



Informing you on ambient air quality
in the Belgian Regions

Validation du modèle de qualité de l'air
ATMO-Street pour le black carbon (BC) et les
particules

(PM_{2.5}, PM₁₀)

2023

Table des matières

Résumé.....	4
Samenvatting (NL).....	6
Summary (EN).....	8
Introduction.....	10
Méthode.....	11
Validation ATMO-Street de BC en 2023	12
Validation ATMO-Street de PM2.5 en 2023.....	18
Validation ATMO-Street de PM10 en 2023	27

Liste des figures et tableaux

<i>Figure 1: Emplacements des mesures indépendantes utilisées pour la validation des BC, PM10 et PM2.5</i>	11
<i>Figure 2: Validation spatiale des concentrations moyennes annuelles de BC en 2023 ATMO-Street</i>	13
<i>Figure 3: Validation temporelle des concentrations moyennes journalières de BC RIO-IFDM 2023</i>	15
<i>Figure 4: Statistiques temporelles R, RMSE, MB (n = nombre de stations télémétriques) pour les concentrations moyennes journalières de BC en 2023 RIO-IFDM</i>	16
<i>Figure 5: validation spatiale des concentrations moyennes annuelles de PM2.5 ATMO-Street 2023</i>	19
<i>Figure 6: Validation spatiale des concentrations moyennes annuelles de PM2.5 RIO 2023</i>	20
<i>Figure 7: Différence entre les concentrations moyennes annuelles de PM2.5 modélisées par ATMO-Street et RIO pour 2023</i>	21
<i>Figure 8: Validation temporelle des concentrations moyennes journalières de PM2.5 des stations télémétriques indépendantes pour la Belgique 2023</i>	25
<i>Figure 9: Statistiques temporelles R, RMSE, MB (n = nombre de stations télémétriques indépendantes) pour les concentrations moyennes journalières de PM2.5 2023 RIO-IFDM.</i>	26
<i>Figure 10: Validation spatiale des concentrations annuelles moyennes ATMO-Street PM10 en 2023, toutes les stations disponibles disposant de données suffisantes (à gauche) et sans les mesures mobiles (à droite)</i>	28
<i>Figure 11: Validation spatiale des concentrations moyennes annuelles de PM10 dans le RIO en 2023, toutes les stations disponibles disposant de données suffisantes et sans tenir compte des mesures télémétriques mobiles.</i>	29
<i>Figure 12: Validation temporelle des concentrations moyennes journalières de PM10 à l'aide des stations télémétriques indépendantes pour la Belgique 2023 RIO-IFDM</i>	33
<i>Figure 13 statistiques temporelles R, RMSE, MB (n = nombre de stations télémétriques indépendantes) pour les concentrations moyennes journalières de PM10 en 2023</i>	34
<i>Table 1: Type de stations et de zones des stations de mesure indépendantes utilisées pour la validation du BC 2023</i>	12
<i>Table 2: Concentrations moyennes annuelles de BC mesurées et modélisées par ATMO-Street, RIO-IFDM et RIO pour 2023 pour les stations indépendantes</i>	17
<i>Table 3: Disponibilité des données, type de station et de zone, concentrations annuelles mesurées et modélisées de PM2.5 pour 2023 provenant des stations</i>	18
<i>Table 4: Stations indépendantes, type de station et de zone, jours de dépassement mesurés et modélisés de 25 µg/m3 de concentrations moyennes journalières de PM2.5 pour 2023</i>	22
<i>Table 5: Disponibilité des données, type de stations et de zones des stations indépendantes PM10 2023</i>	27
<i>Table 6: stations indépendantes, type de station et de zone, jours de dépassement mesurés et modélisés de 45 µg/m3 de concentrations moyennes journalières de PM10 pour 2023</i>	30

Résumé

L'objectif de cette étude est d'évaluer les performances du modèle ATMO-Street, un modèle conçu notamment pour cartographier les concentrations de carbone noir (BC) et de particules fines (PM2.5 et PM10).

Les résultats du modèle ATMO-Street BC, PM10 et PM2.5 sont comparés à des mesures indépendantes (c'est-à-dire des mesures qui ne sont pas utilisées dans la chaîne du modèle) afin de mieux évaluer les performances du modèle.

La validation porte notamment sur les concentrations moyennes journalières et annuelles de PM2.5, PM10 et BC. L'Organisation Mondiale de la Santé et la Commission Européenne ont publié respectivement de nouvelles recommandations et de nouvelles valeurs limites pour les concentrations moyennes annuelles ou journalières en PM2.5 et PM10. C'est pourquoi la performance du modèle pour ces concentrations est importante.

- Le **nombre de stations de mesure indépendantes** disponibles pour valider le modèle pour les concentrations en 2023 est important : 12 stations pour BC, 18 pour les particules fin et PM2.5 et 21 stations pour PM10. Compte tenu du nombre significatif de stations par polluant, **les statistiques de validation** des résultats du modèle ATMO-Street peuvent être **considérées comme représentatives**.
- La validation spatiale du modèle ATMO-Street avec les concentrations **moyennes annuelles** de **BC** donne des résultats très satisfaisants ($R= 0.72$, $RMSE= 0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$), **la sous-estimation générale du modèle** est de **-0.08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** . En ce qui concerne **concentrations moyennes journalières de BC**, les statistiques de validation temporelle d'ATMO-Street **indiquent** qu'elles sont **meilleures** dans les **localisations de fond urbain**. La médiane des statistiques de validation pour R, RMSE et MB est respectivement de 0.9, $0.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $-0.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (sur base des moyennes journalières). De manière générale, **chaque étape de la chaîne de modélisation** (RIO, IFDM, OSPM) **améliore les résultats** du modèle **ATMO-Street** pour le BC.
- La validation spatiale du modèle ATMO-Street pour les concentrations moyennes annuelles de **PM2.5** donne de très bons résultats ($R=0.84$, $RMSE=1.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $MB=-0.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Le biais moyen du modèle est très faible pour les concentrations moyennes annuelles de PM2.5. **Le RMSE est une mesure de l'écart moyen entre les résultats des mesures et ceux du modèle, et ces concentrations s'élèvent à $1,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$** . Le modèle RIO présente des statistiques de validation similaires pour les concentrations moyennes annuelles de PM2.5. La validation temporelle sur base des **concentrations moyennes journalières** présente des statistiques de validation (R, RMSE, MB) comparables à celles des concentrations moyennes annuelles (validation spatiale) de PM2.5 et est donc également très bonne.
- La validation spatiale du modèle ATMO-Street pour les concentrations moyennes annuelles de **PM10** donne également de très bons résultats ($R = 0.86$, $RMSE = 2,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $MB = -0.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Il n'y a **pratiquement aucune surestimation ou sous-estimation (en moyenne sur toutes les stations indépendantes)** des **concentrations moyennes annuelles de PM10 modélisées**. Le RMSE, qui représente l'écart moyen entre les résultats des mesures et ceux du modèle pour ces

concentrations, est de $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Pour les PM10 également, le modèle **RIO** présente **des statistiques de validation similaires** à ATMO-Street pour les concentrations moyennes annuelles. Toutefois, les modélisations des PM10 au niveau de certaines stations à proximité d'émissions industrielles diffuses sous-estiment les valeurs mesurées. La **non-prise en compte** des **sources diffuses** (provenant du stockage, carrières, charroi) dans le modèle ATMO-Street peut donc avoir un impact sur la bonne évaluation des PM10. Les statistiques de la validation temporelle des **concentrations moyennes journalières de PM10** sont comparables à celles des concentrations moyennes annuelles de PM10 et donc très satisfaisantes également

- En général, les ordres de grandeur de la sous-estimation ou de la surestimation des résultats du modèle pour les particules fines (PM10 et PM2.5) sont faibles. Ils se situent dans les limites des incertitudes de mesure connues.

Samenvatting (NL)

Het doel van deze studie is om na te gaan hoe het **ATMO-Street model**, een modelketen die opgezet is om o.a. de concentraties van **Black Carbon (BC)** en **fijn stof (PM2.5 en PM10)** ruimtelijk in kaart te brengen, presteert.

De modelresultaten worden vergeleken met onafhankelijke metingen (dit zijn metingen die nergens in de modelketen worden gebruikt) om een inzicht te krijgen in de modelperformantie. Aan de hand van de onafhankelijke metingen worden de modelresultaten voor BC, PM10 en PM2.5 voor het jaar 2023 voor de verschillende stappen in de modelketen (RIO, RIO-IFDM en ATMO-Street) gevalideerd.

De validatie is naast de **jaargemiddelde** ook gericht op **PM2.5** en **PM10 daggemiddelde concentraties**. De Wereldgezondheidsorganisatie en de Europese Commissie hebben nieuwe advieswaarden respectievelijk nieuwe grenswaarden uitgevaardigd voor de jaargemiddelde en daggemiddelde concentraties van PM2.5 en PM10. Vandaar dat de performantie van het model voor deze beide middelingperiodes van belang is. De validatie van de jaargemiddeldes evalueert hoe goed het model de concentraties ruimtelijk modelleert (ruimtelijke validatie), terwijl de validatie van de daggemiddeldes het temporeel verloop van de concentraties vergelijkt met de metingen (temporele validatie).

- Het **aantal beschikbare onafhankelijke meetstations** om het model te **valideren** voor concentraties in 2023 is relatief groot: voor BC zijn er 12 onafhankelijke meetstations, voor PM10 21 stations en voor PM2.5 18 stations. Door dit aanzienlijk aantal stations per pollutant volgt dat de **validatiestatistieken van de ATMO-Street** modelresultaten als **representatief** kunnen aangenomen worden.
- De ruimtelijke validatiestatistieken van het ATMO-Street model voor **BC-jaargemiddelde** concentraties zijn **performant** ($R= 0.72$, $RMSE= 0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $MB= -0.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$). De **algemene modelonderschatting** bedraagt **$-0.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$** . Voor wat betreft de temporele validatiestatistieken van ATMO-Street voor **daggemiddelde BC-concentraties** zijn er indicaties dat deze **performanter** zijn in **stedelijke achtergrond** gebieden. Voor daggemiddelde BC-concentraties bedraagt de mediaan van de validatiestatistieken voor R, RMSE en MB respectievelijk 0.9, $0.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en $-0.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$. In het algemeen **verbetert** iedere **stap in de modelketen** (RIO, RIO-IFDM, ATMO-Street) de **BC- modelresultaten**.
- De ruimtelijke validatiestatistieken van het ATMO-Street model voor **PM2.5-jaargemiddelde** concentraties zijn **performant** ($R= 0.84$, $RMSE= 1.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $MB= -0.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Er is quasi **geen algemene modelafwijking** voor de **jaargemiddelde PM2.5 concentraties**. De **RMSE is een maat voor de gemiddelde afwijking** tussen **meet- en modelresultaat** en deze bedraagt **$1.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$** . Het **RIO-model** heeft **gelijkaardige validatiestatistieken** voor jaargemiddelde PM2.5-concentraties. De temporele validatie van de **daggemiddelde concentraties** levert vergelijkbare validatiestatistieken (R, RMSE, MB) als voor de ruimtelijke validatie van de jaargemiddelde PM2.5-concentraties en zijn dus eveneens **performant**.

- De ruimtelijke validatiestatistieken van het ATMO-Street model voor **PM10-jaargemiddelde** concentraties zijn performant ($R=0.86$, $RMSE=2,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $MB=-0.59 \mu\text{g}/\text{m}^2$). Er is **quasi geen algemene over- of onderschatting** van de gemodelleerde **jaargemiddelde PM10-concentraties**. De **RMSE die de gemiddelde afwijking** tussen **meet- en modelresultaat** voor deze concentraties **weergeeft**, bedraagt **2,01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$** . Ook voor PM10 heeft het **RIO-model gelijkaardige ruimtelijke validatiestatistieken** voor de jaargemiddelde concentraties. Het **niet** expliciet doorrekenen van **diffuse bronnen** in het ATMO-Street model heeft vooral **gevolgen** voor de **PM10-concentraties**. Daar waar er diffuse emissiebronnen (van bv. op- en overslag) aanwezig zijn kunnen de concentraties minder goed ingeschat worden. De validatiestatistieken van de **daggemiddelde PM10-concentraties** zijn vergelijkbaar met deze van de jaargemiddelde PM10-concentratie en dus **performant**.
- Algemeen zijn de grootteordes van onderschatting of overschatting van de modelresultaten van fijn stof (PM10 en PM2.5) klein.

Summary (EN)

The aim of this study is to assess the performance of the **ATMO-Street model**, a model designed to spatially map the concentrations of **black carbon (BC)** and **particulate matter (PM2.5 and PM10)**, among other pollutants.

The model results are compared with available independent measurements (i.e. measurements that are not used anywhere in the model chain) to gain insight into the model's performance. Based on the available independent measurements, these ATMO-Street model results for BC, PM10 and PM2.5 are validated.

The validation focuses on **BC, PM2.5 and PM10 daily average and annual average concentrations**. The World Health Organization and the European Commission have issued new advisory values and new limit values, respectively, for the annual average and daily average concentrations of PM2.5 and PM10. That is why the performance of the model for these concentrations is important.

- There are numerous independent measuring stations available to validate the model for concentrations in 2023: BC (12 stations), PM10 (21 stations) and PM2.5 (18 stations). **Due to this considerable number of stations per pollutant**, these **validation statistics** of ATMO-Street model results can be considered **representative**.
- The spatial validation of the ATMO-Street model with **BC** annual average concentrations is **performant** ($R=0.72$, $RMSE=0.2\ \mu\text{g}/\text{m}^3$); the **overall model underestimation** is **$-0.08\ \mu\text{g}/\text{m}^3$** . With regard to the temporal validation statistics of ATMO-Street with daily average BC concentrations, there are **indications** that these are **more performant** in **urban background** areas. For daily average BC concentrations, the median of the validation statistics for R, RMSE and MB is 0.9, $0.34\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $-0.09\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. In general, **each step** in the **model chain** (RIO, RIO-IFDM, OSPM) **improves** the **BC ATMO-Street model results**.
- The spatial validation of the ATMO-Street model for **PM2.5** annual average concentrations is **performing well** ($R=0.84$, $RMSE=1.15\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, $MB=-0.24\ \mu\text{g}/\text{m}^3$). There is **almost no general deviation** of the **model results** for the **annual average PM2.5 concentrations**. The **average deviation** between the **measured** and **modelled** results for these concentrations is **$1.15\ \mu\text{g}/\text{m}^3$** . The **RIO** model has **similar validation statistics** for annual average PM2.5 concentrations. The temporal validation of the **daily average concentrations** has similar validation statistics (R, RMSE, MB) to those for the annual average PM2.5 concentrations and is therefore also **well performing**.
- The spatial validation of the ATMO-Street model for **PM10** annual average concentrations is **well performing** ($R=0.86$, $RMSE=2.01\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, $MB=-0.59\ \mu\text{g}/\text{m}^2$). There is **almost no general overestimation** or **underestimation** of the **modelled annual average PM10 concentrations**. The **average deviation** between the **measured** and **modelled** results for these concentrations is **$2\ \mu\text{g}/\text{m}^3$** . The **RIO** model also has **similar validation statistics** for the annual average concentrations for PM10. The absence of diffuse sources in the ATMO-Street model mainly affects PM10 concentrations. These concentrations cannot be accurately modelled when diffuse sources are near, for example where there are emission sources such as storage and transshipment facilities.

The temporal validation statistics for the **daily average PM10 concentrations are comparable** to those for the annual average PM10 concentration and are therefore **well performing**.

- In general, the orders of magnitude of underestimation or overestimation of the model results for particulate matter (PM10 and PM2.5) are small. These fall within the known measurement uncertainties.

Introduction

Afin de pouvoir calculer et suivre l'exposition de la population, il est nécessaire, en plus des informations issues des mesures de carbone noir (BC) et de particules fines (PM10 et PM2.5) réalisées sur des stations fixes, de disposer également d'informations spatiales. Les résultats du modèle ATMO-Street permettent d'évaluer ces concentrations de manière spatiale en Belgique.

Pour la santé à long terme, le PM2.5 est le polluant ayant l'impact le plus important. En 2023, le nombre de décès prématurés attribués à ce polluant à long terme s'élevait à environ 5 000. Ce polluant a également des effets à court terme (augmentation des décès quotidiens dus notamment aux maladies cardiovasculaires, aux affections respiratoires et pulmonaires). L'Organisation mondiale de la santé et la Commission européenne ont publié respectivement de nouvelles valeurs limites et de nouvelles recommandations pour les concentrations annuelles et journalières de PM2.5 et PM10.

La qualité d'un modèle de qualité de l'air est évaluée au moyen d'une validation. Dans cette étude, des mesures indépendantes (c'est-à-dire des mesures qui ne sont pas utilisées dans le modèle) sont comparées aux résultats issus des différentes étapes de la chaîne de modélisation ATMO-Street. ATMO-Street désigne toujours l'ensemble de la chaîne RIO + IFDM + OSPM, mais seules les localisations situées dans des « street canyons » incluent effectivement une contribution OSPM. Dans les autres cas, la concentration ATMO-Street est identique à celle de RIO-IFDM.

Il est important de distinguer la validation spatiale de la validation temporelle. La validation spatiale évalue la performance du modèle à l'échelle spatiale en comparant les concentrations annuelles mesurées et modélisées. La validation temporelle compare, pour chaque station, les concentrations journalières mesurées et modélisées. Pour les concentrations journalières, les résultats du modèle sont calculés sans contribution OSPM, donc uniquement avec RIO-IFDM.

La suite du rapport présente la validation des résultats du modèle ATMO-Street pour les polluants BC, PM10 et PM2.5 en 2023.

Méthode

Une description détaillée de la méthode de validation et du modèle se trouve au chapitre 2 et au chapitre 2.1 du rapport de validation NO₂ 2017.

Pour les calculs de concentrations de l'année 2023 utilisés dans cette étude, les versions RIO v5.0_v2020 et IFDM v70 ont été employées.

L'objectif de cette étude est d'utiliser les données de mesure indépendantes disponibles pour le BC, le PM_{2.5} et le PM₁₀ en Belgique afin de valider le modèle. Pour ces polluants, il existe des stations fixes indépendantes de télémessure ainsi que des données issues de quelques mesures mobiles supplémentaires.

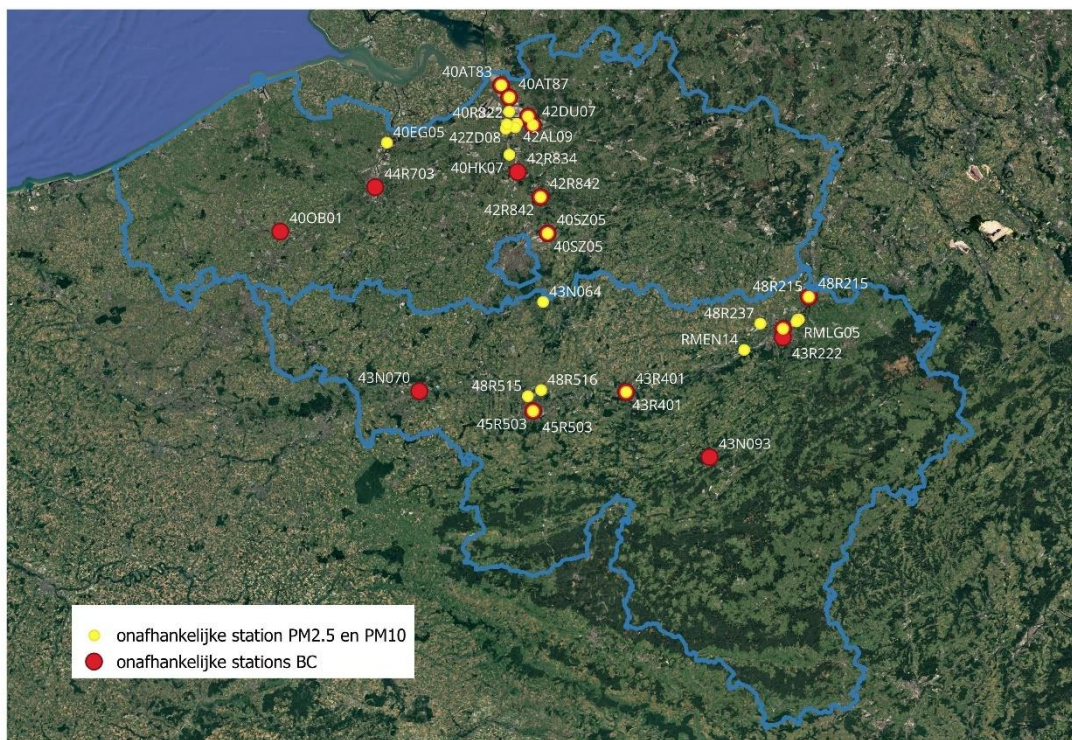


Figure 1: Emplacements des mesures indépendantes utilisées pour la validation des BC, PM₁₀ et PM_{2.5}

Validation ATMO-Street de BC en 2023

Les stations de mesure télémétrique indépendantes, qui fournissent des données horaires de BC, sont présentées dans le tableau 1 ci-dessous. Les localisations des stations sont indiquées dans la figure 1. Concernant la validation avec ces stations indépendantes, seules deux stations disposant de suffisamment de données sont situées dans un « street canyon » : 42R842 et 45R503. Pour les stations 42MK02, 43N093, 43R202 et 43R401, il y a trop peu de données disponibles pour une validation spatiale (moins de 85 % des valeurs horaires), ce qui ne permet pas de calculer une moyenne annuelle valide.

Table 1: Type de stations et de zones des stations de mesure indépendantes utilisées pour la validation du BC 2023

stations	Disponibilité des données (%) pour 2023	type de zone	type de station
40AT83	99	suburbain	industrie
40AT87	80	rural	industrie
40OB01	99	rural	industrie
40SZ05	98	suburbain	background
42DU07	100	suburbain	industrie
42MK02	75	urbain	traffic
42R834	92	suburbain	background
42R842*	100	urbain	circulation
43N070	99	suburbain	background
43N093	82	rural	background
43R202*	81	urbain	traffic
43R222	90	suburbain	background
43R401*	65	urbain	background
44R703	97	urbain	background
45R503*	86	urbain	traffic
48R215	100	suburbain	industrie

* situé dans un streetcanyon

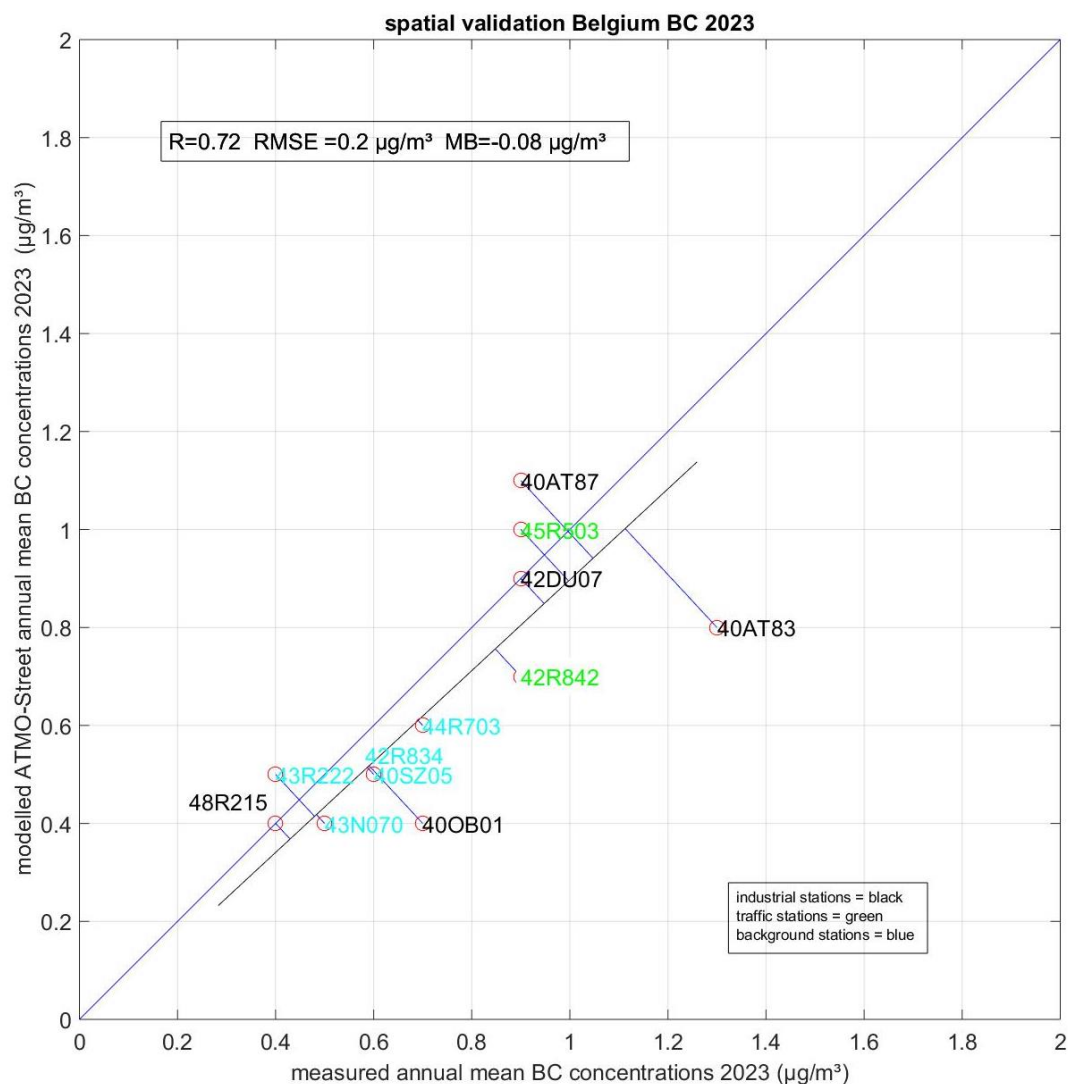
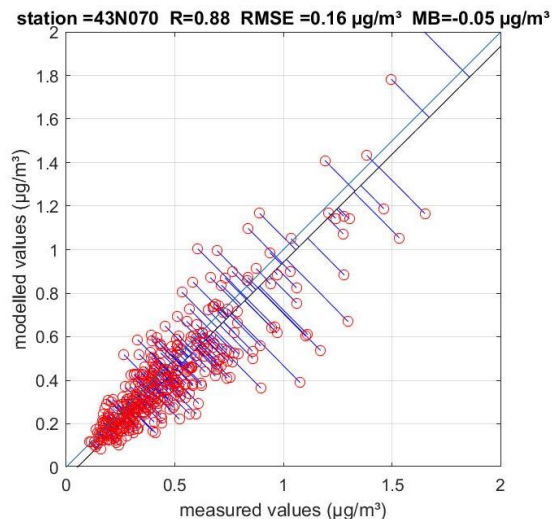
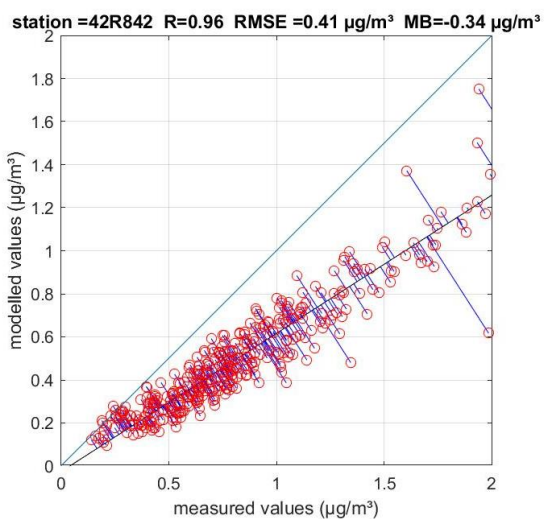
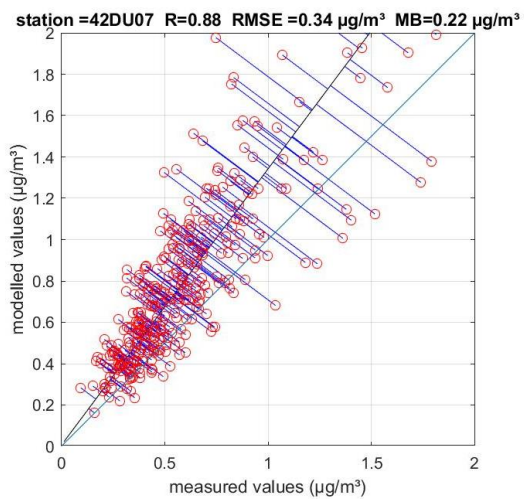
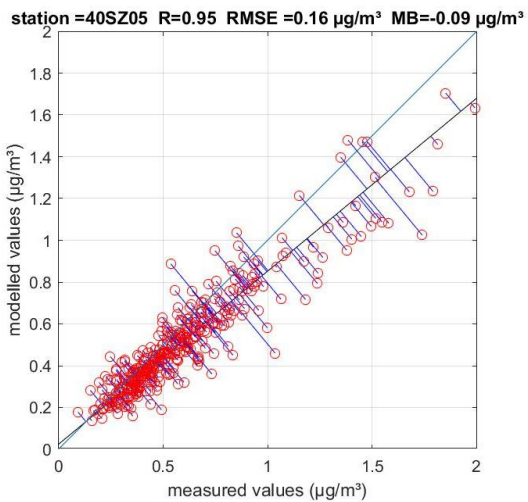
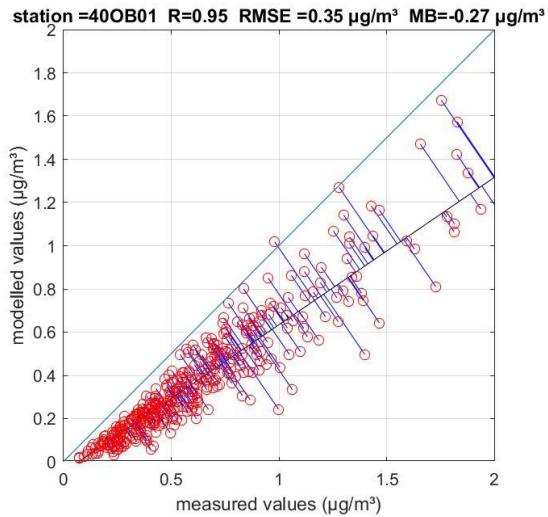
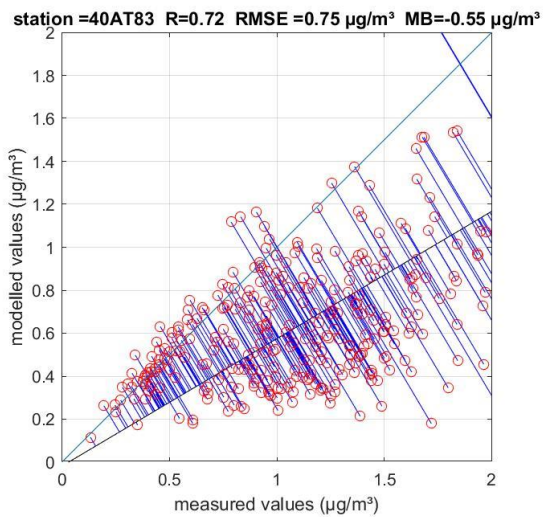


Figure 2: Validation spatiale des concentrations moyennes annuelles de BC en 2023 ATMO-Street

La validation spatiale est caractérisée par un coefficient R de 0,72, une RMSE de $0,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et un biais moyen (MB) de $-0,08 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Douze stations indépendantes sont disponibles pour la validation du BC en 2023, ce qui donne une image représentative des performances du modèle. Pour les stations avec effets de « street canyon », on observe à la fois une surestimation (45R503) et une sous-estimation (42R842).

La validation temporelle des concentrations journalières de BC est disponible pour neuf stations. La médiane des statistiques de validation pour R, RMSE et MB est respectivement de 0,9 ; $0,34 \mu\text{g}/\text{m}^3$; et $-0,09 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

La validation temporelle des concentrations journalières de BC est disponible pour neuf stations. La médiane des statistiques de validation pour R, RMSE et MB est respectivement de 0,9 ; 0,34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; et -0,09 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Lorsqu'on évalue les résultats par type de station, les statistiques indiquent que les concentrations journalières modélisées de BC sont plus performantes dans les stations urbaines de fond. Toutefois, le nombre de stations par type reste limité.



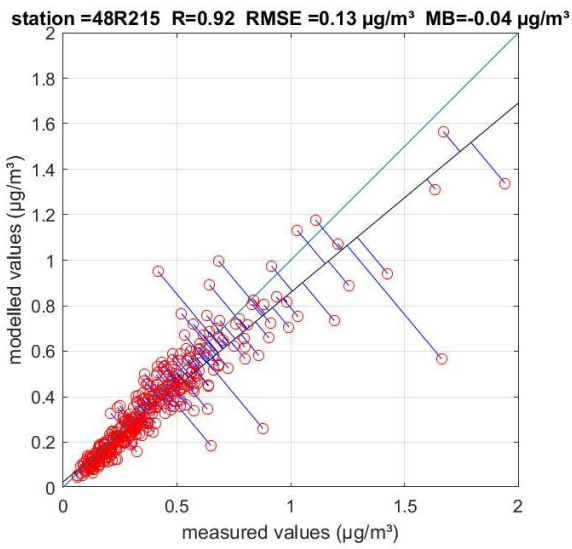
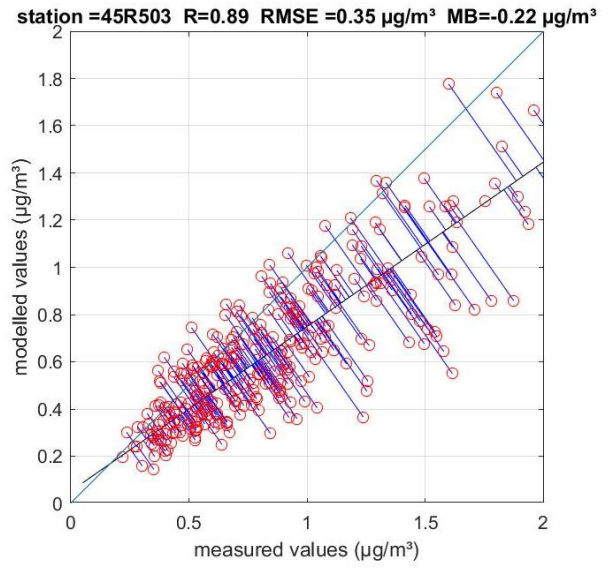
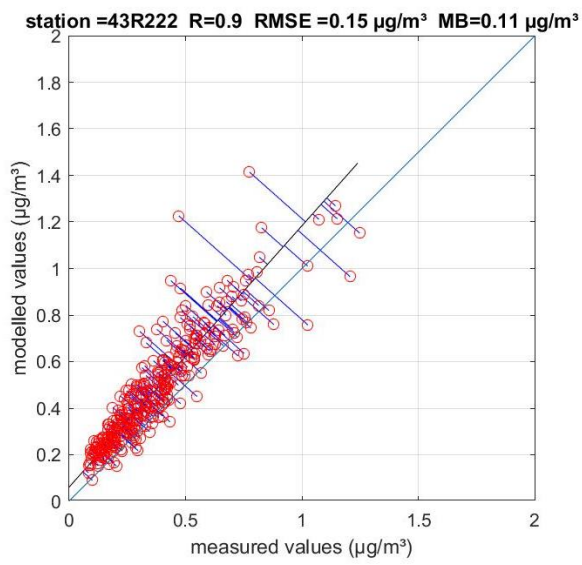


Figure 3: Validation temporelle des concentrations moyennes journalières de BC RIO-IFDM 2023

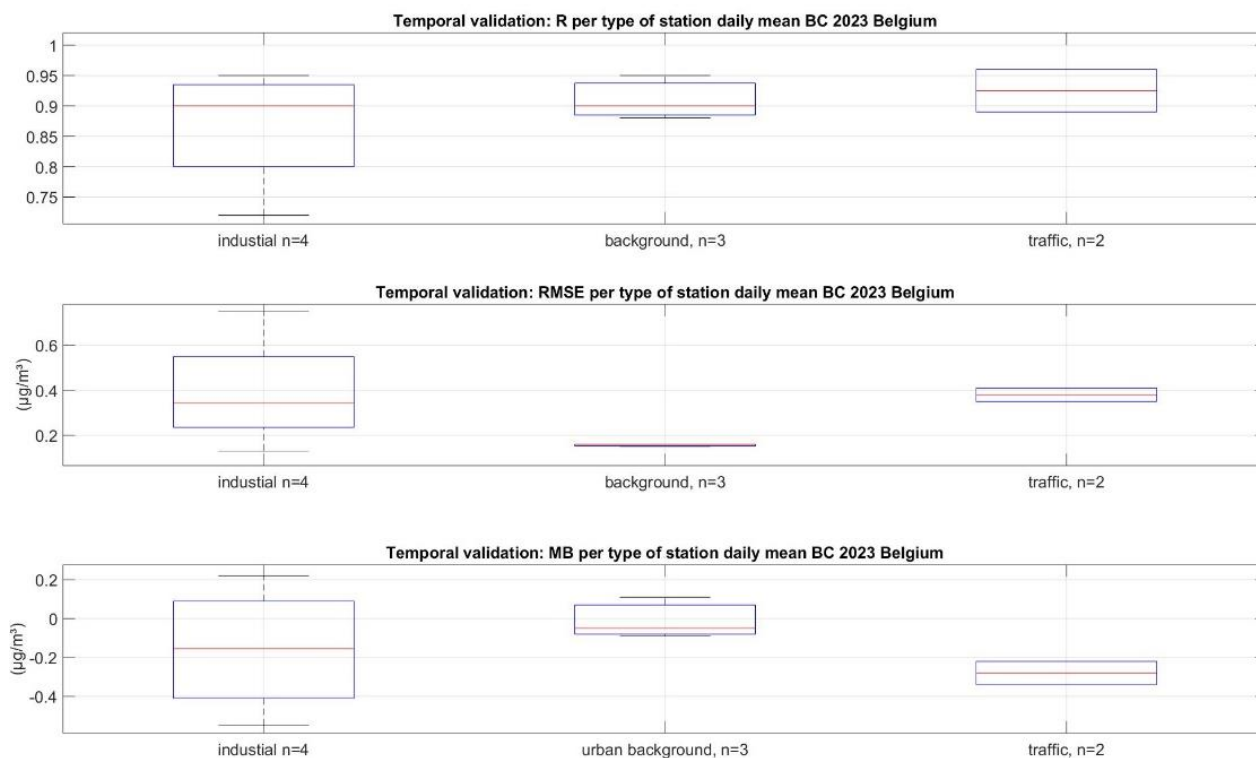


Figure 4: Statistiques temporelles R, RMSE, MB ($n =$ nombre de stations télémétriques) pour les concentrations moyennes journalières de BC en 2023 RIO-IFDM

Le tableau 2 présente les concentrations moyennes annuelles mesurées et modélisées d'ATMO-Street BC pour toutes les stations indépendantes. Afin de mieux comprendre la chaîne de modélisation qui consiste en une combinaison d'un modèle de fond (RIO) avec un modèle « open street » (RIO-IFDM) et un modèle streetcanyon (OSPM), les concentrations obtenues par ces modèles sont également indiquées. La différence entre les concentrations « RIO-IFDM interpolées » et « RIO-IFDM » réside dans le fait que ces dernières sont calculées à partir des résultats du modèle aux emplacements exacts des stations indépendantes. Le « RIO-IFDM interpolé » concerne une interpolation entre des points de modèle qui ne coïncident pas nécessairement avec l'emplacement de la station de mesure. Si l'emplacement n'est pas situé dans un canyon urbain, alors « ATMO-Street interpolé » est égal à « RIO-IFDM interpolé »

Table 2: Concentrations moyennes annuelles de BC mesurées et modélisées par ATMO-Street, RIO-IFDM et RIO pour 2023 pour les stations indépendantes

Stations	Type de stations	Type de zone	Concentration mesurée	Concentration modélisée				
				ATMO-Street	streetcanyon model (OSPM)	RIO-IFDM interpolé	RIO-IFDM	RIO
40AT83	industrie	suburbain	1,3	0,8		0,8	0,8	0,8
40OB01	industrie	Rural	0,7	0,4		0,4	0,4	0,4
40SZ05	background	suburbain	0,6	0,5		0,5	0,5	0,6
42DU07	industrie	suburbain	0,9	0,9		0,9	0,8	0,8
42R834	background	suburbain	0,6	0,5		0,5	NA	0,4
42R842	traffic	urbain	0,9	0,7	x	NA	0,5	0,5
43N070	background	suburbain	0,5	0,4		0,4	0,4	0,3
43R222	background	suburbain	0,4	0,5		0,5	0,5	0,5
44R703	background	urbain	0,7	0,6		0,6	NA	0,7
45R503	traffic	urbain	0,9	1	x	NA	0,7	0,5
48R215	industrie	suburbain	0,4	0,4		0,4	0,4	0,3

Le tableau montre qu'il n'y a pratiquement aucune différence entre les concentrations RIO-IFDM modélisées à l'emplacement exact et les résultats interpolés du modèle RIO-IFDM. Comme prévu, l'application du modèle streetcanyon augmente la concentration pour les deux stations de trafic 42R842 et 45R503. Pour les stations industrielles et les stations de fond, l'augmentation des résultats modélisés de RIO à RIO-IFDM est plutôt faible.

Le nombre de stations de mesure indépendantes pour la validation spatiale du BC est de douze. Les conclusions relatives à la validation spatiale donnent ainsi une image raisonnable des performances du modèle. Les statistiques de validation spatiale sont performantes : R de 0,72, RMSE de 0,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et MB de -0,08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

En ce qui concerne les statistiques de validation temporelle (valeurs journalières), certains éléments indiquent que les concentrations de BC modélisées sont plus performantes dans les zones urbaines de fond. La médiane des statistiques de validation pour les valeurs journalières de R, RMSE et MB est respectivement de 0,9, 0,34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et -0,09 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

En général, chaque étape de la chaîne de modélisation (RIO, RIO-IFDM, ATMO-Street) améliore les résultats du modèle BC.

Validation ATMO-Street de PM2.5 en 2023

Les stations de mesure télémétriques indépendantes, qui fournissent les concentrations horaires de PM2.5, sont présentées dans le tableau 3 ci-dessous. L'emplacement des stations de mesure est indiqué dans la figure 1. En ce qui concerne la validation avec ces stations télémétriques indépendantes, quatre stations sont situées dans un canyon urbain. Pour les stations 3, les données disponibles sont insuffisantes (moins de 85 %) pour permettre une validation spatiale. Les stations commençant par « RM » sont des stations de mesure mobiles .

Table 3: Disponibilité des données, type de station et de zone, concentrations annuelles mesurées et modélisées de PM2.5 pour 2023 provenant des stations

stations	Disponibilité des données (%) pour 2023	type de zone	type de station	Concentration annuelle moyenne mesurée de PM2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Concentration annuelle moyenne modélisée de PM2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
40AT83	99	industrie	suburbain	9,5	11,4
40AT87	93	industrie	rural	10,5	11,8
40EG05	99	industrie	suburbain	11,3	11
40SZ05	97	background	suburbain	9,7	7,7
42AL09	100	industrie	rural	9,8	10,3
42AL10	100	industrie	rural	9,9	10,4
42DU07	100	industrie	suburbain	10,5	10,9
42R842*	100	trafic	urbain	10,2	10,1
42ZD01	99	industrie	suburbain	10,9	9,8
42ZD08	100	industrie	suburbain	10,1	9,7
43N064	100	background	suburbain	6,9	7,4
43R202*	84	trafic	urbain	7,3	7
43R401*	100	backgroun	urbain	6,3	7,1
45R503*	96	trafic	urbain	8,3	8,1
48R215	99	industrie	suburbain	6,2	5,6
48R515	91	industrie	suburbain	7,2	6,6
48R516	100	industrie	suburbain	6,7	6,3
RMLG05	86	industrie	NA	8,4	6,7
RMLG17	82	industrie	NA	9,1	6,6
RMLG22	83	industrie	NA	8,8	6,5
RMEN14	90	industrie	NA	7,9	5,1

* situé dans un streetcanyon

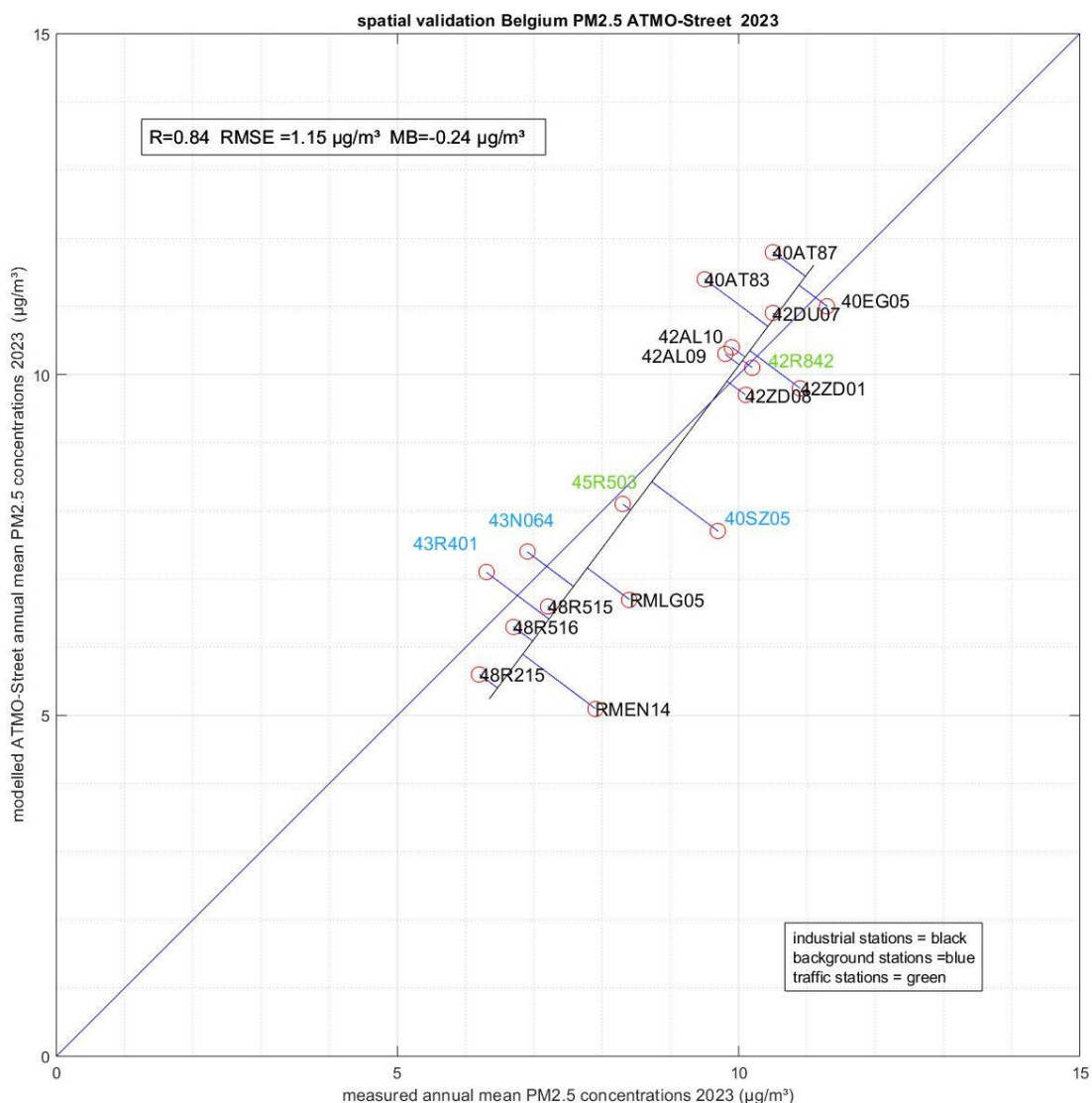


Figure 5: validation spatiale des concentrations moyennes annuelles de PM2.5 ATMO-Street 2023

a validation spatiale est caractérisée par un R de 0,84, un RMSE de 1,15 µg/m³ et un MB de -0,24 µg/m³. À titre de comparaison, les statistiques de validation des PM2.5 pour l'année 2016 étaient les suivantes : un R de 0,87, un RMSE de 1,72 µg/m³ et un MB de -1,04 µg/m³. Pour la validation de l'année 2016, seule une dizaine de stations indépendantes étaient disponibles. En 2023, 18 stations indépendantes seront disponibles, ce qui donnera une meilleure image des performances du modèle. Entre 2016 et 2023, les versions du modèle et les données d'entrée ont été actualisées et optimisées. Les statistiques de validation pour les PM2.5 de 2016 sont du même ordre de grandeur que celles de 2023.

Étant donné que les particules fines varient moins localement que les concentrations de BC et de NO2, la validation spatiale du modèle de fond RIO, utilisé dans la chaîne de modèles ATMO-Street, est également présentée ci-dessous.

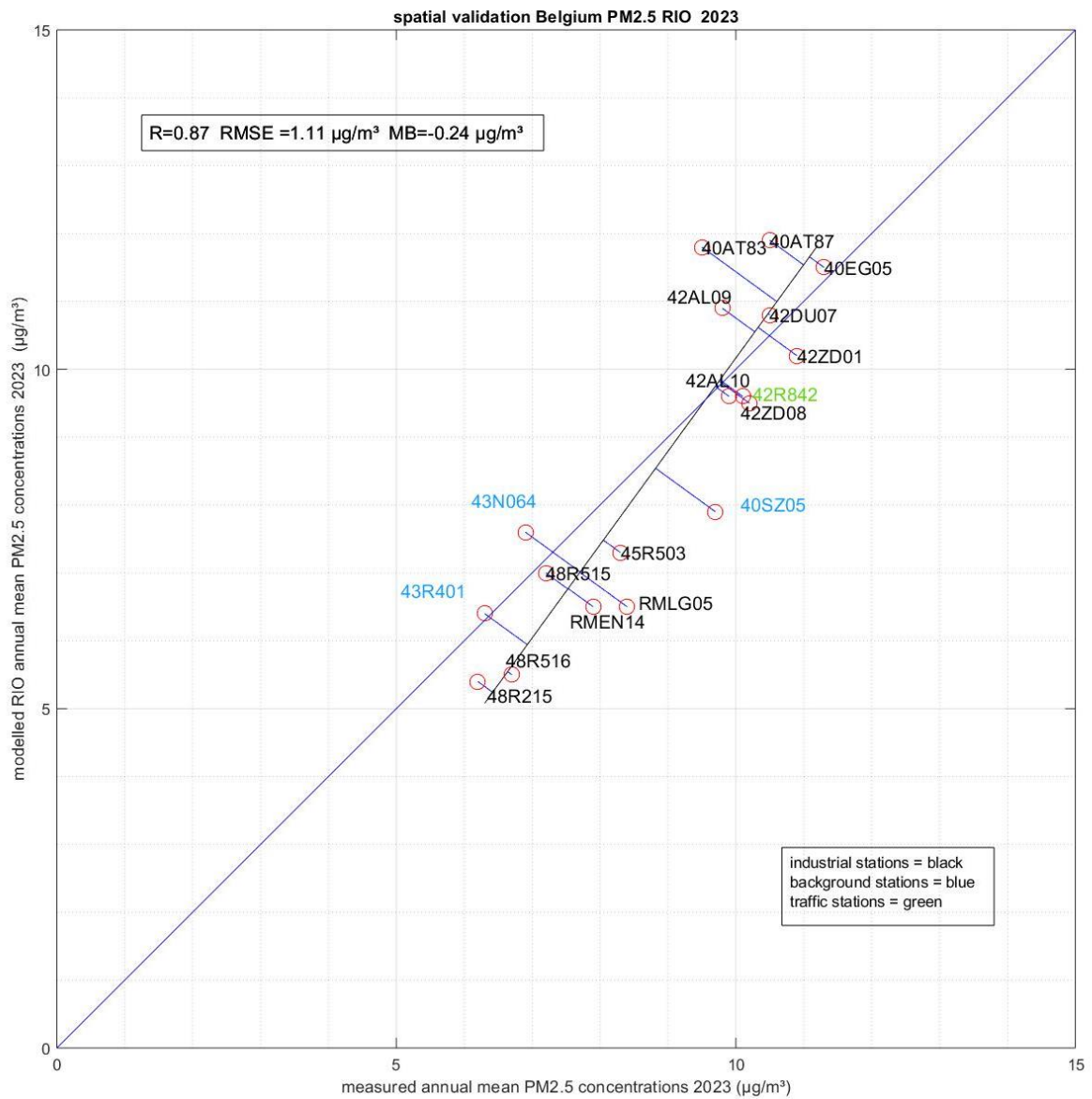


Figure 6: Validation spatiale des concentrations moyennes annuelles de PM2.5 RIO 2023

Les statistiques de validation spatiale pour les résultats du modèle RIO ne diffèrent guère de celles du modèle ATMO-Street et sont donc également très performantes. Il convient de noter que seules trois stations sont situées dans un canyon urbain. La différence entre les deux résultats du modèle (ATMO-Street et RIO) est illustrée à la figure 7 et explique également pourquoi les statistiques de

validation sont pratiquement identiques. sont pratiquement identiques.

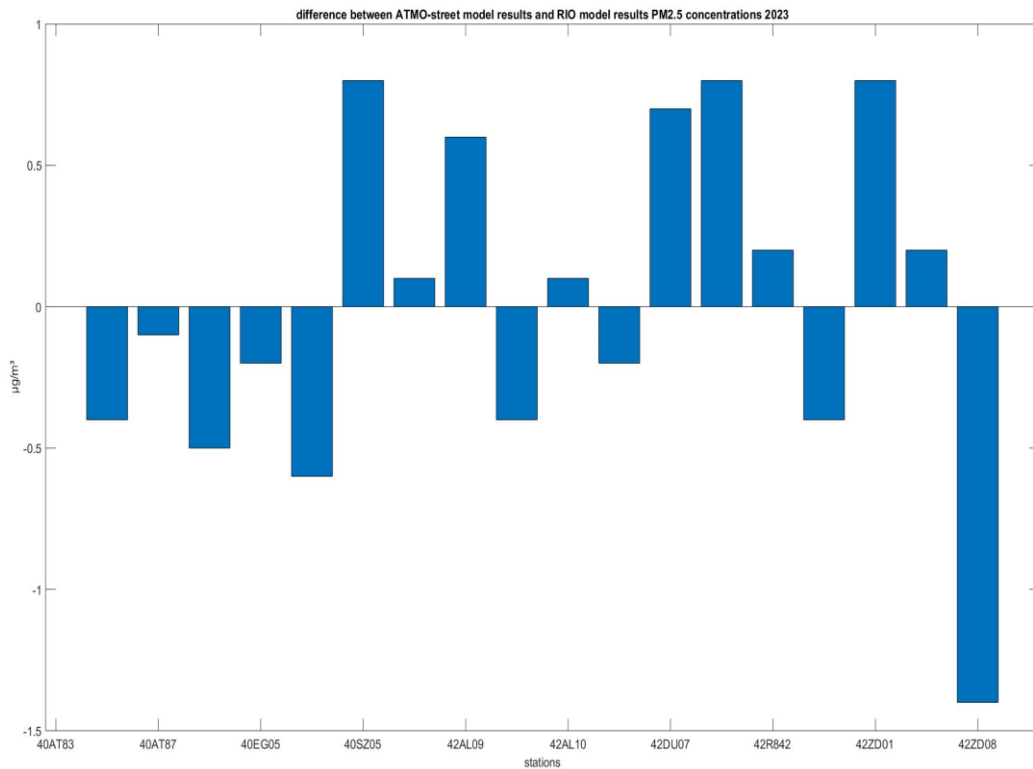


Figure 7: Différence entre les concentrations moyennes annuelles de PM2.5 modélisées par ATMO-Street et RIO pour 2023

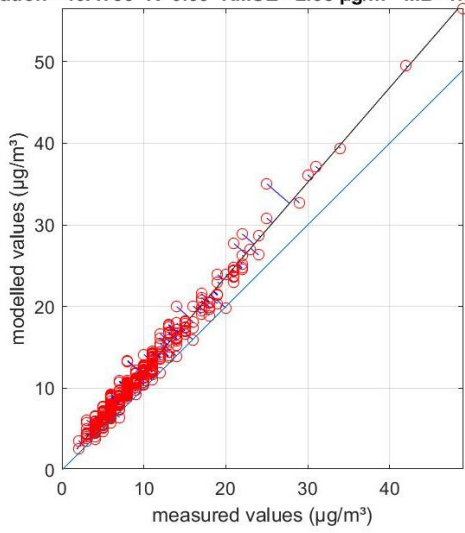
Pour la validation temporelle, les concentrations moyennes journalières de PM2.5 issues des résultats du modèle RIO-IFDM sont évaluées. La concentration moyenne journalière de PM2.5 va gagner en importance dans le cadre de la nouvelle directive européenne sur la qualité de l'air (2024/2881). Selon la nouvelle directive européenne sur la qualité de l'air (2024/2881), à partir de 2030, la concentration moyenne journalière de PM2.5 de 25 µg/m³ ne pourra être dépassée plus de 18 fois par an. Les résultats du modèle pour les concentrations moyennes journalières ne sont pas disponibles pour toutes les stations du tableau 3, mais uniquement pour celles du tableau 4. Cela s'explique par le fait que certaines stations ne figurent pas dans le modèle en tant que points récepteurs et ne disposent donc pas de moyennes journalières. Le tableau 4 présente le nombre de jours de dépassement conformément à la nouvelle directive européenne pour l'année 2023. Pour la station 40EG05, ce nombre est supérieur à 18 jours et ce dépassement a également été modélisé.

La figure 8 présente les statistiques relatives aux concentrations moyennes journalières de PM2.5 par station. Sur la base de ces statistiques, nous pouvons conclure que le modèle ATMO-street est très performant pour les concentrations moyennes journalières de PM2.5. Seules les statistiques de la station de Zwijndrecht (42ZD08) sont légèrement moins performantes. Si nous ventilons les statistiques de validation temporelle par type de station de mesure, nous constatons qu'elles sont très performantes pour les stations industrielles, les stations routières et les stations urbaines de fond. Les médianes de ces statistiques de validation temporelle des concentrations moyennes journalières de PM2.5 sont MB=-0,45 µg/m³, RMSE= 1,71 µg/m³ et R=0,98.

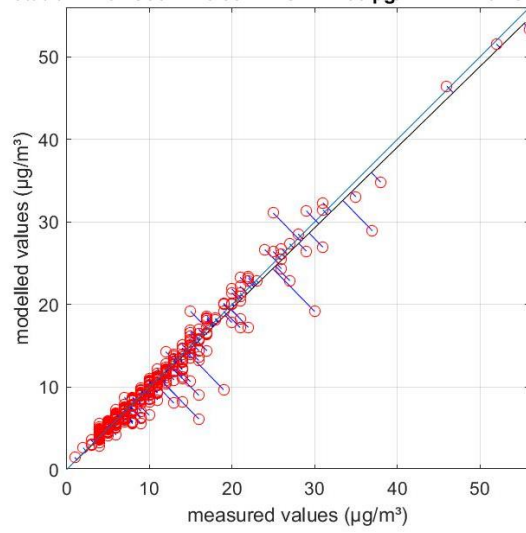
Table 4: Stations indépendantes, type de station et de zone, jours de dépassement mesurés et modélisés de 25 µg/m³ de concentrations moyennes journalières de PM2.5 pour 2023

stations	type de zone	type de station	nombre de jours avec une moyenne journalière mesurée de PM2.5 > 25 µg/m ³	nombre de jours avec une moyenne journalière modélisée de PM2.5 > 25 µg/m ³
40AT83	Industrial	Suburban	6	15
40EG05	Industrial	Suburban	19	20
40R822	Industrial	Suburban	29	19
40SZ05	Background	Suburban	16	6
42AL09	Industrial	Rural	11	11
42AL10	Industrial	Rural	7	14
42DU07	Industrial	Suburban	13	14
42R842	Traffic	Urban	12	11
42ZD01	Industrial	Suburban	14	10
42ZD08	Industrial	Suburban	14	10
43N064	Background	Suburban	11	4
43R202	Traffic	Urban	6	8
43R401	Background	Urban	9	9
45R503	Traffic	Urban	14	13
48R215	Industrial	Suburban	6	4
48R515	Industrial	Suburban	9	8
48R516	Industrial	Suburban	7	7

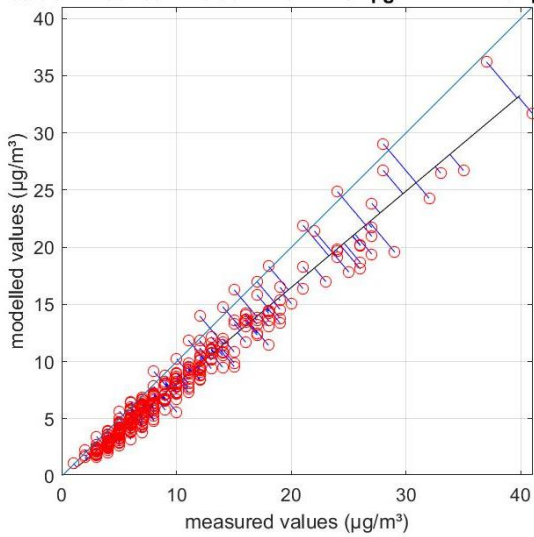
station =40AT83 R=0.99 RMSE =2.38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ MB=1.97 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



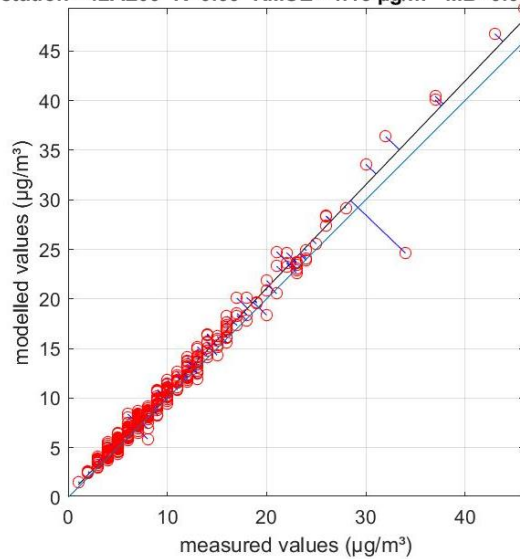
station =40EG05 R=0.98 RMSE =1.63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ MB=-0.28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



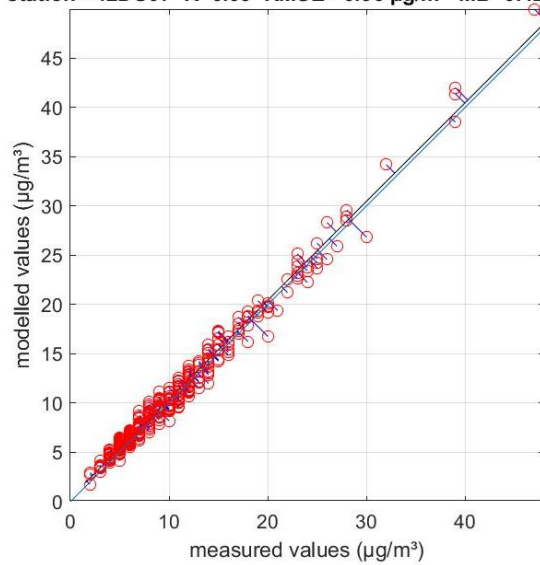
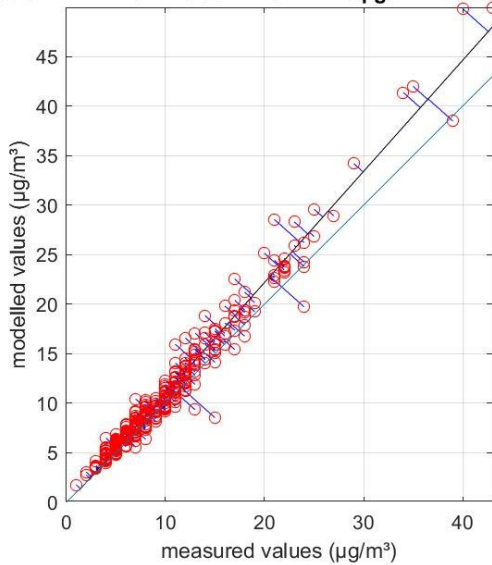
station =40SZ05 R=0.98 RMSE =2.51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ MB=-1.87 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



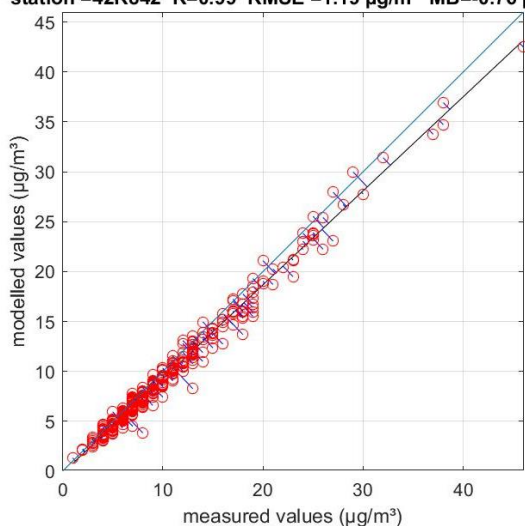
station =42AL09 R=0.99 RMSE =1.13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ MB=0.63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



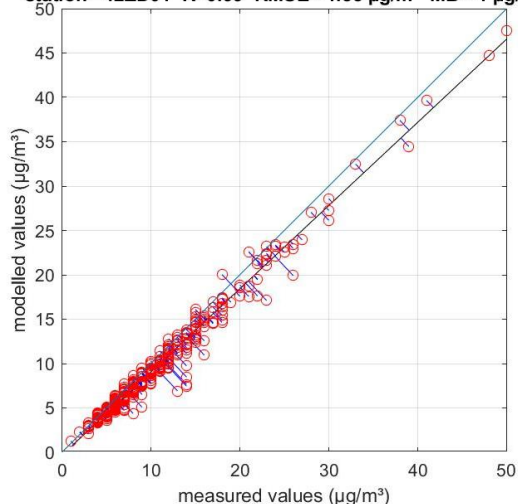
station =42AL10 R=0.98 RMSE =1.73 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ MB=0.97 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ station =42DU07 R=0.99 RMSE =0.96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ MB=0.42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



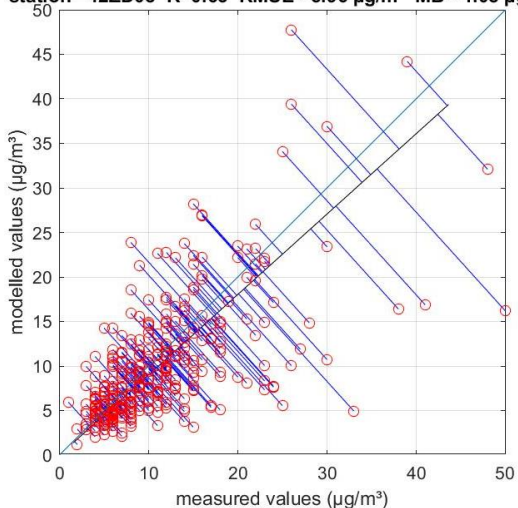
station =42R842 R=0.99 RMSE =1.19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ MB=-0.76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



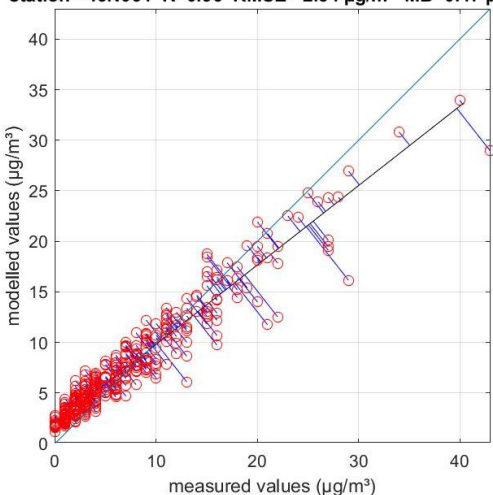
station =42ZD01 R=0.99 RMSE =1.55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ MB=-1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



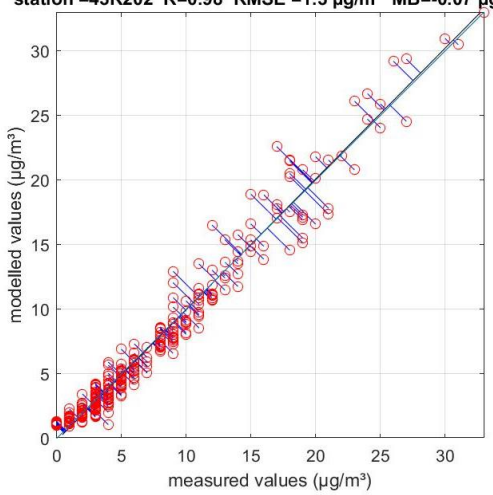
station =42ZD08 R=0.63 RMSE =5.96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ MB=-1.08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



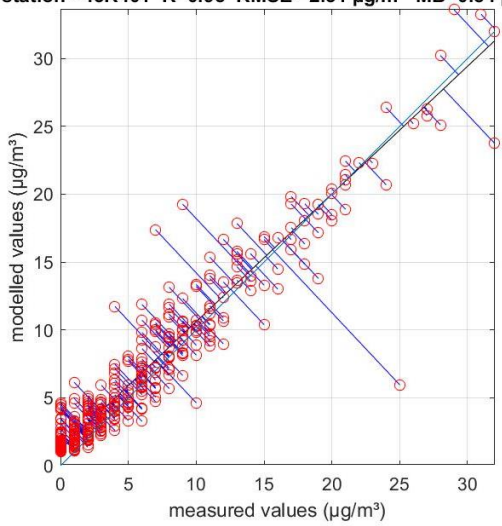
station =43N064 R=0.96 RMSE =2.34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ MB=0.47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



station =43R202 R=0.98 RMSE =1.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ MB=-0.07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



station =43R401 R=0.95 RMSE =2.31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ MB=0.84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



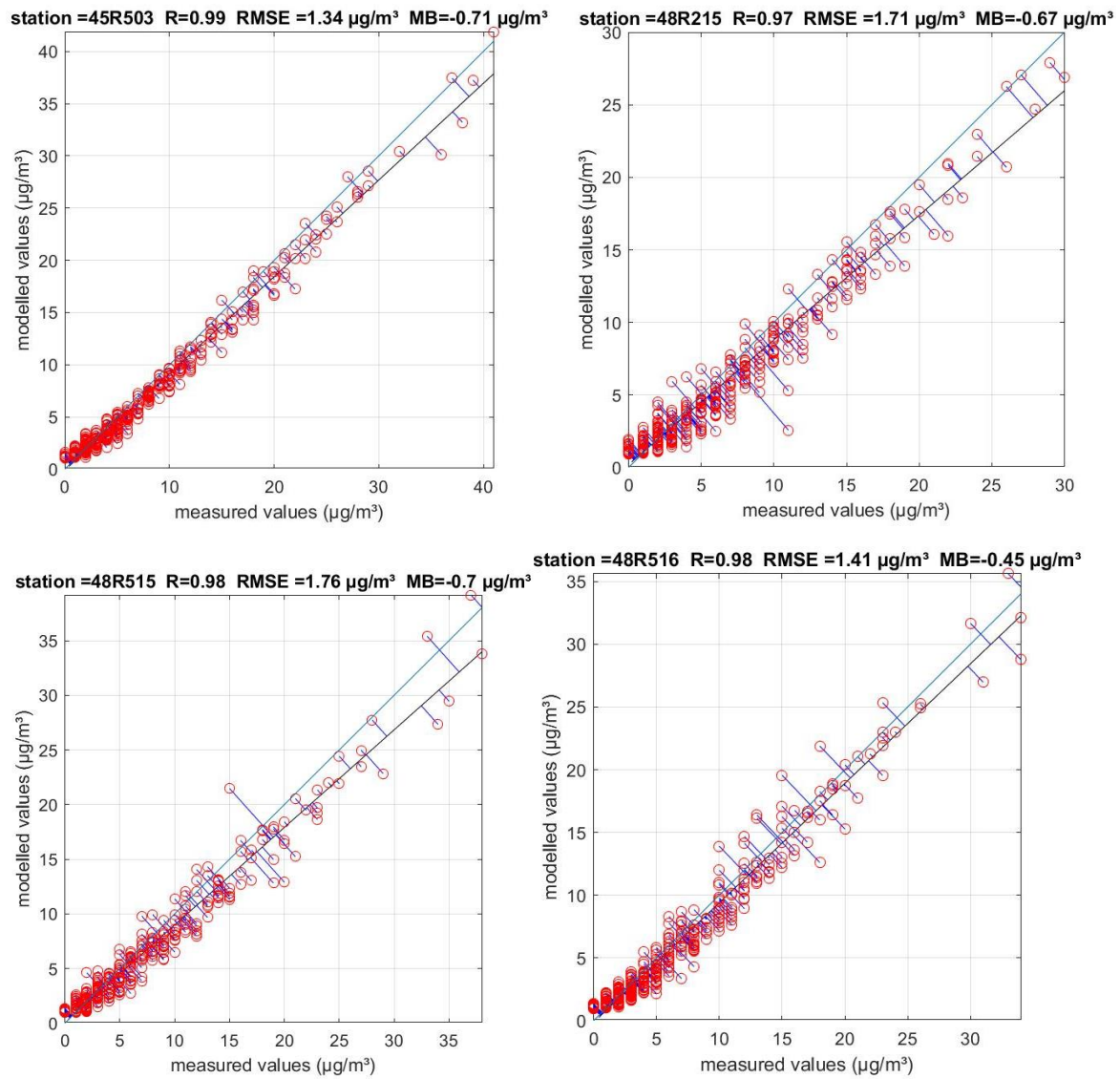


Figure 8: Validation temporelle des concentrations moyennes journalières de PM2.5 des stations télémétriques indépendantes pour la Belgique 2023

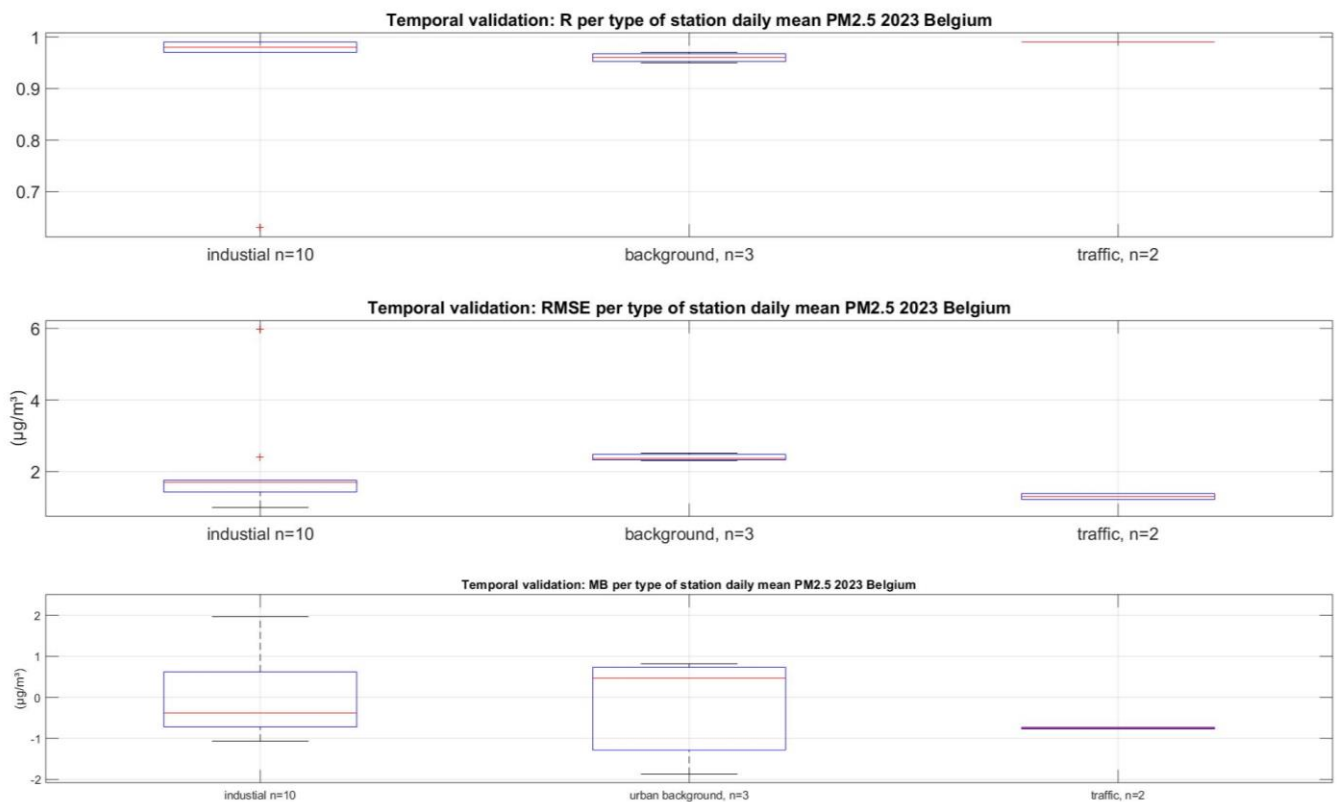


Figure 9: Statistiques temporelles R, RMSE, MB (n = nombre de stations télémétriques indépendantes) pour les concentrations moyennes journalières de PM2.5 2023 RIO-IFDM.

Il existe 18 stations de mesure télémétriques indépendantes pour la validation des PM2.5. La validation spatiale donne ainsi une bonne estimation des performances du modèle. Sur la base de cet exercice, il apparaît qu'il existe une très légère sous-estimation générale (MB = $-0,24 \mu\text{g}/\text{m}^3$) des concentrations annuelles moyennes modélisées de PM2.5. La mesure de l'écart moyen entre les résultats des mesures et ceux du modèle (RMSE) pour les concentrations annuelles moyennes de PM2.5 est de $1,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

La validation spatiale du modèle RIO (le modèle de base de la chaîne ATMO-Street) prouve que ce modèle est également très performant pour les concentrations annuelles moyennes de PM2.5. En général, les concentrations annuelles moyennes de PM2.5 du modèle RIO ne diffèrent guère de celles du modèle ATMO-Street pour les stations indépendantes. Pour certaines stations, ATMO-Street réduit toutefois considérablement l'écart moyen (jusqu'à $0,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Les statistiques de validation temporelles basées sur les concentrations moyennes journalières de PM2.5 sont également performantes. Les médianes des statistiques de validation des concentrations moyennes journalières de PM2.5 sont les suivantes : MB = $-0,45 \mu\text{g}/\text{m}^3$, RMSE = $1,71 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et R = 0,98.

Les statistiques de validation pour les concentrations annuelles moyennes (spatiales) et quotidiennes moyennes (temporelles) de PM2.5 sont très bonnes. On peut en conclure que le modèle ATMO-street est très performant pour les concentrations de PM2.5.

Validation ATMO-Street de PM10 en 2023

Les stations de mesure télémétriques indépendantes, qui fournissent les concentrations horaires de PM10, sont indiquées dans le tableau 5 ci-dessous. Les emplacements des stations de mesure sont indiqués dans la figure 1. En ce qui concerne la validation avec ces stations télémétriques indépendantes, seules trois stations disposent de données suffisantes dans les canyons urbains : 42R842, 43R401 et 45R503. Pour les stations 40HK07, 42MK02, 43R202 et 48R237, les données disponibles sont insuffisantes pour la validation spatiale.

Table 5: Disponibilité des données, type de stations et de zones des stations indépendantes PM10 2023

stations	disponibilité des données (%) pour 2023	type de zone	type de station
40AT83	99	suburbain	industrie
40AT87	93	rural	industrie
40EG05	99	suburbain	industrie
40HK07	46	suburbain	background
40SZ05	97	suburbain	background
42AL09	100	rural	industrie
42AL10	100	rural	industrie
42DU07	100	suburbain	industrie
42MK02	76	urbain	trafic
42R842*	100	urbain	trafic
42ZD01	99	suburbain	industrie
42ZD08	100	suburbain	industrie
43N064	100	suburbain	background
43R202*	84	urbain	trafic
43R401*	100	urbain	background
45R503*	96	urbain	trafic
48R215	99	suburbain	industrie
48R235	96	suburbain	industrie
48R237	21	suburbain	industrie
48R515	91	suburbain	industrie
48R516	100	suburbain	industrie
RMLG05	97	NA	industrie
RMLG17	95	NA	industrie
RMLG22	93	NA	industrie
RMEN14	97	NA	industrie

* situé dans un streetcanyon

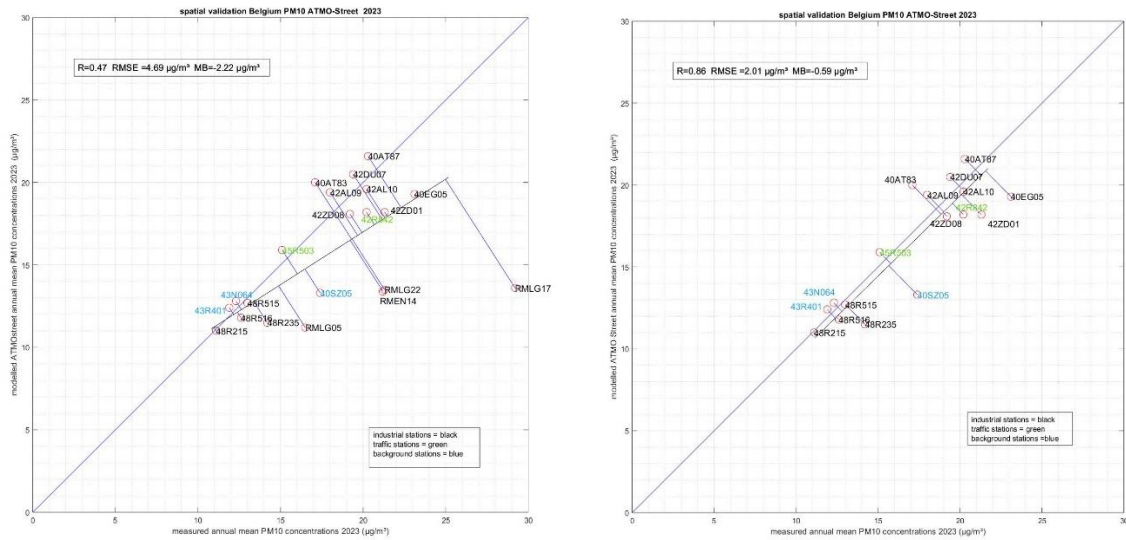


Figure 10: Validation spatiale des concentrations annuelles moyennes ATMO-Street PM10 en 2023, toutes les stations disponibles disposant de données suffisantes (à gauche) et sans les mesures mobiles (à droite)

La validation spatiale avec toutes les stations est caractérisée par un R de 0,47, un RMSE de $4,69 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et une sous-estimation générale du modèle de $-2,22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (MB). Il existe 21 stations de mesure indépendantes, ce qui est considéré comme suffisant pour obtenir une bonne image des performances du modèle. La figure 10 montre que le modèle pour les stations télémétriques mobiles RMLG05, RMLG17, RMLG22 et RMEN14 est peu performant. Ces stations sont toutefois situées à proximité ou à côté de sources diffuses (par exemple, stockage et transbordement, carrières). Il s'agit de la fraction la plus grossière contenue dans les PM10. Depuis 2021, il a été décidé de ne plus inclure les émissions diffuses dans le modèle en raison de la mauvaise estimation de ces émissions diffuses. Pour ces stations, nous savons d'avance que le modèle sous-estimera les concentrations à ces endroits. C'est pourquoi nous n'incluons pas ces stations dans les statistiques de validation. La validation spatiale sans les mesures mobiles a un R de 0,86, un RMSE de $2,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et un MB de $-0,59 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La figure ci-dessous montre que les statistiques de validation des concentrations moyennes annuelles de PM10 du modèle RIO sont comparables à celles du modèle ATMO-Street.

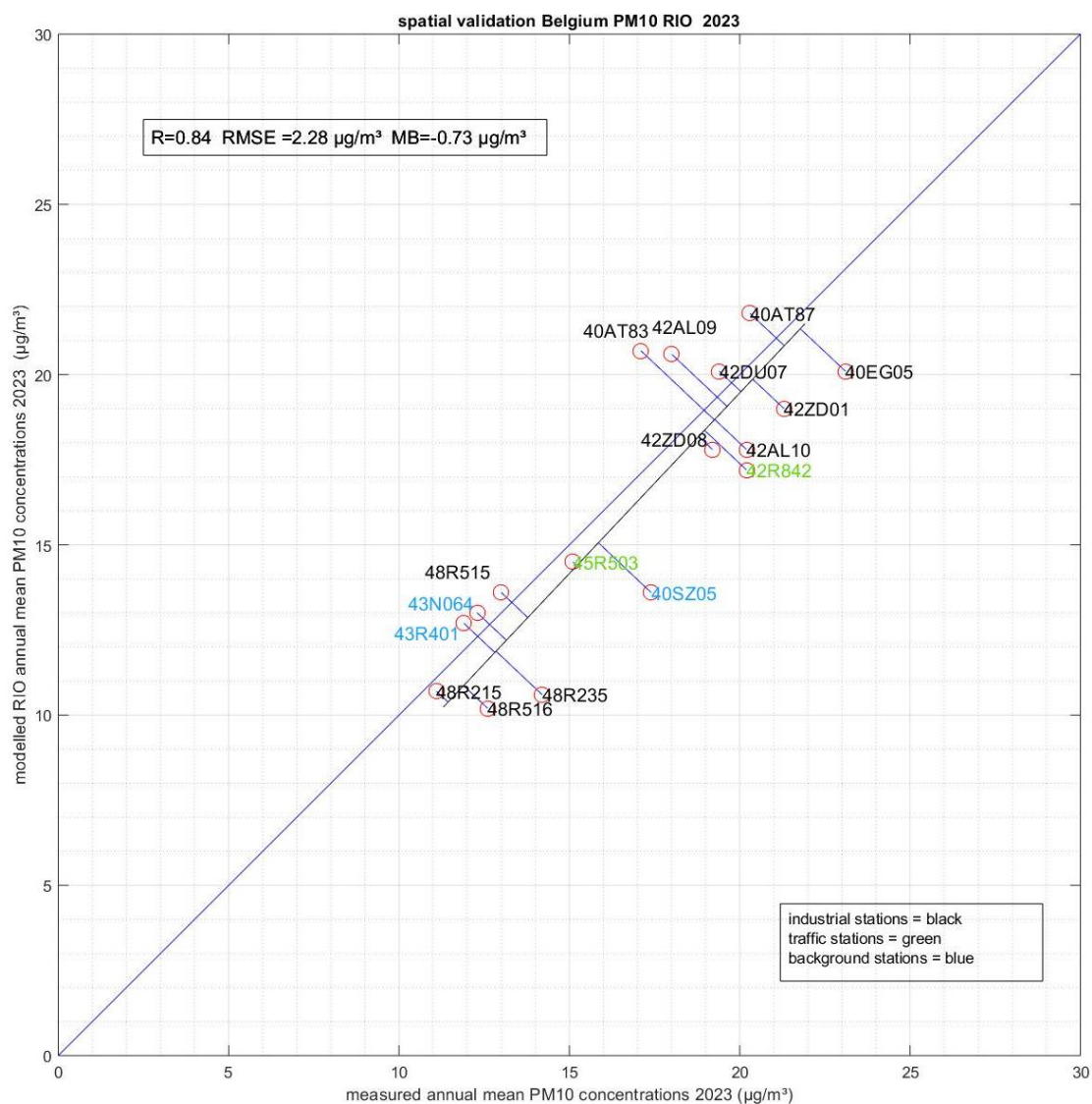


Figure 11: Validation spatiale des concentrations moyennes annuelles de PM10 dans le RIO en 2023, toutes les stations disponibles disposant de données suffisantes et sans tenir compte des mesures télémétriques mobiles.

Pour la validation temporelle, les concentrations moyennes journalières de PM10 issues des résultats du modèle RIO-IFDM sont évaluées. Selon la nouvelle directive européenne sur la qualité de l'air (2024/2881), à partir de 2030, la concentration moyenne journalière de PM10 ne pourra dépasser $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ plus de 18 fois par an. Les résultats du modèle pour les concentrations moyennes journalières ne sont pas disponibles pour toutes les stations du tableau 5, mais uniquement pour celles du tableau 6. Cela s'explique par le fait que certaines stations ne sont pas incluses dans le modèle en tant que points récepteurs et ne disposent donc pas de moyennes journalières. Le tableau 6 indique le nombre de jours de dépassement conformément à la nouvelle directive européenne pour l'année 2023. Le dépassement mesuré pour la station 40EG05 est également modélisé.

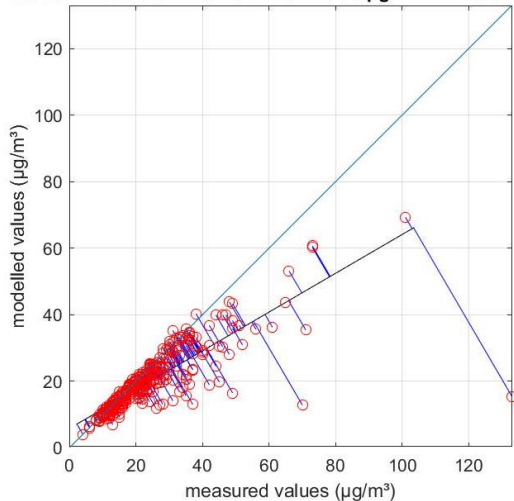
La figure 12 présente les statistiques relatives aux concentrations moyennes journalières de PM10 par station. Sur la base de ces statistiques, nous pouvons conclure que le modèle RIO-IFDM est très

performant en ce qui concerne R et MB pour les concentrations moyennes journalières de PM10. Les statistiques RMSE pour les stations sont plus élevées si on les compare au RMSE des concentrations journalières moyennes de PM2.5. Si on divise les statistiques de validation temporelle par type de station de mesure, on constate qu'elles sont performantes pour les stations industrielles, les stations routières et les stations urbaines de fond. Les médianes des statistiques de validation temporelle des concentrations moyennes journalières de PM10 sont MB=-0,08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, RMSE= 2,89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et R=0,95.

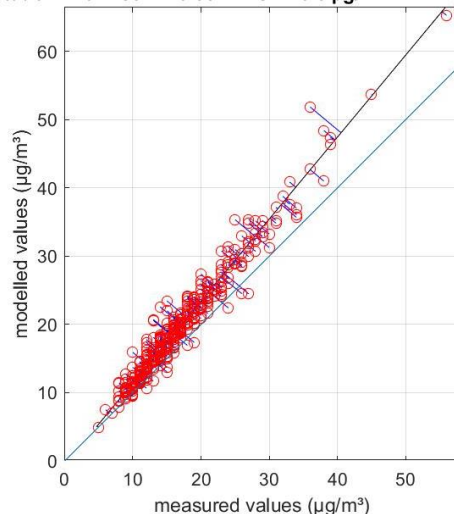
Stations	Type de station	Type de zone	nombre de jours avec une moyenne journalière mesurée de PM10 > 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	nombre de jours avec une moyenne journalière modélisée de PM10 > 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
40AT83	industrieel	voorstedelijk	2	7
40EG05	industrieel	voorstedelijk	21	4
40SZ05	achtergrond	voorstedelijk	4	1
42AL09	industrieel	ruraal	4	5
42AL10	industrieel	ruraal	8	7
42DU07	industrieel	voorstedelijk	7	7
42R842	verkeer	stedelijk	7	4
42ZD01	industrieel	voorstedelijk	12	5
42ZD08	industrieel	voorstedelijk	6	5
43N064	achtergrond	voorstedelijk	2	1
43R401	achtergrond	stedelijk	1	0
45R503	verkeer	stedelijk	5	3
48R215	industrieel	voorstedelijk	0	0
48R515	industrieel	voorstedelijk	4	2
48R516	industrieel	voorstedelijk	1	1

Table 6: stations indépendantes, type de station et de zone, jours de dépassement mesurés et modélisés de 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de concentrations moyennes journalières de PM10 pour 2023

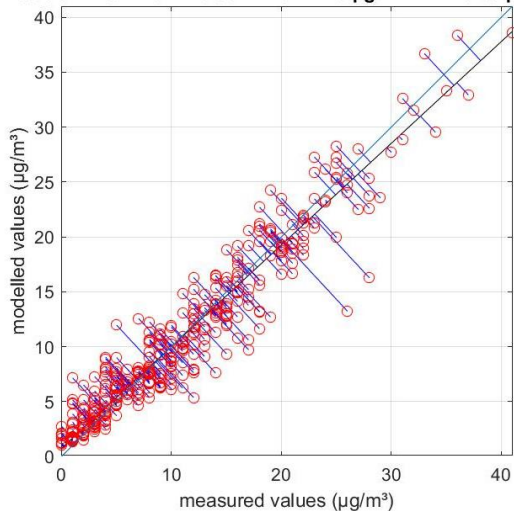
station =40EG05 R=0.78 RMSE =9.53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ MB=-3.82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



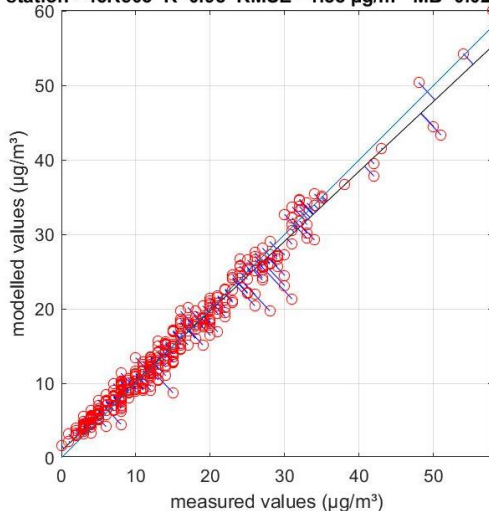
station =40AT83 R=0.98 RMSE =3.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ MB=2.85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



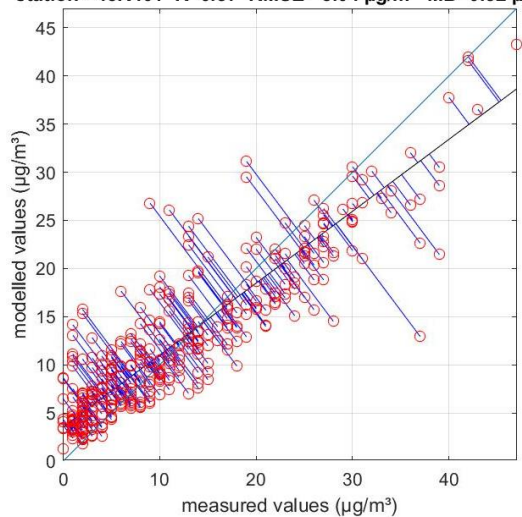
station =48R215 R=0.95 RMSE =2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ MB=-0.08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



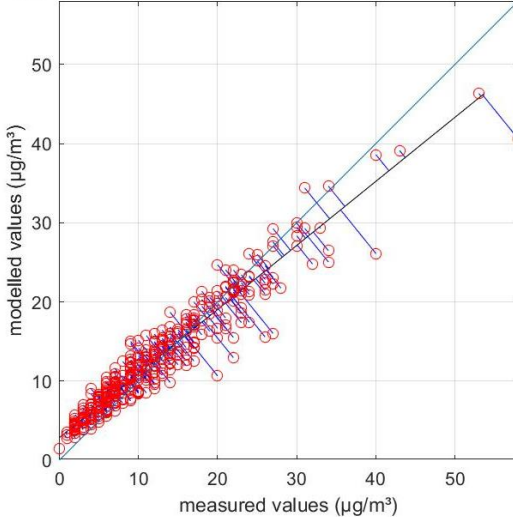
station =45R503 R=0.98 RMSE =1.88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ MB=0.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



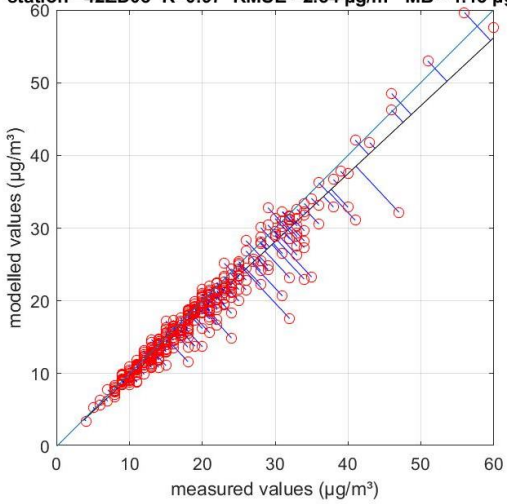
station =43R401 R=0.87 RMSE =5.04 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ MB=0.52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



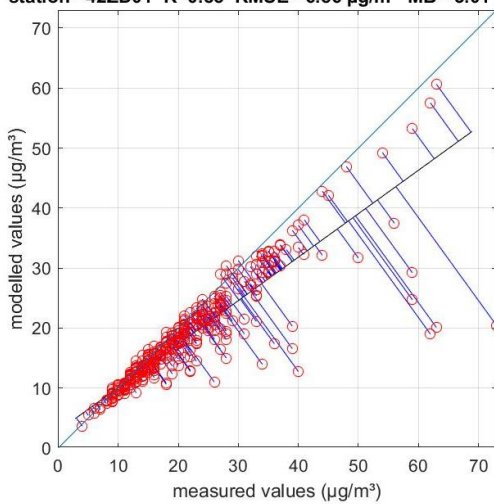
station =43N064 R=0.95 RMSE =2.89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ MB=0.51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



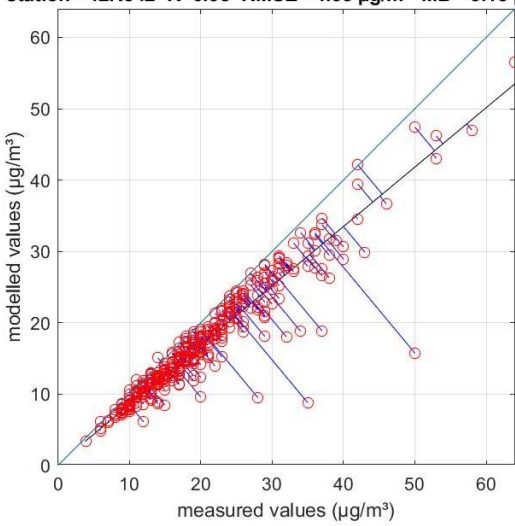
station =42ZD08 R=0.97 RMSE =2.54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ MB=-1.13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



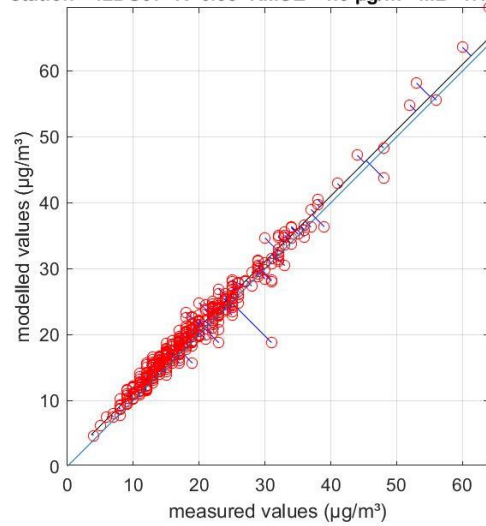
station =42ZD01 R=0.85 RMSE =6.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ MB=-3.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



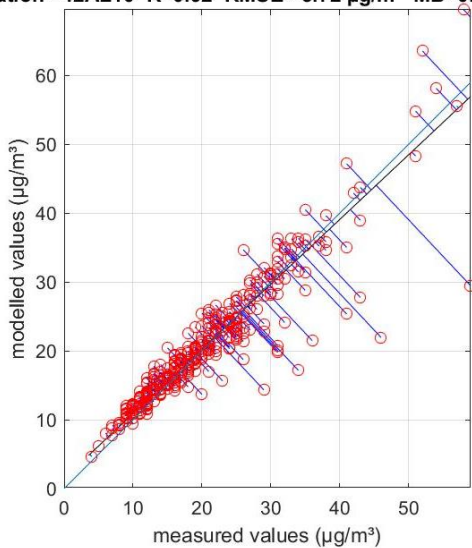
station =42R842 R=0.93 RMSE =4.65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ MB=-3.18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



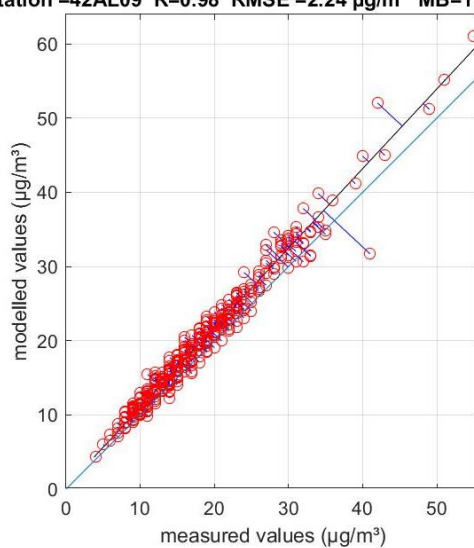
station =42DU07 R=0.98 RMSE =1.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ MB=1.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



station =42AL10 R=0.92 RMSE =3.72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ MB=0.28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



station =42AL09 R=0.98 RMSE =2.24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ MB=1.58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$



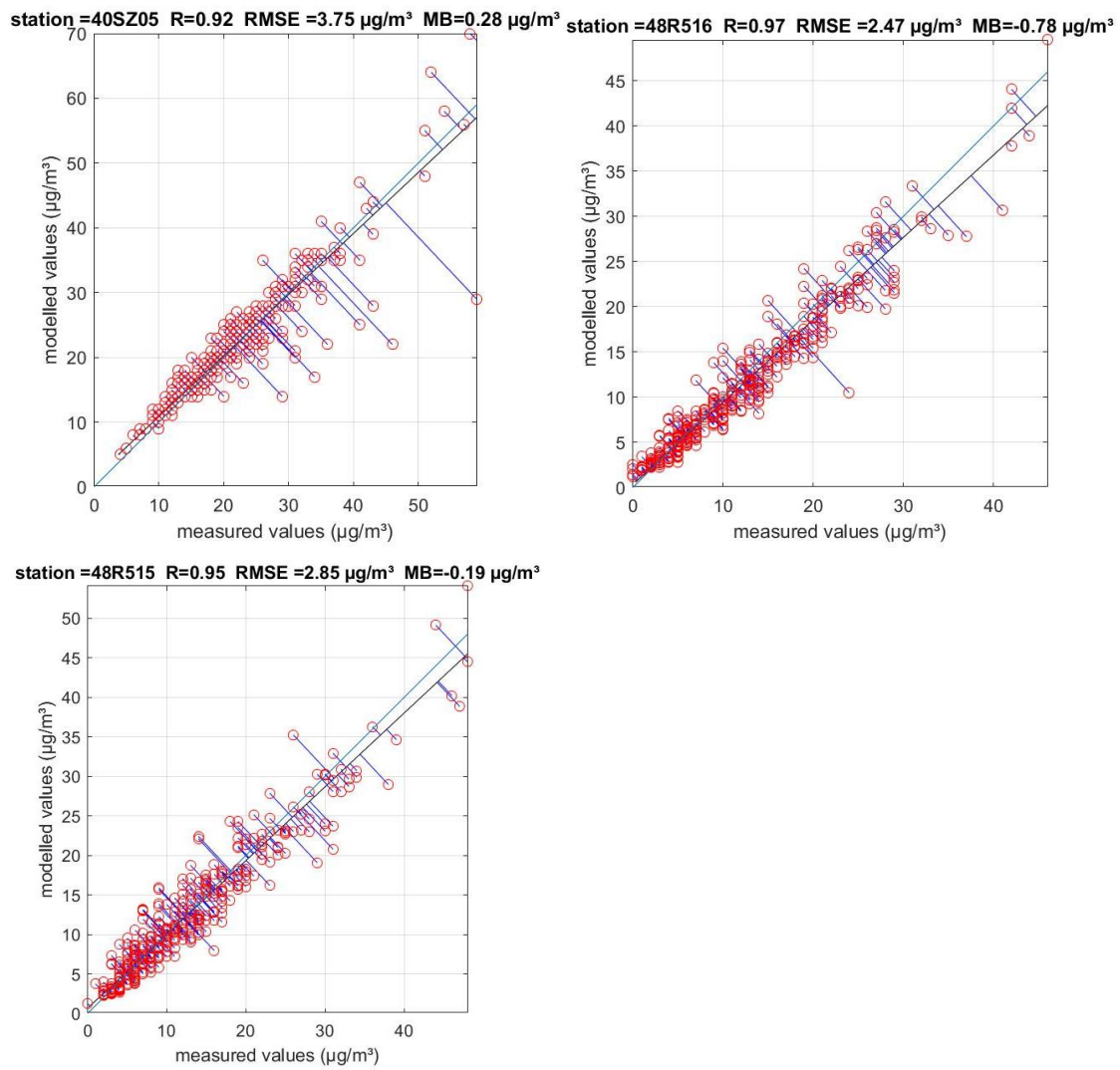


Figure 12: Validation temporelle des concentrations moyennes journalières de PM10 à l'aide des stations télémétriques indépendantes pour la Belgique 2023 RIO-IFDM

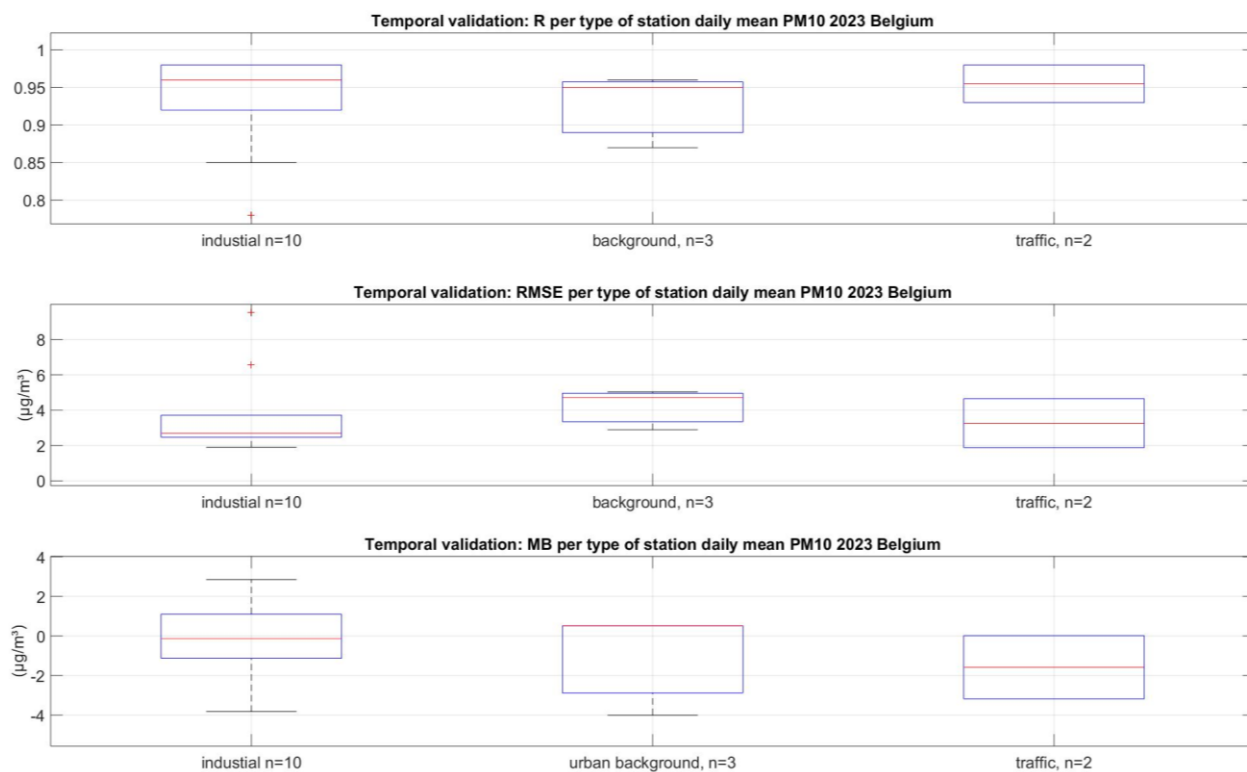


Figure 13 statistiques temporelles R, RMSE, MB (n = nombre de stations télémétriques indépendantes) pour les concentrations moyennes journalières de PM10 en 2023

Il existe 21 stations de mesure télémétriques indépendantes pour la validation des PM10. La validation spatiale donne en ce sens une bonne estimation des performances du modèle. Sur la base de cet exercice, il apparaît qu'il existe une très légère sous-estimation générale ($MB = -0,59 \mu\text{g}/\text{m}^3$) des concentrations annuelles moyennes modélisées de PM10. La mesure de l'écart moyen entre les résultats des mesures et ceux du modèle (RMSE) pour les concentrations annuelles moyennes de PM2.5 est de $2,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Pour un certain nombre de stations, l'absence de calcul des émissions diffuses (par exemple, celles provenant des activités de stockage et de transbordement) dans le modèle ATMO-Street entraîne une sous-estimation importante. Ces stations n'ont pas été incluses dans les statistiques mentionnées ci-dessus.

La validation spatiale du modèle RIO (le modèle de base de la chaîne ATMO-Street) prouve que ce modèle est tout aussi performant pour les concentrations annuelles moyennes de PM10. Les concentrations annuelles moyennes de PM10 du modèle RIO ne diffèrent guère de celles du modèle ATMO-Street pour les stations indépendantes.

Les statistiques de validation temporelles basées sur les concentrations moyennes journalières de PM10 sont comparables aux statistiques de validation des concentrations moyennes annuelles de PM10. Les médianes des statistiques de validation des concentrations moyennes journalières de PM10 sont les suivantes : $MB = -0,08 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $RMSE = 2,89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $R = 0,95$. Le modèle ATMO-Street est légèrement plus performant pour les concentrations moyennes journalières de PM2.5 que pour celles de PM10.

Les statistiques de validation pour les concentrations annuelles et quotidiennes moyennes de PM10 sont très bonnes. On peut en conclure que le modèle ATMO-street est performant pour les concentrations de PM10, à l'exception des sites situés à proximité de sources d'émissions diffuses.