3$ et 11,8 µg/m$^3$. Il est cependant à noter que ces deux dernières régions présentent les concentrations moyennes de $NO_2$ les plus faibles, ce qui favorise de meilleurs scores de RMSE.

A noter que ces scores sont influencés par la qualité des émissions. Or, dans le cas des DROM, celles-ci proviennent d'un inventaire global. Sa substitution par un inventaire régional permettait certainement d'améliorer les performances sur ces régions.

Les prévisions CHIMERE sur ces trois départements d'Outre-mer montrent ainsi une bonne capacité à prédire les niveaux de concentration en $NO_2$, notamment sur la Martinique et sur la Guyane, avec toutefois des difficultés à en estimer l'évolution.

## 2.5 Evaluation de la composition des $PM_1$ (CARA)

L'évaluation des composantes de $PM_1$ de CHIMERE a été réalisée sur l'ensemble de l'année 2020. 10 stations sont disponibles sur la France, réparties sur les régions Bretagne (1), Nouvelle-Aquitaine (2), Hauts-de-France (1), Ile-de-France (1), Grand Est (3), Auvergne-Rhône-Alpes (1) et Provence-Alpes-Côte d'Azur (1).

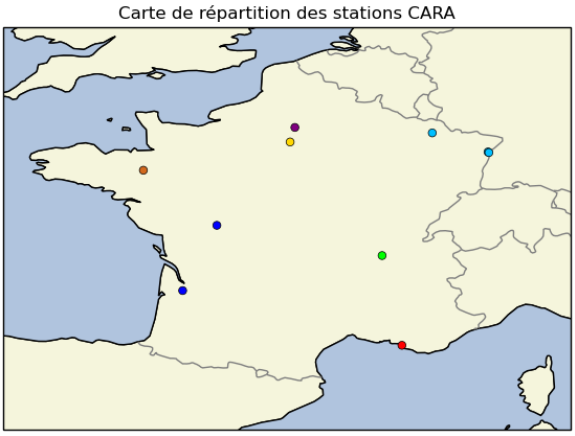


*Figure 35 : Carte de répartition des stations de mesure CARA, avec différenciation des régions par les couleurs*

Les composantes $PM_1$ qui ont été étudiées sont le chlore (Cl), l'ammonium ($NH_4$), les nitrates ($NO_3$), les sulfates ($SO_4$) et la partie organique (Org) en moyenne journalière.

Les scores classiques de biais, RMSE et corrélation ont été résumés dans le Tableau 6. Les corrélations sont supérieures à 0,5 pour l'ammonium, les nitrates et la partie organique, ce qui est relativement satisfaisant. La partie organique est largement sous-estimée, avec un biais de -3,94 µg/m$^3$ pour une moyenne des observations à 5,73 µg/m$^3$, tandis que les autres composantes sont surestimées.

La composition inorganique constituée de l'ammonium, des nitrates et des sulfates est plutôt bien reproduite par le modèle, ce qui se remarque d'autant plus sur la Figure 36 présentant les séries temporelles des moyennes aux stations. Seuls les sulfates présentent un pic de concentrations très élevé début avril qui n'a pas du tout été observé par les stations, malgré des prévisions très proches des mesures pour le reste de l'année. Ce pic a été identifié comme étant dû à une contribution de SO2 trop importante provenant des conditions aux limites CAMS[13].

L'étude réalisée sur le chlore montre une forte surestimation des niveaux de sels marins (et donc de chlore) dans CHIMERE, avec peu de différences de concentrations entre terre et mer. Ce problème devrait être amélioré dans les prévisions Prev'Air à partir de novembre 2021 avec le passage à la version 2020 de CHIMERE, puisque celle-ci modélise des concentrations de sels marins beaucoup plus faibles à l'intérieur des terres, avec un gradient mer-terre plus marqué. La différence peut être imputée à un changement des calculs des vitesses de dépôt des particules, et à un changement sur la paramétrisation des sels marins (notamment sur leur distribution en taille).

[13] En cours d'analyse, mais le problème paraît restreint aux prévisions globales, et cette forte contribution ne semble pas visible dans les analyses et réanalyses globales de CAMS.

| | Biais moyen (µg/m³) | RMSE (µg/m³) | Corrélation | Moyenne des obs (µg/m³) |
|---|---|---|---|---|
| **Cl** | 0,44 | 0,67 | 0,16 | 0,10 |
| **$NH_4$** | 0,24 | 0,98 | 0,54 | 0,80 |
| **$NO_3$** | 0,29 | 2,01 | 0,60 | 1,51 |
| **Org** | -3,94 | 5,73 | 0,59 | 5,73 |
| **$SO_4$** | 0,14 | 1,04 | 0,33 | 0,95 |

*Tableau 6 : $PM_1$ – Tableau des scores de biais, RMSE, corrélation, et moyenne des observations pour les cinq composantes de $PM_1$ étudiées*

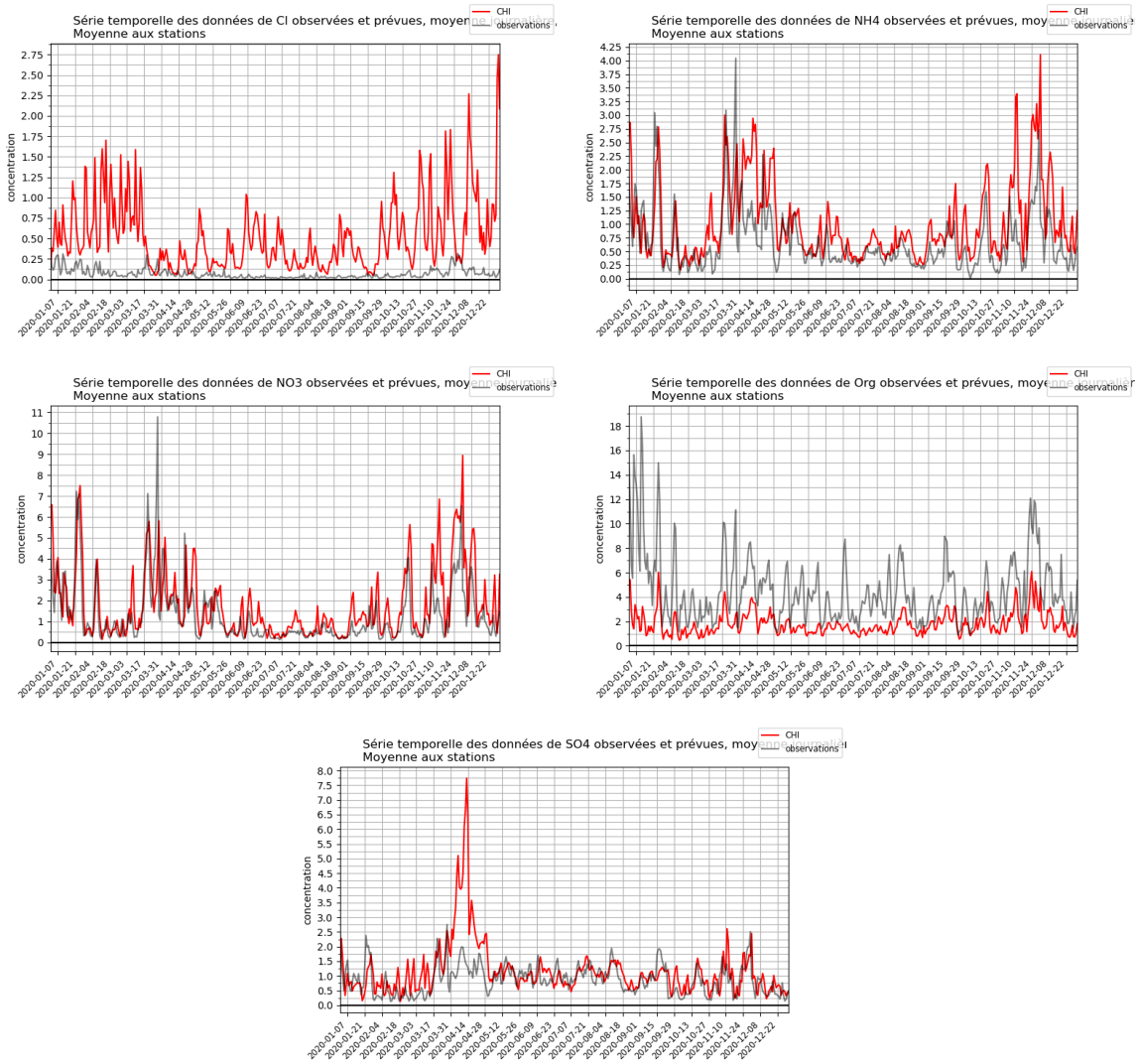


*Figure 36 : $PM_1$ – Séries temporelles (moyennes sur les stations) des cinq composantes de $PM_1$ étudiées (µg/m³)*

# 3. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce rapport fournit une évaluation des chaines 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.

Le premier constat est que ce traitement d'adaptation statistique améliore nettement les performances par rapport au modèle brut pour l'ozone, les $PM_{10}$ et le $NO_2$. Les résultats sont moins tranchés pour les $PM_{2.5}$.

Déjà observés et documentés par le passé pour l'ozone et les $PM_{10}$, les scores obtenus cette année sont similaires aux valeurs des années précédentes en France Métropolitaine malgré l'impact lié à la crise Covid-19, et confirment la qualité des prévisions sur toutes les typologies de stations et régions. 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 règlementaires. La probabilité de détection de l'ensemble des prévisions demeure perfectible.

Pour les $PM_{10}$, 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 évènements liés aux dépassements des seuils règlementaires.

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.

Pour les $PM_{2.5}$, l'adaptation statistique introduit une forte surestimation des concentrations, cependant compensée par une meilleure corrélation entre observations et prévisions.

Tous polluants confondus, les prévisions sur les régions d'Outre-mer des Caraïbes[14] sont satisfaisantes et 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.

Ce rapport présente aussi les objectifs de qualité attribués aux prévisions $O_3$ et $PM_{10}$ selon les travaux du GT prévision (LCSQA) pour harmoniser les pratiques de prévision en France. Dans l'ensemble, Prev'Air respecte ces valeurs même si sur certaines régions, comme la Corse pour les $PM_{10}$, des écarts par rapport à ces objectifs de qualité peuvent survenir.

[14] Prev'air opérationnel sur les DROM Caraïbes depuis février 2018.

L'évaluation de la composition des $PM_1$ est encourageante. L'ammonium, les nitrates et les sulfates sont relativement bien prévus en 2020 par le modèle CHIMERE. La partie organique est fortement sous-estimée. Quant au chlore, une nette amélioration devrait être constatée à partir de fin 2021 avec la mise en place de la nouvelle version de CHIMERE.

Pour améliorer les performances générales de Prev'Air et réduire les régions avec des non-respects des objectifs de qualité, des mises à jour des outils du système ont été réalisées dans le courant de l'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).

# 4. 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 régions et abréviations |
| **Annexe 5** | Liste des figures |

# 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 ($O_3$, $NO_2$, $PM_{10}$, $PM_{2.5}$)
- 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 règlementaires.

La méthodologie de spatialisation mise en œuvre depuis plusieurs années pour l'ozone et le $NO_2$ est un krigeage, avec CHIMERE en dérive externe.

Pour les particules $PM_{10}$ 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 polluants[15].

[15] 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 :

| | *Obs > seuil* | *Obs < seuil* |
|---|---|---|
| *Prévi > seuil* | Bonne détection (BD+) | Fausse détection (FD) |
| *Prévi < seuil* | 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.

| | *Obs > seuil* | *Obs < seuil* | *Total* |
|---|---|---|---|
| *Prévi > seuil* | a | b | a+b |
| *Prévi < seuil* | c | d | c+d |
| *Total* | 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 µg/m$^3$. Il indique si la simulation surestime (valeurs positives) ou sous-estime (valeurs négatives) les concentrations réellement mesurées.

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

*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 µg/m$^3$. Elle informe sur la capacité du modèle à reproduire les niveaux de concentrations observés et doit être la plus faible possible.

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

*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.

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

*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 régions et abréviations

| 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** | Jours de prévision correspondant respectivement au jour-même, au lendemain, et au surlendemain |

## Annexe 5 - Liste des figures

Figure 1 : Ozone – Carte de répartition des stations de fond (urbains, périurbaines et rurales) avec différenciation des régions par les couleurs ..... 14
Figure 2 : Ozone - Scores de RMSE, biais et corrélation par région métropolitaine des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) d'avril à septembre 2020 sur l'échéance J0. Les objectifs de qualité sont indiqués par les lignes horizontales oranges. ..... 15
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 2020 sur l'échéance J0 ..... 15
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 2020 sur l'échéance J0 ..... 16
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 2020 ..... 17
Figure 6 : Ozone - Série temporelle 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 2020 sur l'échéance J0 ..... 18
Figure 7 : Ozone - Tables de contingence sur la période d'avril à septembre 2020 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 ..... 19
Figure 8 : Ozone - Diagramme de performance pour MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge) et l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) d'avril à septembre 2020 pour l'échéance J0 ..... 19
Figure 9 : Ozone - Table de contingence des critères AMU (critère surfacique et critère de population, sans distinction) sur la période d'avril à septembre 2020 à l'échéance J0. Les bonnes détections sont en vert, les fausses détections en orange, et les détections manquées en bleu. ..... 20
Figure 10 : Ozone - Synthèse des scores de RMSE (barres colorées), biais moyen (points noirs) et corrélation (pointillés gris) entre mai et septembre depuis 2017 pour CHIMERE et pour son adaptation statistique ..... 21
Figure 11 : Ozone sur la métropole et les Antilles - Scores de RMSE, biais et corrélation par région française des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) d'avril à septembre 2020 sur l'échéance J0 ..... 22

Figure 12 : $PM_{10}$ – Carte de répartition des stations de fond (urbains, périurbaines et rurales) avec différenciation des régions par les couleurs ..... 23
Figure 13 : $PM_{10}$ - Scores de RMSE, biais et corrélation par région métropolitaine des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2020 sur l'échéance J0 ..... 24
Figure 14 : $PM_{10}$ - 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 2020 sur l'échéance J0 ..... 24
Figure 15 : $PM_{10}$ - Scores de RMSE et biais par gamme de concentration des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2020 sur l'échéance J0 ..... 25
Figure 16 : $PM_{10}$ - 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 2020 ..... 26
Figure 17 : $PM_{10}$ - Série temporelle des dépassements du seuil d'information (50 µg/m$^3$) de MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2020 sur l'échéance J0 en métropole. ..... 27
Figure 18 : $PM_{10}$ - Tables de contingence pour 2020 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. 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 régions ..... 28
Figure 19 : $PM_{10}$ - Diagramme de performance pour MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge) et l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2020 pour l'échéance J0 ..... 28
Figure 20 : $PM_{10}$ - Concentration moyenne des $PM_{10}$ (en µg/m$^3$) lors de la journée du 28 mars 2020 ..... 29
Figure 21 : $PM_{10}$ - Table de contingence des critères AMU (critère surfacique et critère de population, sans distinction) sur l'année 2020 à l'échéance J0. Les bonnes détections sont en vert, les fausses détections en orange, et les détections manquées en bleu. ..... 29
Figure 22 : $PM_{10}$ - Synthèse des scores de RMSE (barres colorées), biais moyen (points noirs) et corrélation (pointillés gris) entre janvier et décembre depuis 2017 pour CHIMERE et pour son adaptation statistique. L'année 2017 a été scindée en 2017a (du 01-01 au 30-04) et 2017b (du 01-05 au 31-12) du fait d'un changement de configuration de Chimere de la version 2008 à la version 2016 en cours d'année ..... 30
Figure 23 : $PM_{10}$ - Scores de RMSE, biais et corrélation par région française des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2020 sur l'échéance J0 ..... 31
Figure 24 : $PM_{10}$ – Moyenne annuelle des concentrations de $PM_{10}$ observées (moyennes journalières) par région française pour 2020 sur l'échéance J0 ..... 32
Figure 25 : $PM_{2.5}$ – Carte de répartition des stations de fond (urbains, périurbaines et rurales) avec différenciation des régions par les couleurs ..... 33

Figure 26 : PM2.5 - Scores de RMSE, biais et corrélation par région métropolitaine des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2020 sur l'échéance J0 ..... 34
Figure 27 : PM2.5 - 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 2020 ..... 35
Figure 28 : $PM_{2.5}$ - Scores de RMSE, biais et corrélation par région française des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2020 sur l'échéance J0 ..... 36
Figure 29 : $NO_2$ – Carte de répartition des stations de fond (urbains, périurbaines et rurales) avec différenciation des régions par les couleurs ..... 37
Figure 30 : $NO_2$ - Scores de RMSE, biais et corrélation par région métropolitaine des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2020 sur l'échéance J0 ..... 38
Figure 31 : $NO_2$ - Scores de RMSE et biais par gamme de concentration des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2020 sur l'échéance J0 ..... 38
Figure 32 : $NO_2$ - 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 2020 ..... 40
Figure 33 : $NO_2$ - Série temporelle des dépassements du seuil d'information (200 $\mu g/m^3$) de MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2020 sur l'échéance J0 ..... 40
Figure 34 : $NO_2$ - Scores de RMSE, biais et corrélation par région française des prévisions MOCAGE (bleu), CHIMERE (rouge), et de l'adaptation statistique de CHIMERE (vert) pour 2020 sur l'échéance J0 ..... 41
Figure 35 : Carte de répartition des stations de mesure CARA, avec différenciation des régions par les couleurs ..... 43
Figure 36 : $PM_1$ – Séries temporelles (moyennes sur les stations) des cinq composantes de $PM_1$ étudiées ($\mu g/m^3$) ..... 44

direction et secrétariat du LCSQA
INERIS - parc technologique Alata - BP 2 - F60550 Verneuil-en-Halatte
tél. 03 44 55 69 16 - www.lcsqa.org