



# Diagnostic de vulnérabilités pour augmenter la résilience wallonne à travers l'adaptation aux changements climatiques

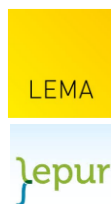
## Villes

## Exposition à la pollution atmosphérique

### Rapport méthodologique



ICEDD



Pouvoir adjudicateur :





## Auteurs

Marie DURY, ISSeP – [m.dury@issep.be](mailto:m.dury@issep.be)

## Comité de relecture

Manu Harchies - [mha@icedd.be](mailto:mha@icedd.be)

Pôle Air, ISSeP

## Personne de contact

Coraline WYARD, ISSeP – [c.wyard@issep.be](mailto:c.wyard@issep.be)

Photo de couverture : Jonas Jaeken from Unsplash

Liège, mai 2025

## Comment citer ce rapport

Dury, M., Lenartz, F. Harchies, M. & Hutsemékers, V. (2025). Diagnostic de vulnérabilités pour augmenter la résilience wallonne à travers l'adaptation aux changements climatiques - *Villes : Exposition à la pollution atmosphérique*. Rapport méthodologique. Service public de Wallonie (SPW) - Agence wallonne de l'Air et du Climat (AwAC).



## Table des matières

1. Introduction .....	4
2. Résumé .....	6
3. Définition de l'indicateur et périmètre .....	6
4. Matériel et méthode .....	7
5. Résultats .....	9
5.1. Validation .....	9
5.2. Projections futures.....	11
A. Concentrations moyennes annuelles.....	11
B. Dépassements journaliers .....	13
C. Indice BelAQI .....	14
6. Discussion .....	16
7. Annexes .....	17
7.1. Synthèses des groupes de travail.....	17
A. Sélection des scénarios climatiques MAR .....	17
B. Configuration des simulations CHIMERE .....	17
8. Références .....	17

## 1. Introduction

En Europe, la qualité de l'air est une des préoccupations majeures des dernières décennies à laquelle s'est ajoutée plus tard la lutte contre les changements climatiques. L'inventaire des différentes sources de pollution atmosphérique, leur surveillance et les mesures contraignantes prises par l'Union européenne ont permis de réduire fortement les émissions et, par conséquent, les concentrations. Les figures 1 et 2 présentent respectivement l'évolution des émissions et des concentrations en particules fines dont le diamètre est inférieur à 2,5 microns ( $PM_{2.5}$ ) et en oxydes d'azote ( $NO_x$ ) en Wallonie. Au cours des 20 dernières années, les émissions et les concentrations des polluants majeurs (dont les  $PM_{2.5}$  et le  $NO_2$ ) ont diminué de manière significative à l'échelle de la Wallonie (et dans les autres régions du pays), avec une année 2020 anormale durant laquelle les concentrations en polluants ont fortement diminué en raison des mesures COVID. Les raisons de ces diminutions sont multiples (contexte économique, renouvellement et verdissement de la flotte de véhicules, développement du télétravail, crise énergétique, conditions météorologiques plus favorables, ...). En Wallonie, les objectifs de réduction des émissions pour 2030 par rapport à 2005, définis par la directive NEC (Directive 2016/2284), sont déjà atteints pour la majorité des polluants (seuls les oxydes d'azote nécessiteront encore un effort de réduction, PACE 2030) mais une révision de cette directive est prévue pour fin 2027, avec de nouveaux objectifs pour après 2030.

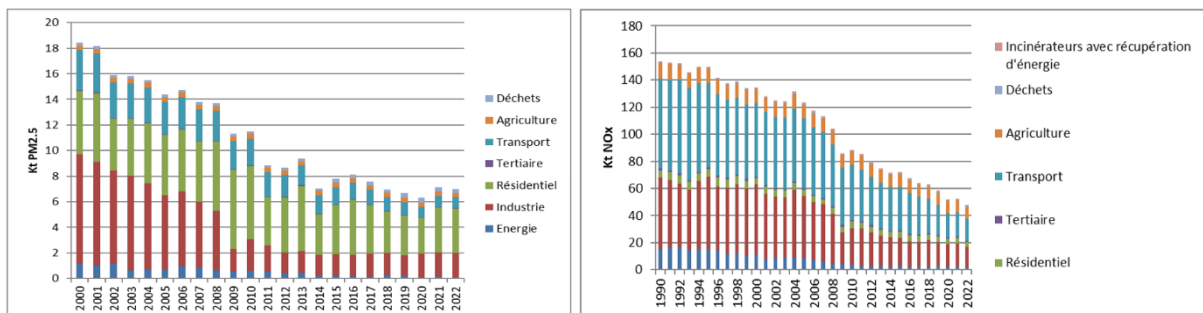


Figure 1 – Évolution des émissions de  $PM_{2.5}$  et de  $NO_x$  par source d'émissions en Wallonie (source : AWAC).

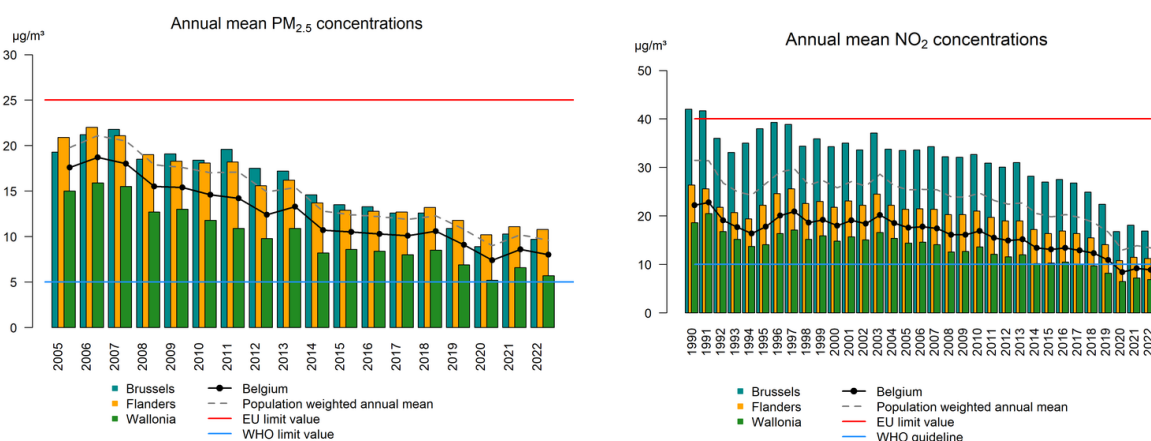


Figure 2 – Évolution des concentrations moyennes annuelles en  $PM_{2.5}$  et  $NO_2$  en Wallonie et dans les autres régions du pays sur base de la technique d'interpolation RIO (source : CELINE).

Toutefois, des épisodes de fortes pollutions continuent à être enregistrés lors d'événements météorologiques particuliers comme les inversions de température en hiver ou les vagues de chaleur en été, avec des effets directs sur la santé (maladies cardio-respiratoires) et sur les écosystèmes

(diminution de la croissance des plantes et de la biodiversité). En 2023, le nombre total de décès prématurés en Belgique dus respectivement aux particules fines (PM<sub>2.5</sub>), à l’ozone (O<sub>3</sub>) et au dioxyde d’azote (NO<sub>2</sub>) est estimé à environ 5.000, 2600 et 1300 (les décès prématurés dus au NO<sub>2</sub> et aux particules fines ne pouvant pas être simplement additionnés ; CELINE, 2023).

Des températures élevées sont souvent accompagnées d’épisodes de hautes concentrations en ozone troposphérique. Il est le produit de réactions photochimiques complexes dans lesquelles interviennent des polluants précurseurs tels que les oxydes d’azote (NO<sub>x</sub>) et les composés organiques volatils (COV). Des conditions autres que des températures élevées doivent aussi être remplies pour observer ces pics d’ozone comme un rayonnement important (beaucoup d’UV, pas de nuages) ou un vent faible. Les concentrations en particules, quant à elles, dépendent de la fréquence et de l’intensité des précipitations mais aussi de l’épaisseur de la couche de mélange qui diminue avec la stabilité de l’atmosphère. Lorsque les conditions sont stables, le mélange vertical est limité. Les niveaux de pollution sont également influencés par la vitesse et la direction des vents dominants.

En 2021, l’Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a mis à jour ses lignes directrices relatives à la qualité de l’air ambiant en abaissant les valeurs guides des principaux polluants atmosphériques. Du côté de l’Union européenne, la nouvelle Directive 2024/2881 sur la qualité de l’air ambiant est entrée en vigueur fin 2024. Les États membres devront respecter d’ici 2030 des valeurs limites qui s’alignent encore davantage sur les recommandations OMS (e.g, pour les PM<sub>2.5</sub> et le NO<sub>2</sub>, les valeurs limites annuelles passent respectivement de 25 à 10 µg/m<sup>3</sup> et de 40 à 20 µg/m<sup>3</sup>). En 2023, 33 %, 2,5 % et 64,5 % de la population wallonne, dont la majorité de la population urbaine, a été exposée à des concentrations supérieures aux seuils recommandés par l’OMS pour respectivement le NO<sub>2</sub> (10 µg/m<sup>3</sup>), les particules au diamètre inférieur à 10 microns (PM<sub>10</sub>, 15 µg/m<sup>3</sup>) et les PM<sub>2.5</sub> (5 µg/m<sup>3</sup>; ISSeP, 2023). Les variations du pourcentage de la population wallonne exposée aux PM<sub>10</sub> est affichée à la figure 3.

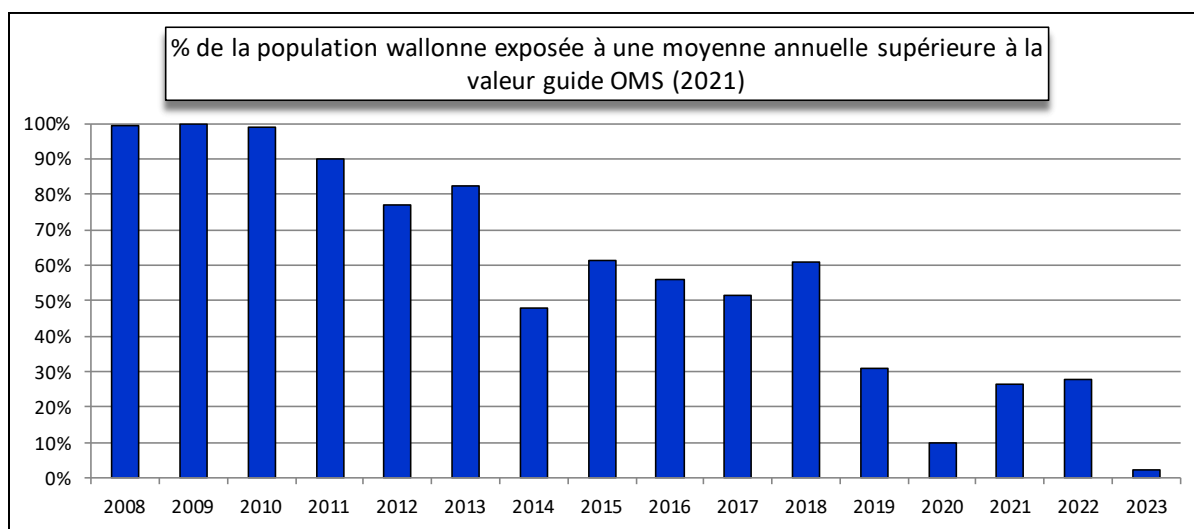


Figure 3 – Estimation de la proportion de la population wallonne exposée à une concentration en particules fines PM<sub>10</sub> supérieure à la recommandation OMS-2021 de 15 µg/m<sup>3</sup> (source : CELINE). 2023 fut une année caractérisée par des températures très exceptionnellement excédentaires et des précipitations très anormalement excédentaires en quantité.

Dans ce contexte, (ré)évaluer les impacts des changements climatiques (projetés pour le milieu du siècle) sur la pollution de l’air pour l’ensemble du territoire wallon et sur le respect des objectifs de qualité de l’air est essentiel. Ce rapport présente la méthodologie et les résultats de l’indicateur *Exposition à la pollution atmosphérique* développé pour la thématique *Villes* du *diagnostic des vulnérabilités de la Wallonie face aux changements climatiques*. Malgré le nom de la thématique, la pollution atmosphérique sera bien étudiée à l’échelle régionale.

## 2. Résumé

La cartographie des concentrations moyennes des principaux polluants dans l'air et les dépassements des valeurs seuils européennes et de l'OMS permettent d'identifier les zones les plus exposées actuellement en Wallonie : les grandes villes wallonnes et le nord du Sillon-Sambre-et-Meuse.

Dans le futur, avec le scénario climatique MPI-ESM1-2-HR, les variations dans les concentrations moyennes annuelles des quatre principaux polluants ( $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ,  $NO_2$  et  $O_3$ ) par rapport aux niveaux actuels ne sont pas très importantes (entre - 5 et 5 %) si on ne tient compte que des changements climatiques. La comparaison des scénarios à + 2 °C et + 3 °C (avec émissions anthropiques actuelles) démontre bien que la température ne peut pas expliquer seule les changements dans les niveaux de pollution futurs et que les variations d'autres variables comme les précipitations ou la stabilité de l'atmosphère peuvent être plus critiques pour la qualité de l'air. La réduction des émissions anthropiques projetée pour 2050 permettrait clairement d'améliorer la qualité de l'air dans les zones les plus peuplées et les plus exposées actuellement. Ces résultats sont bien entendu à considérer avec prudence étant donné qu'en raison du temps de calcul important, un seul le scénario climatique a été utilisé.

## 3. Définition de l'indicateur et périmètre

Les concentrations en polluants atmosphériques actuelles et celles projetées pour un scénario de réchauffement global de + 2 °C et + 3 °C par le modèle de chimie atmosphérique CHIMERE sur l'ensemble du territoire wallon définissent les cartes d'aléas d'exposition de la population à la pollution atmosphérique. Les quatre polluants majeurs dans l'air ambiant ont été étudiés : les  $PM_{10}$  (particules fines dont le diamètre est inférieur à 10 microns), les  $PM_{2.5}$  (inférieures à 2,5 microns), l'ozone ( $O_3$ ) et le dioxyde d'azote ( $NO_2$ ).

Pour identifier les zones à risque, les niveaux de concentrations en polluants sont également présentés sous la forme de l'indice BelAQI (*Belgian Airquality Index*) qui rassemble en un seul nombre représentatif les concentrations des quatre principaux polluants de l'air ambiant et qui est entièrement basé sur les effets de la pollution atmosphérique sur la santé (wallonair.be). Les concentrations simulées sont comparées aux valeurs limites européennes à respecter d'ici 2030 (UE, 2024) ainsi qu'aux lignes directrices de l'OMS 2021. La pollution atmosphérique ayant également une incidence sur les écosystèmes, des indices comme l'AOT40 pour la végétation en général et les forêts (AOT pour *accumulated dose over a threshold* correspond au cumul des doses horaires en  $O_3$  et permet d'estimer la surcharge en ozone) a aussi été calculé.

L'indice BelAQI journalier a été calculé à partir des concentrations moyennes journalières en  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$  et  $NO_2$ , et des concentrations moyennes journalières maximales sur 8 heures en  $O_3$  dans l'air ambiant. Il permet de transposer les données de la qualité de l'air (mesurées ou modélisées) en une seule évaluation qualitative compréhensible. Cet indice s'exprime suivant une échelle graduée allant de 1 à 10 ; plus la valeur de l'indice est élevée, plus la qualité de l'air est mauvaise. La valeur du sous-indice (relatif à la concentration d'un des quatre polluants) la plus élevée est attribuée à l'indice BelAQI.

Le risque lié à l'exposition à la pollution atmosphérique peut être évalué en croisant les cartes d'aléas produites dans ce volet avec l'indicateur de vulnérabilité sociale qui a été développé dans la thématique vulnérabilité sociale de ce projet.



## 4. Matériel et méthode

Les projections pour la région wallonne des concentrations en polluants futures dans un monde à +2 °C et + 3°C ont été réalisées avec le modèle de transport chimique CHIMERE (version 2020r3, Menut *et al.*, 2021) par le partenariat AwAC-CELINE-ISSeP. À partir notamment de données météorologiques et de flux d'émissions polluantes, CHIMERE permet de calculer, sur base d'équations représentant le transport et la chimie d'espèces gazeuses et particulaires, des champs tridimensionnels de concentrations en polluants dans l'atmosphère. Similairement aux simulations non prévisionnelles réalisées pour la Belgique par la Cellule Interrégionale de l'Environnement (CELINE), des projections sur la Wallonie (et la Belgique) à une résolution spatiale de 4 km ont été obtenues par un emboîtement de simulations (*nesting* en anglais) : une première simulation sur l'Europe de l'Ouest (32 km de résolution, domaine RIOCHIM32) et une deuxième simulation sur un domaine couvrant la Belgique et le Luxembourg (4 km, domaine RIOCHIM4). Le plus petit domaine de simulation est forcé par le plus grand avec un domaine européen dont les conditions aux limites sont fournies par défaut dans CHIMERE.

La température et les autres variables météorologiques utilisées comme données d'entrée dans le modèle de dispersion de la pollution atmosphérique sont simulées avec le modèle atmosphérique régional MAR développé par le Laboratoire de Climatologie de l'Université de Liège (Wyard *et al.*, 2018). Pour la validation du modèle CHIMERE, les sorties du MAR forcé à ses frontières par les réanalyses ECMWF ERA5 ont été utilisées (période 2014-2023). Pour simuler l'évolution future des niveaux de pollution, les sorties du MAR forcé par le scénario climatique global MPI-ESM1-2-HR, pour le présent (2011-2020) et, un monde à +2 °C (période 2046-2055) et + 3°C (période 2076-2085), sous le scénario d'émissions SSP3-7.0, ont été choisis. Les champs 3D du MAR à 32 km et 4 km (22 niveaux verticaux) alimentent les simulations CHIMERE sur les domaines RIOCHIM32 et RIOCHIM4. C'est le temps de calcul important qui a limité l'analyse au seul scénario MPI-ESM1-2-HR, modèle qui représente le mieux le climat présent et qui a une très bonne sensibilité climatique selon le GIEC (rapport méthodologique détaillé du volet 2 de l'étude, Fettweis *et al.*, 2024).

Les émissions anthropiques estimées dans le projet Interreg TransfAIR (<https://www.transfair-interreg.eu/>) pour les deux domaines RIOCHIM32 et RIOCHIM4 ont été utilisées pour la période actuelle (figure 4). Pour le futur, c'est le scénario d'émissions Clean Air Outlook 3 pour 2050 et la Belgique qui a été appliqué (tableau 1). Régulièrement, la Commission Européenne publie en effet des rapports sur les perspectives en matière de qualité de l'air qui évaluent dans quelle mesure les obligations de réduction des émissions prévues par la directive NEC seraient respectées dans le cadre de différents scénarios politiques dans l'UE d'ici à 2030 et au-delà. Il a une révision de cette directive prévue pour fin 2027, avec de nouveaux objectifs après 2030 mais, actuellement, il n'y a pas d'objectifs contraignants pour 2050, juste un « souhait » européen, le « *zero pollution action plan* ». Les projections du CAO3 sont donc basées sur un scénario BAU (*Business as usual*) qui prend en compte les mesures actuelles et celles déjà « signées » (e.g., l'arrêt de la vente des véhicules thermiques en 2035, la révision du système d'échange de quotas d'émission, ...) mais sans nouveaux objectifs à atteindre. Les émissions biogéniques pour l'actuel et le futur sont simulées par le modèle d'émissions MEGAN qui est couplé au modèle CHIMERE (Bauwens *et al.*, 2018).

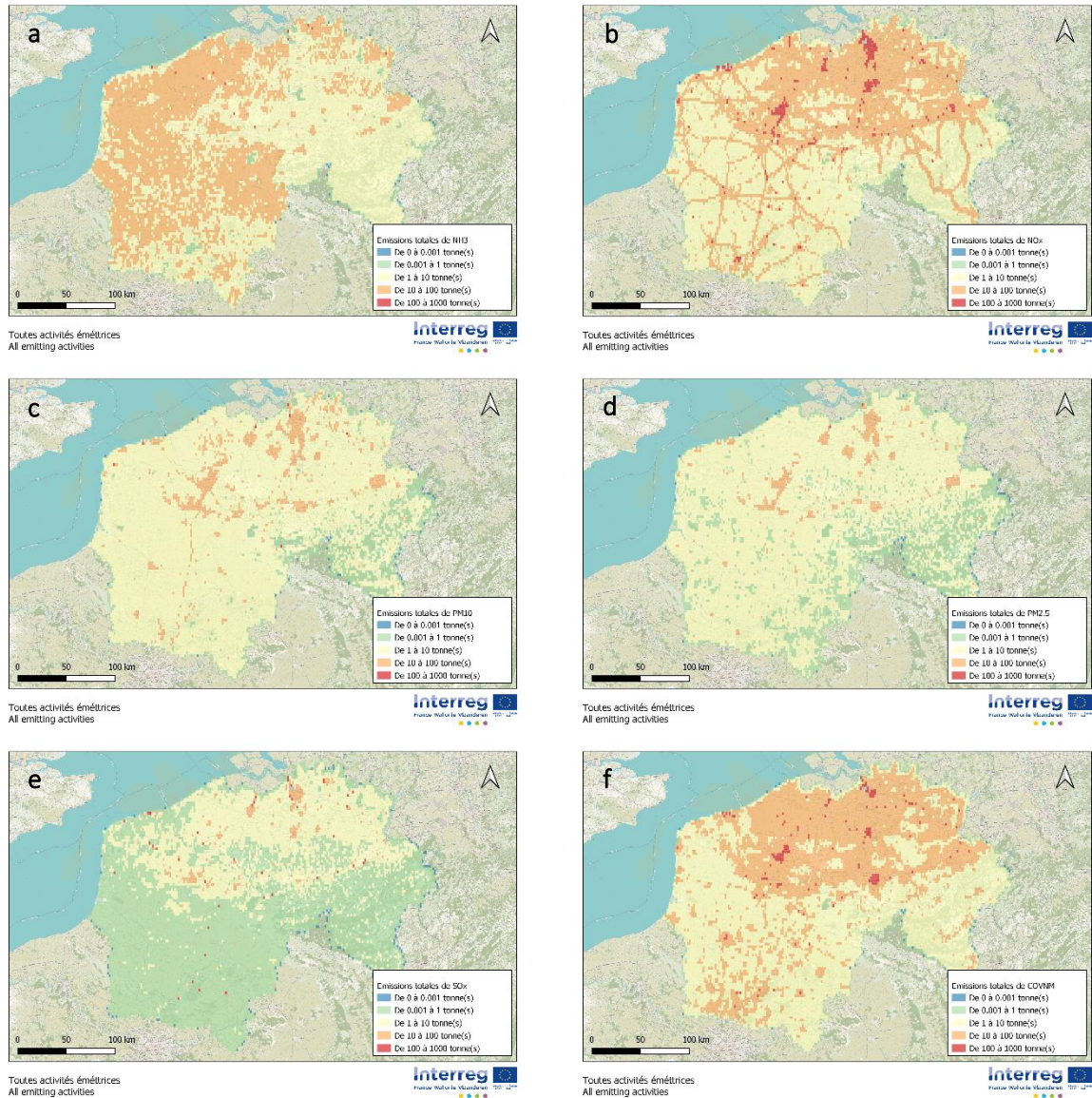


Figure 4 – Émissions totales annuelles (en tonnes) de (a)  $\text{NH}_3$ , (b)  $\text{NO}_x$ , (c)  $\text{PM}_{10}$ , (d)  $\text{PM}_{2.5}$ , (e)  $\text{SO}_x$  et (f) COVNM sur le domaine EMAP5 (Belgique et région Hauts-de-France), projet Interreg TransfAIR).

Tableau 1. Évolution des émissions BE dans le scénario de référence Clean Air Outlook 3 (CE, 2022).

Polluants	Émissions 2015 (kt)	Émissions 2020 (kt)	Émissions 2050 (kt)	% de réduction en 2050
$\text{NH}_3$	68.24	69.10	57.34	-16.50
$\text{NO}_x$	205.53	142.95	76.13	-56.31
$\text{PM}_{10}$	33.87	29.00	22.58	-28.17
$\text{PM}_{2.5}$	22.94	19.17	11.18	-46.90
$\text{SO}_2$	40.88	29.72	26.56	-24.76
COVNM	116.57	105.43	82.15	-25.99

Ce sont uniquement les anomalies entre concentrations en polluants projetées par le modèle CHIMERE (forcé par les sorties MAR-MPI) pour le présent et le futur qui sont utilisées et combinées à une cartographie de référence des concentrations actuelles. Les cartes de référence sont obtenues par la

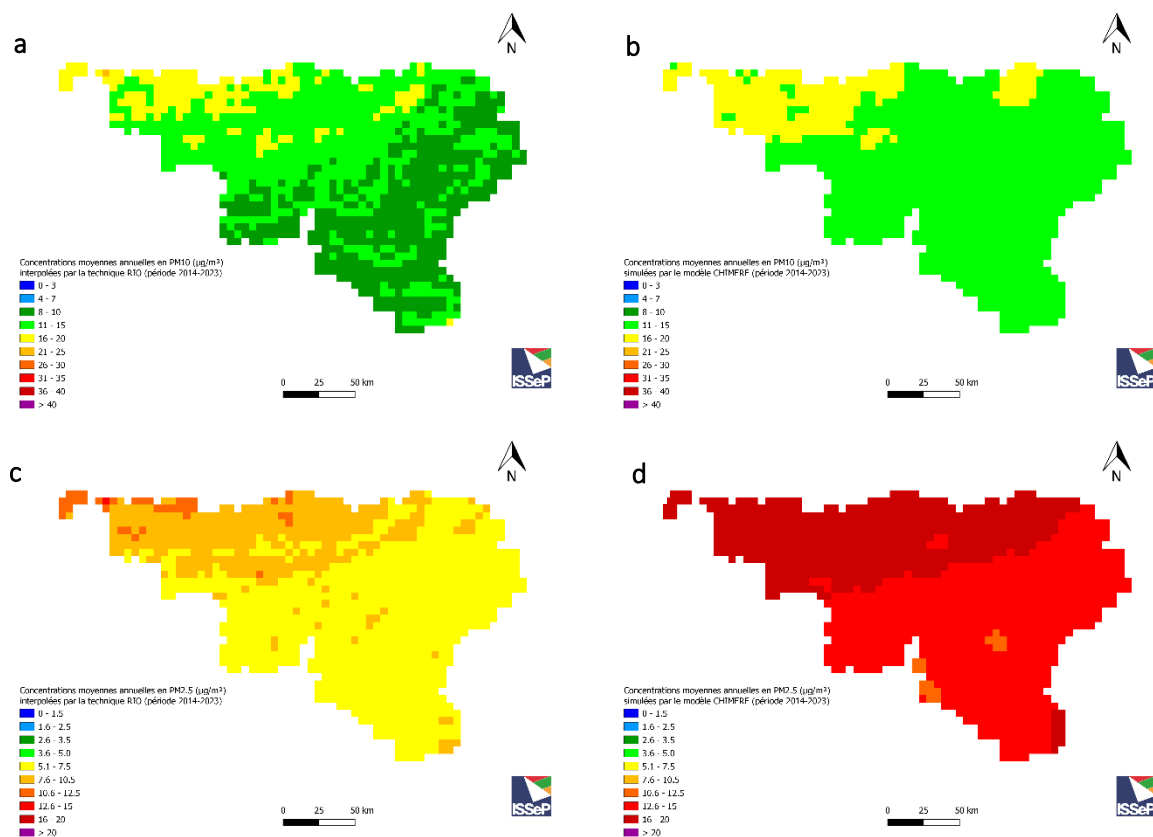


technique d'interpolation RIO qui utilise les données du réseau de stations de mesure et les interpole de manière « intelligente » sur une grille régulière de 4 km (en tenant compte notamment de l'occupation du sol ; irceline.be). La capacité du modèle CHIMERE (avec une météo MAR-ERA5) à reproduire les niveaux de pollution actuels (*e.g.*, concentrations moyennes, variations spatiotemporelles, ...) a été évaluée à l'aide des stations du réseau télémétrique géré par l'ISSeP.

## 5. Résultats

### 5.1. Validation

Les projections des concentrations moyennes annuelles, calculées pour la période de référence 2014-2023, ont été simulées avec le modèle CHIMERE forcé par les sorties MAR-ERA5 et comparées aux cartographies de référence pour la même période, obtenues par la technique d'interpolation RIO (*cfr* section matériel et méthode; figure 5). Les concentrations en  $PM_{2.5}$  (et dans une moindre mesure en  $PM_{10}$ ) sont surestimées par rapport aux observations interpolées. Selon CELINE, c'est un problème connu de la version 2020r3 du modèle CHIMERE ; ces concentrations sont nettement moins surestimées avec la version 2023. Les concentrations en ozone sont également surestimées. Pour rappel, ces biais ne portent pas à conséquence car ce sont les interpolations RIO (figures 5a,c,e,g) qui sont prises comme référence pour la période actuelle et seules les anomalies entre concentrations futures et présentes (projetées par le modèle CHIMERE forcé par les sorties MAR-MPI) sont utilisées et combinées aux cartes RIO.



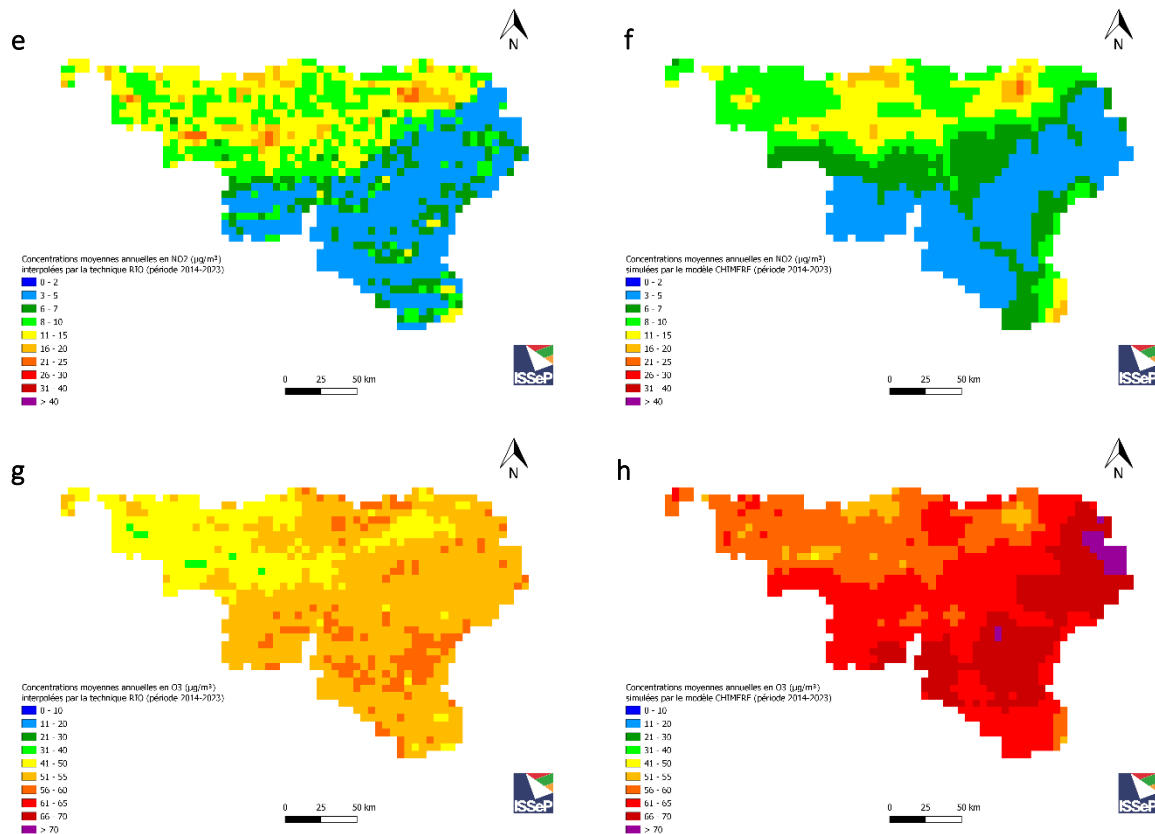


Figure 5 – Concentrations moyennes annuelles des quatre principaux polluants atmosphériques interpolées par la technique RIO et simulées avec le modèle CHIMERE : (a,b)  $PM_{10}$  (particules fines dont le diamètre est inférieur à 10 microns), (c,d) les  $PM_{2.5}$  (inférieures à 2,5 microns), (e,f) le dioxyde d’azote ( $NO_2$ ) et (g,h) l’ozone ( $O_3$ ).

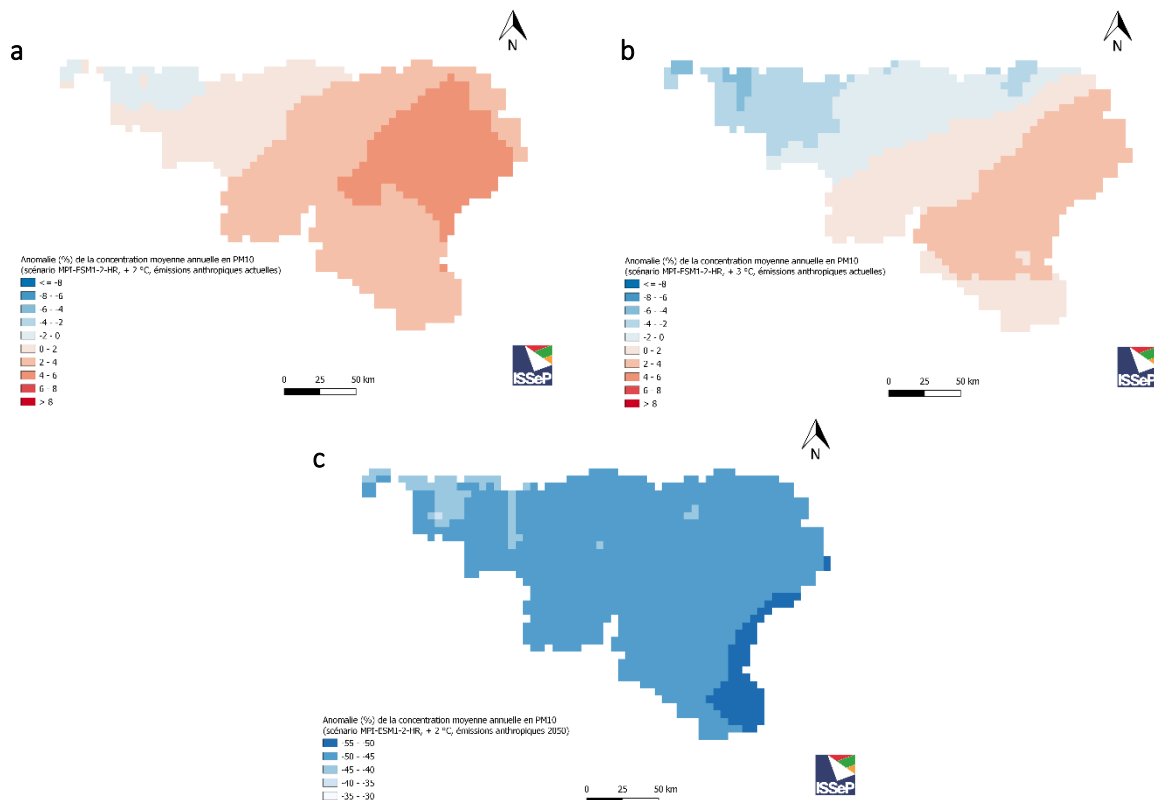
Ces cartes des concentrations moyennes annuelles pour la période 2014-2023 permettent d’identifier les zones qui enregistrent encore des dépassements des valeurs seuils annuelles. La valeur limite européenne 2030 pour les  $PM_{10}$  ( $20 \mu g/m^3$ ) n’est dépassée qu’à un seul point de la grille correspondant à la région de Mouscron. La valeur guide OMS ( $15 \mu g/m^3$ ) est quant à elle encore dépassée dans les grandes villes du Sillon-Sambre-et-Meuse et dans les régions limitrophes de la Flandre. Pour les  $PM_{2.5}$ , si la valeur limite 2030 ( $10 \mu g/m^3$ ) est en voie d’être respectée (depuis 2019, cette valeur n’est plus dépassée dans la plupart des stations de mesure ; ISSeP, 2024), les valeurs moyennes des concentrations sur la période 2014-2023 dépassent la valeur OMS de  $5 \mu g/m^3$  sur l’ensemble du territoire wallon. En ce qui concerne le  $NO_2$ , la valeur de  $20 \mu g/m^3$  de la directive européenne n’est dépassée que dans les grandes villes mais, beaucoup de zones situées au nord du Sillon-Sambre-et-Meuse dépassent la valeur guide OMS de  $10 \mu g/m^3$ . Pour l’ozone, il n’y a pas de valeur limite annuelle européenne, uniquement des seuils journaliers à respecter (*cfr* section 5.2.B). Dans les recommandations OMS, il y a par contre une valeur guide pour la haute saison en ozone (*peak season*, qui correspond aux six mois consécutifs où la concentration moyenne mobile en  $O_3$  sur six mois est la plus élevée). La moyenne du maximum journalier de la concentration moyenne de  $O_3$  sur 8 heures sur la *peak season* ne peut dépasser  $60 \mu g/m^3$ . Cette valeur guide est dépassée partout en Wallonie (figure 7a).

## 5.2. Projections futures

### A. Concentrations moyennes annuelles

La figure 6 présente les anomalies pour les concentrations moyennes annuelles en  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  et  $NO_2$  (et durant la haute saison pour les concentrations en  $O_3$ ) entre le futur et le présent pour trois scénarios : + 2 °C et émissions polluantes anthropiques actuelles, + 3 °C et émissions anthropiques actuelles et + 2 °C et scénario de réduction des émissions anthropiques projetée pour 2050. Les horizons à + 2 °C et + 3 °C correspondent respectivement aux périodes 2046-2055 et 2076-2085 du scénario MAR-MPI SSP3-7.0. Ce sont des anomalies de + 0.67 °C et + 1.35 °C par rapport à la période 2011-2020 du scénario MAR-MPI. En ne prenant en compte que les changements climatiques projetés (émissions polluantes actuelles, figures 6a,b,d,e,g,h), les variations des niveaux de pollution par rapport à l'actuel ne sont pas très importantes avec des anomalies de  $\pm 3 \mu g/m^3$  ( $\pm 5\%$  en relatif). Pour les particules fines et le dioxyde d'azote, on observe un gradient NO-SE dans les variations projetées par CHIMERE pour le monde à + 2 °C et + 3 °C, qui s'explique par la hauteur de la couche limite atmosphérique (partie de l'atmosphère directement influencée par l'interaction avec la surface terrestre d'une hauteur moyenne de 1 à 2 km) qui diminue et cela plus fortement au Sud-Est. Une couche limite atmosphérique moins épaisse favorise l'accumulation des polluants à proximité du sol car la dispersion verticale et donc la dilution des polluants sont moins importantes.

Quand on inclut le scénario de réduction des émissions polluantes, le modèle CHIMERE simule des diminutions importantes des concentrations (figures 6c,f,i). Par exemple, des diminutions de plus de 65 % des concentrations en  $NO_2$  sont simulées dans les grandes villes et axes routiers. Effectivement, la réduction des émissions de  $NO_x$  la plus importante concerne le transport routier qui est surtout concentré sur les grands centres urbains. On passe d'émissions  $NO_x$  pour le transport routier en Belgique de 70.9 kt à des émissions de 0.7 kt en 2050. La combinaison du scénario climatique + 3 °C et du scénario de réduction des émissions anthropiques projetée pour 2050 est très proche du scénario + 2 °C avec émissions 2050 et n'est donc pas présenté ici.



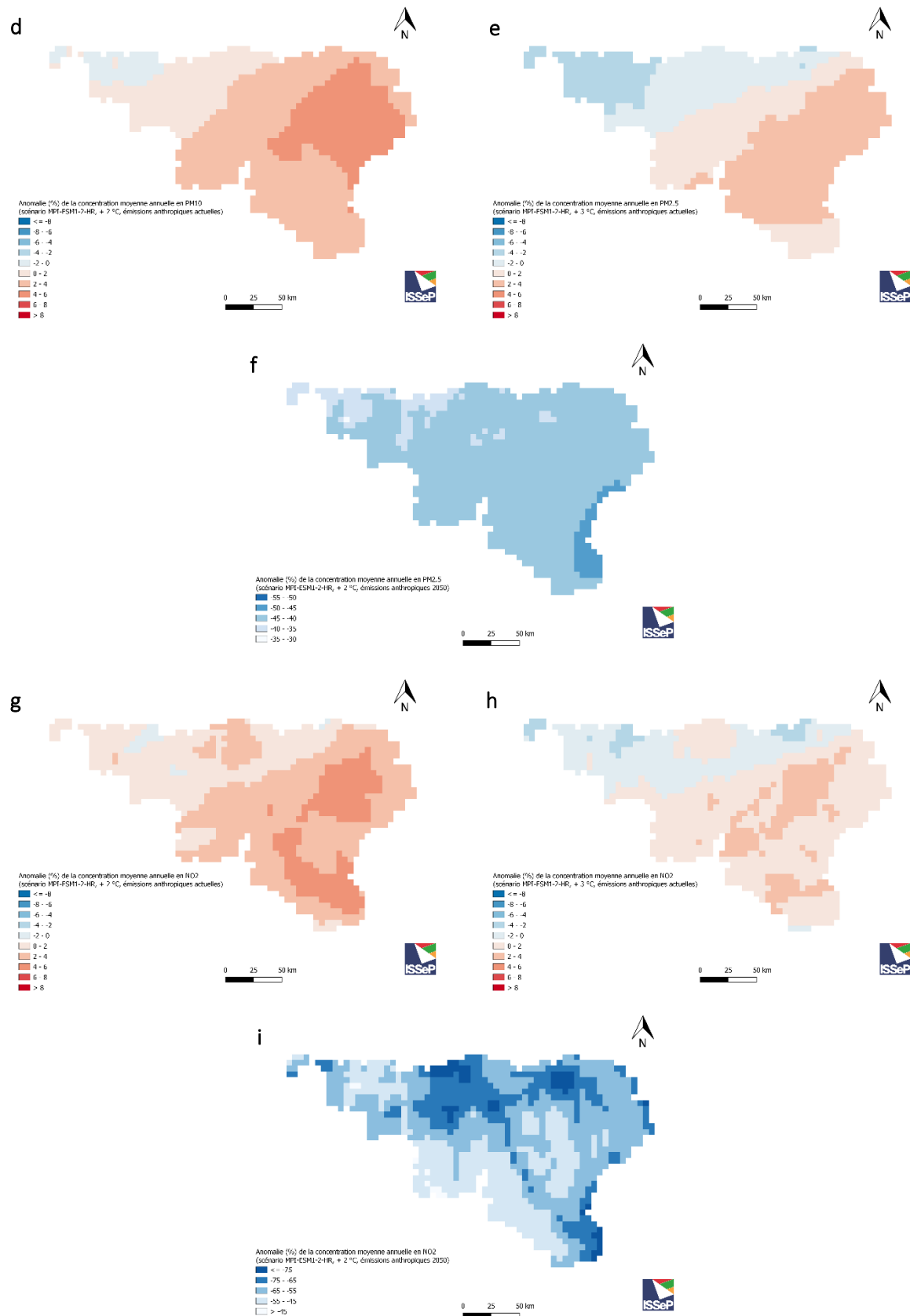


Figure 6 – Variations des niveaux de pollution pour les PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> et NO<sub>2</sub> projetées suivant différents scénarios (a,d,g) + 2 °C et émissions polluantes anthropiques actuelles, (b,e,h) + 3 °C et émissions anthropiques actuelles et (c,f,i) + 2 °C et scénario de réduction des émissions anthropiques pour 2050.



Pour l’ozone, durant la haute saison (avril à septembre), les concentrations ne varient pas beaucoup dans le scénario + 2 °C (figure 7). Dans le scénario + 3 °C, les concentrations en ozone augmentent légèrement de 1 à 2 %. N’oublions pas que les fortes concentrations en ozone ne sont pas dues à une température élevée mais que ces deux paramètres dépendent directement d’un même facteur, l’ensoleillement, qui augmente peu en été et diminue au printemps dans le scénario MAR-MPI. En 2003, l’épisode de pollution intense en ozone durant la première quinzaine d’août avait été causé par un ensoleillement remarquable (25 % supérieur à la normale). L’ozone est un polluant secondaire, formé par réactions photochimiques, mais la réduction des émissions des polluants précurseurs d’ozone a un impact sur ses concentrations (figure 7d).

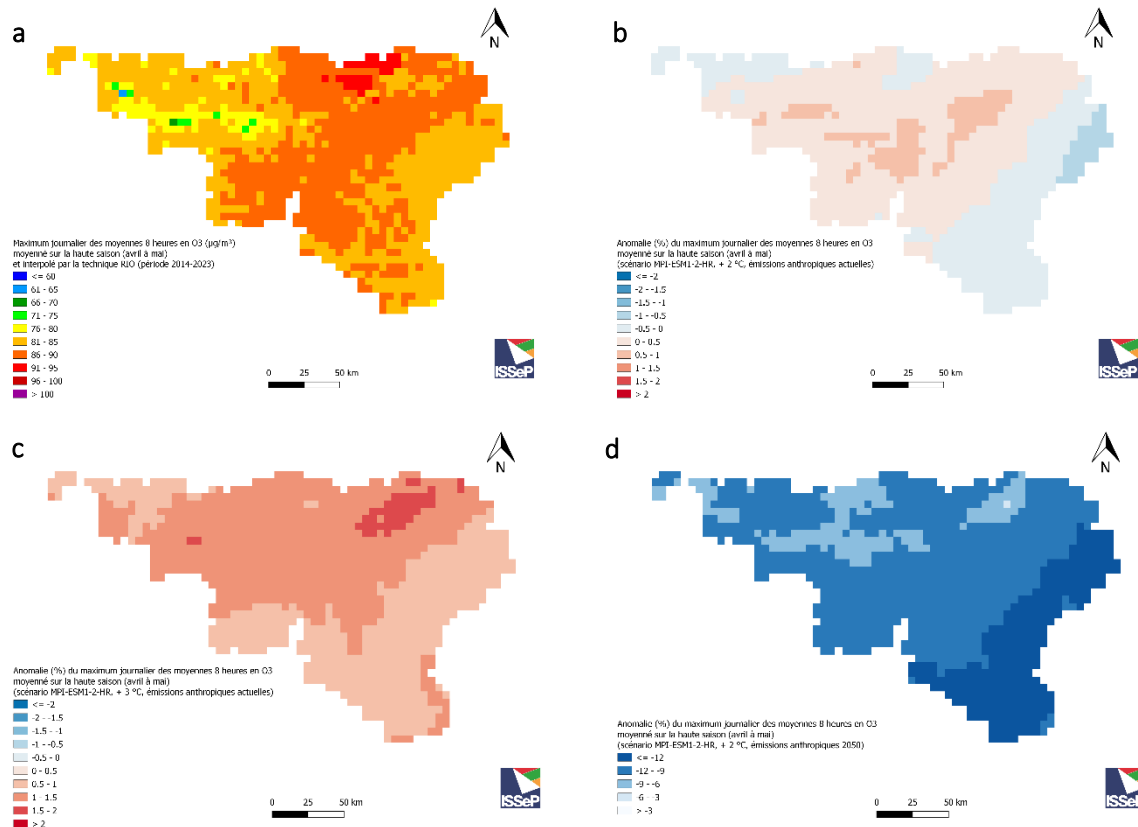


Figure 7 – Maximum journalier de la concentration moyenne de O<sub>3</sub> sur 8 heures moyenné sur la peak season (a) et variations de cet indicateur projetées suivant différents scénarios (b) + 2 °C et émissions polluantes anthropiques actuelles, (c) + 3 °C et émissions anthropiques actuelles et (d) + 2 °C et scénario de réduction des émissions anthropiques pour 2050.

### B. Dépassements journaliers

Quant aux dépassements journaliers, nous n’avons considéré que le dépassement des valeurs guides de l’OMS (qui seront certainement celles à respecter à long terme). Pour l’OMS, on ne peut pas avoir plus de trois à quatre dépassements journaliers par an. Actuellement, le nombre de dépassements de la valeur de 15 µg/m<sup>3</sup> est supérieur à quatre sur tout le territoire wallon pour les PM<sub>2.5</sub> (pour les PM<sub>10</sub>, on dépasse les quatre jours au-dessus de 45 µg/m<sup>3</sup> au niveau des grandes villes et dans la région limitrophe de la Flandre). La valeur guide de 25 µg/m<sup>3</sup> pour les concentrations moyennes journalières en NO<sub>2</sub> est aussi dépassée plus de quatre jours par an au nord du Sillon-Sambre-et-Meuse. Pour l’ozone, l’objectif à long terme est de ne pas dépasser plus de trois jours par an les 100 µg/m<sup>3</sup>. À l’heure actuelle, ce nombre est largement dépassé partout en Wallonie.

Par contre, les scénarios futurs envisagés (sans réduction des émissions) ne projettent pas de variations importantes du nombre de dépassements journaliers (± 5 jours) pour aucun des quatre polluants étudiés.

### C. Indice BelAQI

La figure 8 montre le nombre de jours par an (toujours moyenné sur la période 2014-2023) avec un indice BelAQI journalier inférieur ou égal à 3 (qualité de l'air bonne à excellente) et les variations de ce nombre de jours suivant différents scénarios : + 2 °C et émissions polluantes anthropiques actuelles, + 3 °C et émissions anthropiques actuelles et + 2 °C et scénario de réduction des émissions anthropiques projetée pour 2050. La figure 9 montre elle le nombre de jours par an (pour la période 2014-2023) avec un indice BelAQI journalier supérieur ou égal à 6 (qualité de l'air médiocre à exécable) et les variations de ce nombre de jours pour les mêmes scénarios. Conformément à l'évolution projetée des concentrations des quatre principaux polluants pour le futur avec le scénario MAR-MPI, le nombre de journées avec une bonne qualité de l'air pourrait augmenter légèrement dans les zones les plus polluées et diminuer faiblement dans les zones les moins exposées actuellement à la pollution atmosphérique. Similairement, un certain lissage régional est aussi simulé pour le nombre de journées avec une qualité de l'air insuffisante : moins de mauvaises journées à l'ouest et plus à l'est et au sud de la région. Selon le modèle, si on continue à diminuer les émissions polluantes anthropiques, le nombre de bonnes et de mauvaises journées en termes de qualité de l'air devraient respectivement augmenter et diminuer malgré les changements climatiques projetés par le modèle MAR-MPI (figures 8d et 9d).

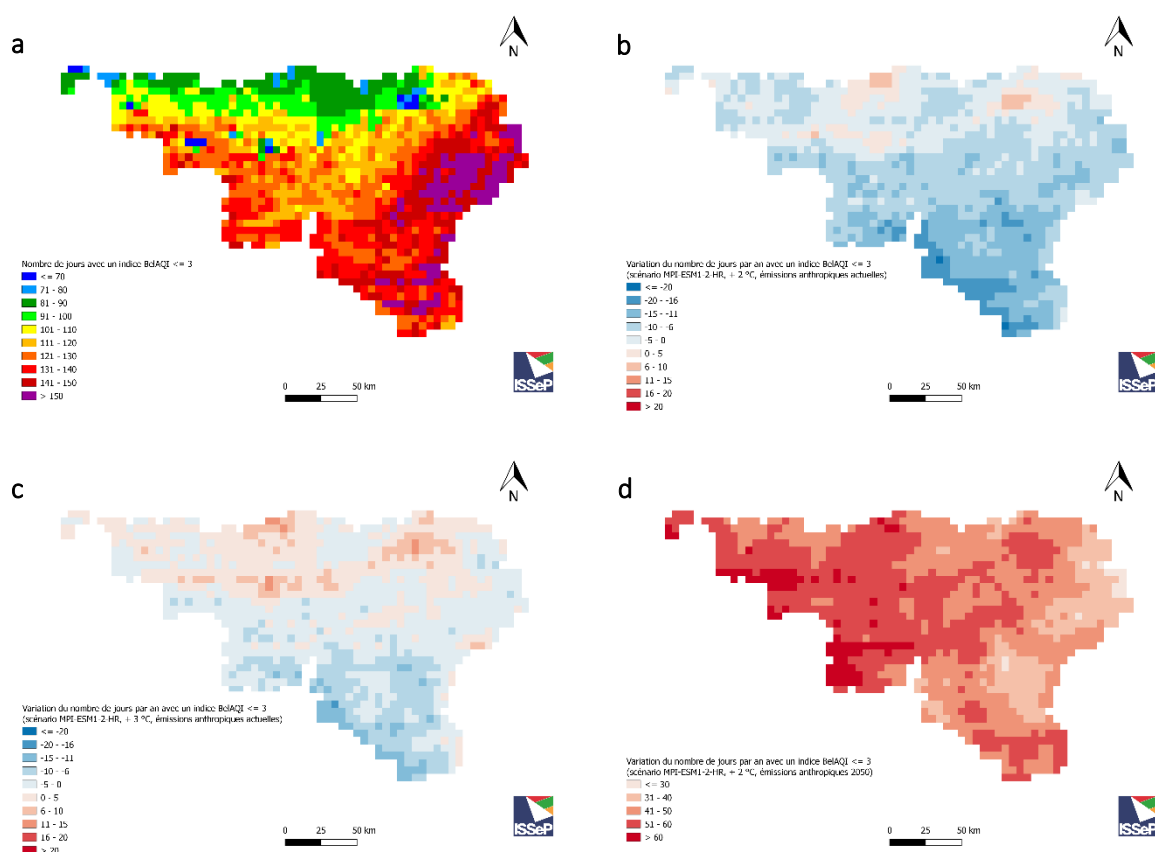


Figure 8 - Nombre de jours par an avec un indice BelAQI journalier inférieur ou égal à 3 (qualité de l'air bonne à excellente) pour (a) la période actuelle (2014-2023) et variations de ce nombre de jours suivant différents scénarios (b) + 2 °C et émissions polluantes anthropiques actuelles, (c) + 3 °C et émissions anthropiques actuelles et (d) + 2 °C et scénario de réduction des émissions anthropiques pour 2050.

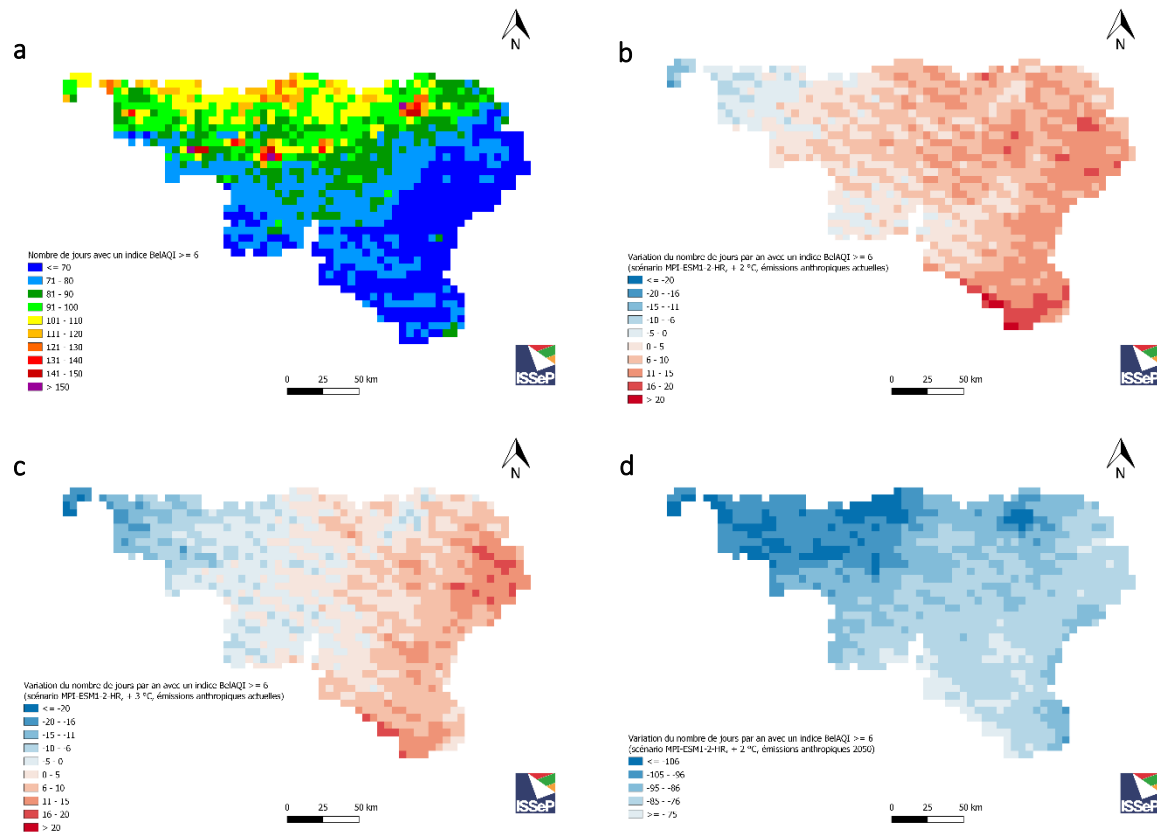
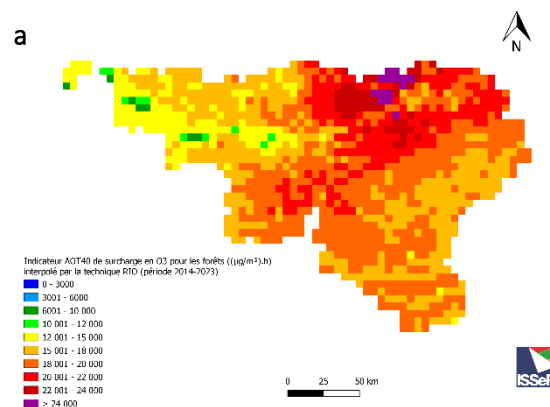


Figure 9 - Nombre de jours par an avec un indice BelAQI journalier supérieur ou égal à 6 (qualité de l'air médiocre à exécration) pour (a) la période actuelle (2014-2023) et variations de ce nombre de jours suivant différents scénarios (b) + 2 °C et émissions polluantes anthropiques actuelles, (c) + 3 °C et émissions anthropiques actuelles et (d) + 2 °C et scénario de réduction des émissions anthropiques pour 2050.

L'AOT40-forêt (*Accumulated Ozone exposure over a Threshold of 40 ppb* ( $= 80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )) est un indicateur de surcharge en ozone pour la protection des forêts, défini par l'OMS. Il est calculé en additionnant les excédents par rapport à la norme de  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de toutes les valeurs horaires entre 8h et 20h CET (heure de l'Europe centrale) durant les mois d'avril à septembre. La valeur cible européenne est de 20 000 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).h, en moyenne sur 5 ans. La figure 10 présente les valeurs moyennes de l'AOT40-forêt pour les années 2014 à 2023 et les variations de cet indicateur suivant des scénarios de réchauffement global de + 2 °C ou + 3 °C et des émissions polluantes anthropiques actuelles. Actuellement, quasiment la totalité des forêts sont exposées à des niveaux d'ozone supérieurs au niveau critique de l'UNECE de 10 000 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).h.



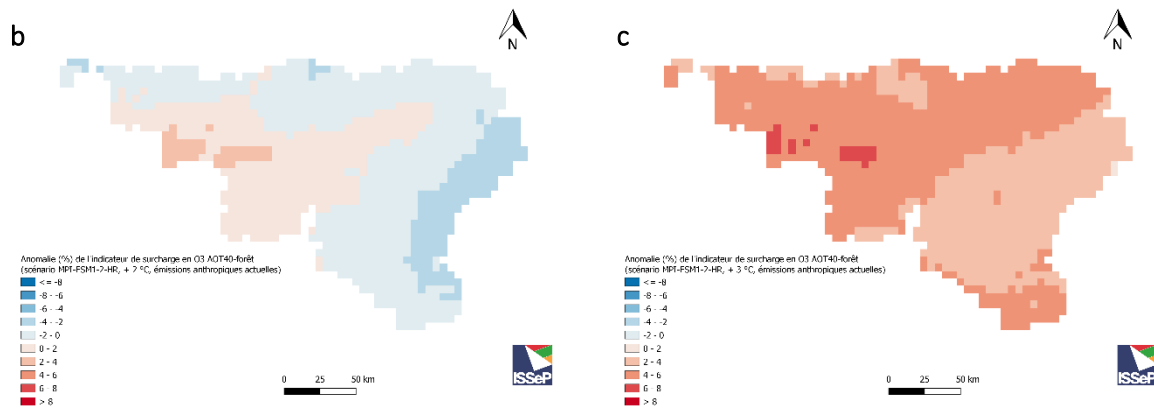


Figure 10 - Indicateur de surcharge en O<sub>3</sub> pour la protection des forêts (AOT40-forêt) pour (a) la période actuelle (2014-2023) et variation (%) de cet indicateur suivant des scénarios de réchauffement global de (b) + 2 °C ou (c) + 3 °C et des émissions polluantes anthropiques actuelles.

## 6. Discussion

Les conclusions que l'on peut tirer de ces résultats sont à considérer avec prudence étant donné que nous n'avons utilisé les sorties du MAR forcé qu'avec un seul scénario climatique global (le scénario MPI-ESM1-HR SSP3-7.0 qui projette un monde à +2 °C et +3 °C) en raison du temps de calcul très important. Selon Fettweis *et al.* (2024), le modèle MAR-MPI est le meilleur modèle sur le climat présent.

Les variations des niveaux de pollution par rapport à l'actuel projetées avec le scénario MPI-ESM1-HR SSP3-7.0 ne sont pas très importantes. Pour les concentrations moyennes annuelles (uniquement la belle saison pour l'ozone), les anomalies simulées, qu'elles soient positives ou négatives, ne dépassent pas les 3 µg/m<sup>3</sup> (± 5 % en relatif). Le nombre de dépassements journaliers par an ne varie pas beaucoup non plus quel que soit le polluant (± 5 jours). Cependant, soulignons que le scénario climatique MAR-MPI n'est pas le plus inquiétant.

Dans cette étude, l'évaluation des risques climatiques sur le territoire wallon a été menée par degré de réchauffement mais la température n'est pas la variable la plus critique pour la qualité de l'air. D'autres variables comme les précipitations ou la stabilité de l'atmosphère ont un impact plus important sur les particules fines et les oxydes d'azote. Notons que les changements dans les quantités de précipitations projetés par le modèle MAR-MPI-ESM1-HR sont peu ou pas significatifs.

Par contre, **si on prend aussi en compte un scénario de réduction des émissions pour l'horizon 2050, le modèle projette de fortes diminutions des concentrations.** En Wallonie, les objectifs de réduction des émissions pour 2030, définis par la directive NEC, sont déjà atteints pour la majorité des polluants. Pour poursuivre dans cette direction, une révision de la directive NEC est prévue pour fin 2027, avec de nouveaux objectifs pour après 2030.

Cette étude ne s'est pas limitée aux villes mais a exploré l'exposition à la pollution actuelle et future à l'échelle régionale à une résolution spatiale de 4 km. La cartographie des concentrations moyennes des principaux polluants dans l'air et les dépassements des valeurs seuils européennes et de l'OMS permettent d'identifier les **zones à risque les plus exposées actuellement en Wallonie : les grandes villes wallonnes et le nord du Sillon-Sambre-et-Meuse**. Cet exercice est une étape incontournable si une analyse devait être menée à une résolution encore plus fine, au niveau d'une grande ville.





## 7. Annexes

### 7.1. Synthèses des groupes de travail

#### A. Sélection des scénarios climatiques MAR

La modélisation de la dispersion des polluants atmosphériques nécessite des projections climatiques sur des champs 3D et non pas seulement 2D comme pour les autres thématiques du projet. Une collaboration entre l'équipe ISSeP et le Laboratoire de Climatologie (ULiège) existe toutefois aussi dans le cadre du projet ReCOVeR pour lequel des champs 3D sont également nécessaires. Après discussion avec Xavier Fettweis, des projections MAR seront réalisées à partir du modèle MPI-ESM-2-HR sous le scénario SSP370. Étant donné le temps de calcul, seul ce scénario, également utilisé dans les autres thématiques, sera envisagé pour des horizons à +2 °C et +3 °C.

#### B. Configuration des simulations CHIMERE

Les simulations avec le modèle CHIMERE sont réalisées par le partenariat AwAC-CELINE-ISSeP. Ces partenaires ont l'habitude d'échanger dans le cadre d'un groupe de travail Modélisation.

## 8. Références

- AwAC. <https://awac.be/inventaires-demission/>
- Bauwens, M., Stavrou, T., Müller, J.-F., Van Schaeybroeck, B., De Cruz, L., De Troch, R., Giot, O., Hamdi, R., Termonia, P., Laffineur, Q., Amelynck, C., Schoon, N., Heinesch, B., Holst, T., Arneht, A., Ceulemans, R., Sanchez-Lorenzo, A., & Guenther, A. (2018). Recent past (1979-2014) and future (2070-2099) isoprene fluxes over Europe simulated with the MEGAN-MOHYCAN model. *Biogeosciences*, 15, 3673–3690, <https://doi.org/10.5194/bg-15-3673-2018>
- CELINE. <https://www.irceline.be/fr>
- CELINE (2023). Impact van luchtkwaliteit op gezondheid in België. 20 p.
- Fettweis, X. Denis, T. Fiol, L. Harchies, M. (2024). Actualisation des projections climatiques sur la Wallonie à l'aide du modèle régional MAR forcé par les données les plus récentes (CMIP6) de 6 modèles climatiques globaux selon les scénarios SSP370 et SSP585. Service Public de Wallonie (SPW) - Agence Wallonne de l'Air et du Climat (AwAC).
- Irceline.be. <https://www.irceline.be/fr/documentation/modeles/rio-ifdm>
- ISSeP et AwAC. « Réseaux de surveillance de la Qualité de l'Air – Rapports annuels »
- Menut, L., Bessagnet, B., Briant, R., Cholakian, A., Couvidat, F., Mailler, S., Pennel, R., Siour, G., Tuccella, P., Turquety, S., & Valari, M. (2021). The CHIMERE v2020r1 online chemistry-transport model. *Geoscientific Model Development*, 14(11), 6781–6811. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-6781-2021>
- Plain Air Climat Énergie 2030 (2023). <https://energie.wallonie.be/fr/21-03-2023-plan-air-climat-energie-2030.html?IDD=168395&IDC=8187>
- UE (2016). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=CELEX%3A32016L2284>
- UE (2024). <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/2881/oj/eng>
- Wallonair. <https://www.wallonair.be/fr/en-savoir-plus/indice-de-la-qualite-de-l-air.html>
- Wyard, C., Doutreloup, S., Belleflamme, A., Wild, M., & Fettweis, X. (2018). Global Radiative Flux and Cloudiness Variability for the Period 1959–2010 in Belgium: A Comparison between Reanalyses and the Regional Climate Model MAR. *Atmosphere. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 9(7): 262. <https://doi.org/10.3390/atmos9070262>



## **Institut de Conseil et d'Etudes en Développement Durable asbl**

Boulevard Frère Orban 4  
B-5000 NAMUR  
00 32 81 25 04 80  
[www.icedd.be](http://www.icedd.be)  
[icedd@icedd.be](mailto:icedd@icedd.be)

N° registre de commerce : sans objet  
N° TVA : BE0407.573.214  
Représenté par : Gauthier Keutgen, Secrétaire Général  
N° de compte bancaire : BE59 5230 4208 3426 / BIC TRIOBEBB