

Votre observatoire régional de la

QUALITÉ de l'AIR

**RAPPORT
D'ÉVALUATION
2019**

Septembre 2020

**Évaluation de l'impact
de la mise en service
de lignes de bus Linéo
sur l'Agglomération
Toulousaine**

CONDITIONS DE DIFFUSION

Atmo Occitanie, est une association de type loi 1901 agréée par le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable des Transports et du Logement (décret 98-361 du 6 mai 1998) pour assurer la surveillance de la qualité de l'air sur le territoire de l'Occitanie. Atmo Occitanie fait partie de la fédération ATMO France.

Ses missions s'exercent dans le cadre de la loi sur l'air du 30 décembre 1996. La structure agit dans l'esprit de la charte de l'environnement de 2004 adossée à la constitution de l'État français et de l'article L.220-1 du Code de l'environnement. Elle gère un observatoire environnemental relatif à l'air et à la pollution atmosphérique au sens de l'article L.220-2 du Code de l'Environnement.

Atmo Occitanie met à disposition les informations issues de ses différentes études et garantit la transparence de l'information sur le résultat de ses travaux. A ce titre, les rapports d'études sont librement accessibles sur le site : <http://atmo-occitanie.org/>

Les données contenues dans ce document restent la propriété intellectuelle d'**Atmo Occitanie**.

Toute utilisation partielle ou totale de données ou d'un document (extrait de texte, graphiques, tableaux, ...) doit obligatoirement faire référence à **Atmo Occitanie**.

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

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

En cas de remarques sur les informations ou leurs conditions d'utilisation, prenez contact avec **Atmo Occitanie – Agence Toulouse** :

- par mail : contact@atmo-occitanie.org
- par téléphone : 09.69.36.89.53 (N° CRISTAL – Appel non surtaxé)

| | |
|---|----|
| CONTEXTE ET OBJECTIFS..... | 3 |
| Présentation du réseau de bus Linéo | 3 |
| Hypothèses de travail..... | 3 |
| IMPACT DES LIGNES LINÉO SUR LES ÉMISSIONS ATMOSPHÉRIQUES ET LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE..... | 5 |
| Hausse du nombre de kilomètres parcourus mais baisse des émissions de polluants..... | 5 |
| Hausse de consommation énergétique en lien avec l'augmentation du nombre de kilomètres..... | 6 |
| Impact variable sur les émissions de polluants selon la ligne de bus | 6 |
| Baisse des émissions par passager sur l'ensemble des lignes de bus | 7 |
| Le passager d'un bus émet moins qu'une personne utilisant son véhicule particulier | 8 |
| Un réseau LINÉO globalement favorable en termes d'émissions de polluants atmosphériques | 8 |
| IMPACT DE LA MISE EN SERVICE DES CINQ LIGNES LINÉO SUR LA QUALITE DE L'AIR..... | 9 |
| ANNEXE I : PRÉSENTATION DES LIGNES LINEO ÉTUDIÉES | 10 |
| ANNEXE II : QUALIFICATION DE LA QUALITÉ DE L'AIR | 11 |
| ANNEXE III –RÉSULTATS DES DISPERSIONS..... | 16 |
| ANNEXE IV – CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES PENDANT LA CAMPAGNE DE MESURES..... | 19 |
| ANNEXE V - NOTES MÉTHODOLOGIQUES | 20 |
| Calcul des émissions des lignes de bus étudiées en 2013 et 2018..... | 20 |
| Méthodologie de l'adaptation statistique des échantillonneurs passifs | 21 |
| Méthodologie de l'inventaire, de la modélisation et de la cartographie | 21 |
| Modélisation de la dispersion des polluants | 22 |
| Méthodologie de la validation du modèle..... | 25 |
| ANNEXE VI – GÉNÉRALITÉS SUR LES PRINCIPAUX POLLUANTS ÉTUDIÉS | 29 |

CONTEXTE ET OBJECTIFS

Linéo est le nom du service de lignes de bus optimisé mis en place par Tisséo dans le cadre de sa politique d'amélioration du réseau de transports en commun de l'agglomération toulousaine. L'offre Linéo complète la desserte assurée par le métro et le tram ainsi que le réseau de bus classique de l'agglomération toulousaine.

Afin d'évaluer l'efficacité de l'investissement public engagé dans le réseau Linéo, en termes d'air-climat-énergie, Atmo Occitanie a réalisé une évaluation de l'impact de ces 5 lignes de bus sur les émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre ainsi que sur la qualité de l'air en comparaison au système de transport en commun existant auparavant.

PRESENTATION DU RESEAU DE BUS LINEO

Le service de bus Linéo de l'agglomération toulousaine a été lancé officiellement en 2016. Au 1^{er} janvier 2018, cinq lignes Linéo sont exploitées par Tisséo et complètent le réseau de bus classique de Toulouse (cf carte 1) :

- **L1** : Sept Deniers - Gymnase de l'Hers
- **L2** : Arène Saint-Martin du Touch - Colomiers

HYPOTHESES DE TRAVAIL

L'année de référence de l'étude est l'année 2018.

Cette étude intègre :

- un inventaire des émissions de gaz à effet de serre, de polluants atmosphériques dans l'air ambiant,
- des mesures de qualité de l'air le long des parcours LINÉO sur la période
- une modélisation de la dispersion des émissions afin de caractériser l'impact des LINÉO sur le domaine d'étude.

L'inventaire des émissions a été réalisé à partir des données de comptage de trafic routier mises à jour avec :

- les comptages faits en 2018 le long des axes routiers (fournis par Toulouse Métropole),
- les données réelles de circulation des transports en commun (fournis par TISSEO Collectivités).

Pour la quantification des émissions des bus sur la zone d'études, TISSEO Collectivités a fourni pour 2013 et 2018 :

- Les tracés des voies de bus étudiées,
- Les fréquences horaires de passage des bus en semaine, samedi, dimanche et vacances scolaires,
- Les motorisations des bus en circulation,
- Les vitesses moyennes de circulation.

Les données d'inventaire prises en compte comme référence pour l'évaluation réalisée dans ce rapport sont issues de la version "Inventaire des émissions - Atmo Occitanie - ATMO_IRSV3.1_Occ" et ont été élaborées en

Les objectifs finaux de l'étude sont l'évaluation sur une année de :

- de l'impact du réseau Linéo sur les émissions atmosphériques et la consommation énergétique par comparaison avec le réseau de bus en œuvre en 2013,
- de l'impact du réseau Linéo sur la qualité de l'air par comparaison avec le réseau de bus en œuvre en 2013 ,
- de l'impact du réseau Linéo sur l'exposition des personnes aux principaux polluants atmosphériques.

- **L6** : Ramonville - Castanet-Tolosan
- **L7** : Cours Dillon - Saint-Orens
- **L8** : Marengo SNCF - Gonin

En 2025, 13 axes Linéo devraient être en service.

2019. Ces données couvrent la période de référence 2010-2017.

A partir de l'inventaire cadastré, les émissions par passager des bus Linéo ont été comparées aux émissions par passager de véhicules particuliers circulant sur le même trajet.

Les émissions par passager des bus Linéo ont été calculées pour chaque ligne en prenant en compte le nombre moyen journalier de passagers dans un bus Linéo. Les émissions par passager pour les véhicules particuliers ont été calculées en considérant le taux d'occupation moyen des voitures sur l'agglomération toulousaine fournis dans le rapport « Principaux résultats de l'Enquête Ménages Déplacements et de l'Enquête Cordon Routière » de 2013.

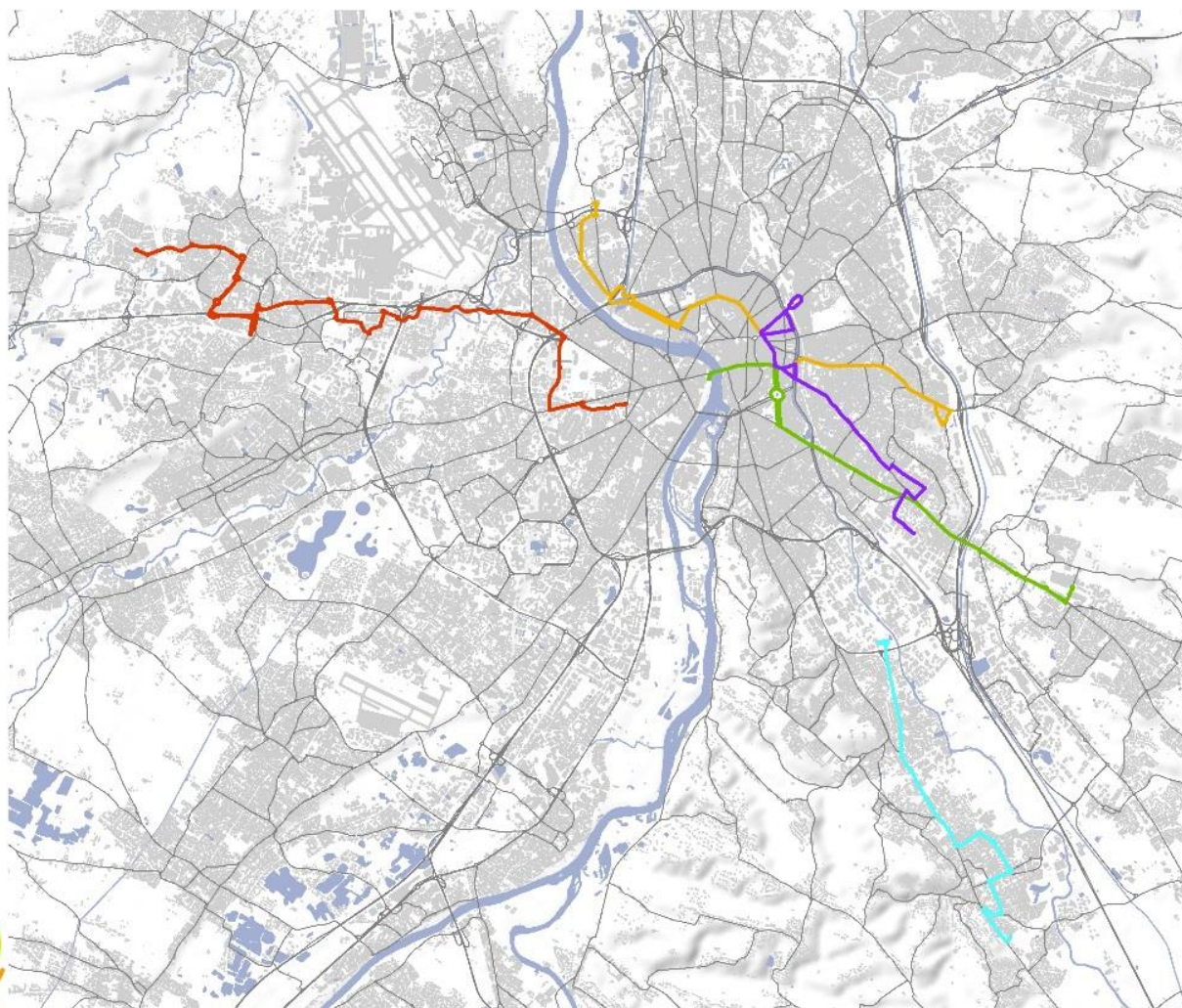
Cet inventaire a alimenté les cartographies de concentration produites pour cette étude. Celles-ci sont issues de la méthodologie développée par Atmo Occitanie selon les référentiels nationaux.

Des cartes des concentrations annuelles dans l'air pour le dioxyde d'azote (NO₂), les particules en suspension (PM10 et PM2.5) ont ainsi été réalisées sur le domaine d'études selon les deux scénarios précédemment décrits. Elles prennent en compte les conditions météorologiques (vitesse et direction du vent, couverture nuageuse, température...) fournies par la station météorologique de Blagnac pour l'année 2018. Les statistiques d'exposition associées à ces cartographies intègrent les incertitudes associées au modèle de dispersion de la qualité de l'air.

Une campagne de mesures du dioxyde d'azote (NO₂) par échantillonneurs passifs a été réalisée en 2019 le long des cinq lignes de bus Linéo étudiées. Les concentrations mesurées ont permis de valider les cartes de concentration obtenues.

Afin d'évaluer l'impact de la mise en place des lignes de bus Linéo sur la qualité de l'air, une comparaison de la qualité de l'air a été réalisée entre le scénario fil de l'eau et le scénario projeté. Une évolution (dégradation ou une amélioration) de la qualité de l'air a été prise en compte lorsque que la variation de la moyenne annuelle est supérieure à +/- 0.5 µg/m³.

- Lineo 8
- Lineo 7
- Lineo 6
- Lineo 2
- Lineo 1



Carte 1 : Présentation des lignes de bus Linéo étudiées

IMPACT DES LIGNES LINÉO SUR LES ÉMISSIONS ATMOSPHÉRIQUES ET LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE

HAUSSE DU NOMBRE DE KILOMETRES PARCOURUS MAIS BAISSÉ DES ÉMISSIONS DE POLLUANTS

La méthodologie de calcul des émissions des bus est indiquée en annexe V.

Les scénarios étudiés portent donc sur les situations suivantes :

- **Scénario fil de l'eau** : année 2018 avec le réseau de transport en commun tel qu'il existait en 2013,
- **Scénario projeté** : année 2018 avec le réseau Linéo en fonctionnement pour cette même année.

Les émissions moyennes des différents polluants (en masse/an) pour l'ensemble des lignes de bus ainsi que l'évolution du nombre de km parcourus et des quantités de polluants émises par le réseau de bus Linéo, en comparaison du réseau de bus classiques, sont résumées dans le tableau suivant.

| | Millions de km parcourus par an | Émissions - en kg / an | | | | Émissions - en g / an | | | |
|---|---------------------------------|------------------------|---------------|-------------|--------------|-----------------------|--------------|--------------|---------------|
| | | NOx | PM10 | PM2,5 | COV | C6H6 | Cd | Ni | |
| Scénario projeté - total Linéo 2018 | 1 187 | 17 402 | 563 | 355 | 1 868 | 0.2 | 0.05 | 0.19 | |
| Scénario fil de l'eau - total bus classiques 2013 | 1 071 | 25 591 | 618 | 431 | 629 | 0.4 | 0.07 | 0.14 | |
| Évolution Scénario projeté / Scénario fil de l'eau | variation absolue | + 116 | -8 189 | -55 | -76 | + 1 239 | -0.2 | -0.02 | + 0.05 |
| | en % | + 11% | -32% | - 9% | - 18% | + 197% | - 51% | -32% | + 38% |

La mise en place du réseau Linéo met en évidence :

- une hausse du nombre de km parcourus de l'ordre de 11%, liée à la hausse du cadencement des bus.
- une baisse des émissions de la quasi-totalité des polluants, liée à l'utilisation, sur les lignes de bus Linéo, d'un matériel roulant récent gazole euro 5, hybride Euro 6 et GNV.

Cette baisse est de 32% pour les oxydes d'azote (NOx), 9% pour les particules PM10, 18% pour les particules fines PM2,5 et 51% pour le benzène (C₆H₆).

Contrairement aux polluants cités précédemment, les émissions de Composés Organiques Volatils (COV) augmentent fortement avec la mise en service des lignes Linéo. Cette hausse est due à la part importante de bus au gaz naturel (GNV) dans le parc de bus Linéo. En effet, la méthodologie COPERT V (version 5.0) fournit des

émissions unitaires de COV des bus GNV plus élevées que celles des bus diesel euro 6 alors que des travaux expérimentaux récents (quelques véhicules au gaz) montrent des niveaux d'émission assez similaires à ceux des motorisations Diesel actuelles. Les émissions de COV calculées dans cette étude devront donc être réévaluées lorsque les émissions unitaires des bus auront été mieux documentées.

Le cadmium issu des pots catalytiques et de l'usure des plaquettes de frein, des pneus, voit ses émissions restées stables tandis que le nickel lié aux phénomènes d'usure augmente en lien avec la hausse du nombre de km parcourus.

L'utilisation de bus de motorisation récente induit une baisse sensible des émissions des polluants à enjeux sur l'agglomération toulousaine, en dépit de l'augmentation du nombre de km parcourus.

HAUSSE DE CONSOMMATION ENERGETIQUE EN LIEN AVEC L'AUGMENTATION DU NOMBRE DE KILOMETRES

Ci-dessous sont présentées les consommations énergétiques totales (en kg/j) et les émissions de gaz à

effet de serre (GES) émises par le réseau de bus Linéo en comparaison du réseau de bus classiques.

| | | Consommation énergétique en milliers de tonnes équivalent pétrole /an | Émissions de GES en tonnes/an |
|----------------------------------|------------------|---|-------------------------------|
| Total Linéo 2018 | | 556 | 4 570 |
| Total bus classiques 2013 | | 502 | 4 297 |
| Évolution Linéo / bus | en tonnes | 54 | 274 |
| | en % | +11% | +6% |

La baisse des émissions de polluants atmosphériques avec la mise en place des lignes Linéo n'est pas transposable à la consommation énergétique et aux émissions de Gaz à Effet de Serre.

La hausse du cadencement des bus induit une hausse de la consommation énergétique de 11% du même ordre de grandeur que le nombre de km parcourus. Les émissions de Gaz à Effet de Serre augmentent de 6%.

En raison de la hausse de fréquence de passage des bus, les lignes Linéo sont plus consommatrices d'énergie thermique que les bus de 2013. Cependant, **l'amélioration du parc de bus et notamment l'augmentation du rendement énergétique des moteurs permet une hausse des émissions de gaz à effet de serre plus faible que la hausse observée de consommation énergétique.**

IMPACT VARIABLE SUR LES EMISSIONS DE POLLUANTS SELON LA LIGNE DE BUS

La ligne Linéo 2 est la seule ligne de bus étudiée dont la longueur diminue légèrement en comparaison de la ligne de bus en place en 2013. Malgré la hausse du nombre de bus en circulation avec la mise en service de Linéo, le nombre de kilomètres parcouru diminue induisant une baisse de la consommation énergétique et des émissions de GES sur cette ligne Lineo 2.

La diminution du nombre de kilomètres parcourus associée à une amélioration des motorisations permet également une baisse importante des quantités de polluants émis.

| | | Comparaison Linéo 2 / ligne 64 | | | | | |
|--|-------------------|-----------------------------------|------------------------|------|-------|--|-------------------------------|
| Scénario projeté / Scénario fil de l'eau | en valeur absolue | Millions de km parcourus par jour | Émissions - en kg / an | | | Consommation énergétique en tonne équivalent pétrole /an | Émissions de GES en tonnes/an |
| | | | NOx | PM10 | PM2,5 | | |
| | en % | -12 | -2 350 | -31 | -30 | -9 | -69 |
| | | -2% | -39% | -19% | -26% | -3% | -6% |

Les légères hausses du nombre de kilomètres parcourus sur les lignes Linéo 1 et 8 et donc de la consommation énergétique sont dues à une légère augmentation de la longueur des lignes en comparaison des lignes de bus en place en 2013 ainsi qu'à l'augmentation de la fréquence

de passage des bus. L'amélioration des motorisations de la flotte de bus Linéo permet de limiter la hausse des émissions de gaz à effet de serre et également de réduire les émissions des principaux polluants.

| | | Comparaison Linéo 1 / ligne 16 | | | | | |
|--|-------------------|-----------------------------------|------------------------|------|-------|--|-------------------------------|
| Scénario projeté / Scénario fil de l'eau | en valeur absolue | Millions de km parcourus par jour | Émissions - en kg / an | | | Consommation énergétique en tonne équivalent pétrole /jour | Émissions de GES en tonnes/an |
| | | | NOx | PM10 | PM2,5 | | |
| | en % | + 11 | -2 895 | -27 | -28 | +18 | +1.3 |
| | | +4% | -37% | -15% | -23% | +4% | 0.1% |

| | | Comparaison Linéo 8 / ligne 22 | | | | | |
|--|---------------------------|-----------------------------------|------------------------|-------------|-------------|--|-------------------------------|
| Scénario projeté / Scénario fil de l'eau | en valeur absolue en % | Millions de km parcourus par jour | Émissions - en kg / an | | | Consommation énergétique en tonne équivalent pétrole /jour | Émissions de GES en tonnes/an |
| | | | NOx | PM10 | PM2,5 | | |
| | | +16 | -1 610 | -11 | -14 | +9 | +45 |
| | | +9% | -34% | -11% | -19% | +11% | +6% |

Les lignes Linéo 6 et 7 sont les lignes dont la fréquence de passage des bus a le plus augmenté induisant les plus fortes hausses du nombre de kilomètres parcourus, de la consommation énergétique et des émissions de GES.

L'amélioration des motorisations de la flotte de bus Linéo permet un gain d'émissions pour les oxydes d'azote. En revanche, on note une hausse des émissions de particules PM10 et PM2,5.

| | | Comparaison Linéo 6 / ligne 62 | | | | | |
|--|---------------------------|-----------------------------------|------------------------|--------------|---------------|--|-------------------------------|
| Scénario projeté / Scénario fil de l'eau | en valeur absolue en % | Millions de km parcourus par jour | Émissions - en kg / an | | | Consommation énergétique en tonne équivalent pétrole /jour | Émissions de GES en tonnes/an |
| | | | NOx | PM10 | PM2,5 | | |
| | | +46 | -428 | + 8 | + 0.3 | + 18 | + 134 |
| | | +34% | -16% | + 11% | + 0.6% | + 33% | + 28% |

| | | Comparaison Linéo 7 / ligne 10 | | | | | |
|--|---------------------------|-----------------------------------|------------------------|------------|------------|--|-------------------------------|
| Scénario projeté / Scénario fil de l'eau | en valeur absolue en % | Millions de km parcourus par jour | Émissions - en kg / an | | | Consommation énergétique en tonne équivalent pétrole /jour | Émissions de GES en tonnes/an |
| | | | NOx | PM10 | PM2,5 | | |
| | | +48 | -906 | + 5 | -3 | +23 | +163 |
| | | + 28% | -21% | +5% | -5% | +28% | +23% |

BAISSE DES EMISSIONS PAR PASSAGER SUR L'ENSEMBLE DES LIGNES DE BUS

La mise en service des lignes Linéo s'accompagne d'une hausse de leur fréquentation, en moyenne de 28%, qui, associée à une flotte de bus moins émettrice, permet une baisse des émissions de polluants et de gaz à effet de serre par passager transporté.

La mise en service des cinq lignes Linéo permet ainsi une baisse :

- De près de la moitié des émissions de NOx par passager,
- D'un tiers des émissions de particules,
- De près d'un cinquième des émissions de GES.

| Évolution des émissions par passager à la mise en service des lignes Linéo - | | | | | |
|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | Nombre moyens de voyageurs | NOx | PM10 | PM2,5 | GES |
| Linéo 1 | +29% | -51% | -34% | -40% | -22% |
| Linéo 2 | +50% | -59% | -46% | -51% | -38% |
| Linéo 6 | +26% | -34% | -12% | -20% | +1% |
| Linéo 7 | +28% | -39% | -18% | -26% | -4% |
| Linéo 8 | +9% | -39% | -18% | -26% | -3% |
| Total | +28% | -47% | -29% | -36% | -17% |

LE PASSAGER D'UN BUS EMET MOINS QU'UNE PERSONNE UTILISANT SON VEHICULE PARTICULIER

Les émissions de polluants atmosphériques et de GES par type de voyageurs, bus ou véhicules particuliers ont été comparées pour une situation correspondant à l'utilisation moyenne des bus dans une journée. **Il apparaît ainsi que les émissions pour un voyageur pour un même trajet utilisant les bus Linéo sont nettement plus faibles que celles attribuables à une personne utilisant son véhicule particulier, ceci pour l'ensemble des polluants étudiés.**

En moyenne, pour les cinq lignes de bus, l'utilisation des lignes Linéo permet une réduction d'émissions par rapport à la voiture individuelle de :

- 80% pour les NOx,

- 93% pour les particules PM10,
- 94% pour les particules PM2,5,
- 86% pour les GES.

Cette baisse est plus ou moins importante selon les lignes de bus. Ainsi, les lignes de bus Linéo 6 et 8 sont celles qui permettent la diminution la plus réduite :

- La ligne 6 étant la ligne ayant la fréquentation la plus faible des cinq lignes Linéo étudiées,
- La ligne 8 circulant sur un axe ayant le trafic moyen journalier de véhicules particuliers le plus faible des cinq lignes Linéo étudiées.

| | Baisse d'émissions pour le trajet d'un passager en bus Linéo plutôt qu'en véhicule | | | |
|---------------|--|-------------|-------------|-------------|
| | NOx | PM10 | PM2,5 | GES |
| Ligne Linéo 1 | -89% | -96% | -97% | -93% |
| Ligne Linéo 2 | -86% | -94% | -95% | -90% |
| Ligne Linéo 6 | -72% | -88% | -89% | -79% |
| Ligne Linéo 7 | -82% | -93% | -94% | -88% |
| Ligne Linéo 8 | -73% | -91% | -92% | -82% |
| Total | -80% | -93% | -94% | -86% |

UN RESEAU LINEO GLOBALEMENT FAVORABLE EN TERMES D'EMISSIONS DE POLLUANTS ATMOSPHERIQUES

La mise en service des cinq lignes linéo est associée à une hausse du cadencement des bus et une amélioration des de leurs motorisations.

L'utilisation de bus de motorisation récente permet :

- une baisse sensible des principales émissions polluantes, en dépit de l'augmentation du nombre de km parcourus,
- une augmentation de la fréquentation liée à l'augmentation de cadencement et donc une diminution des émissions de polluants et de gaz à effet de serre par passager transporté.

- une hausse des émissions de gaz à effet de serre plus faible que la hausse observée de consommation énergétique liée à la hausse de cadencement.

En outre, un voyageur utilisant les bus Linéo contribue à émettre nettement moins de polluants dans l'air qu'une personne utilisant son véhicule particulier, pour les principaux polluants étudiés.

IMPACT DE LA MISE EN SERVICE DES CINQ LIGNES LINÉO SUR LA QUALITE DE L'AIR

Les cartes de concentration du dioxyde d'azote et des particules PM10 et PM2,5 pour les deux scénarios sont présentées en annexe III.

La carte ci-dessous présente la différence de concentration en NO₂ entre le scénario projeté (année 2018 avec le réseau Linéo) et le scénario de référence (année 2018 avec le réseau de transport en commun tel qu'il existait en 2013). L'échelle de couleurs indique en bleu les zones où une amélioration des concentrations en NO₂ est constatée, en rouge, les zones où une dégradation est constatée.

Les lignes Linéo n'ont pas d'impact significatif sur les concentrations de particules PM10 et PM2,5 (voir annexe III).

En revanche, la mise en service des cinq lignes de bus Linéo a un impact positif significatif sur les concentrations en dioxyde d'azote le long des lignes de bus. Ainsi, pour ce polluant, elle induit une diminution allant jusqu'à 2 µg/m³ en moyenne annuelle permettant :

- une amélioration de la qualité de l'air pour 1 630 habitants, essentiellement les riverains des lignes Linéo 1, 7 et 8. ,

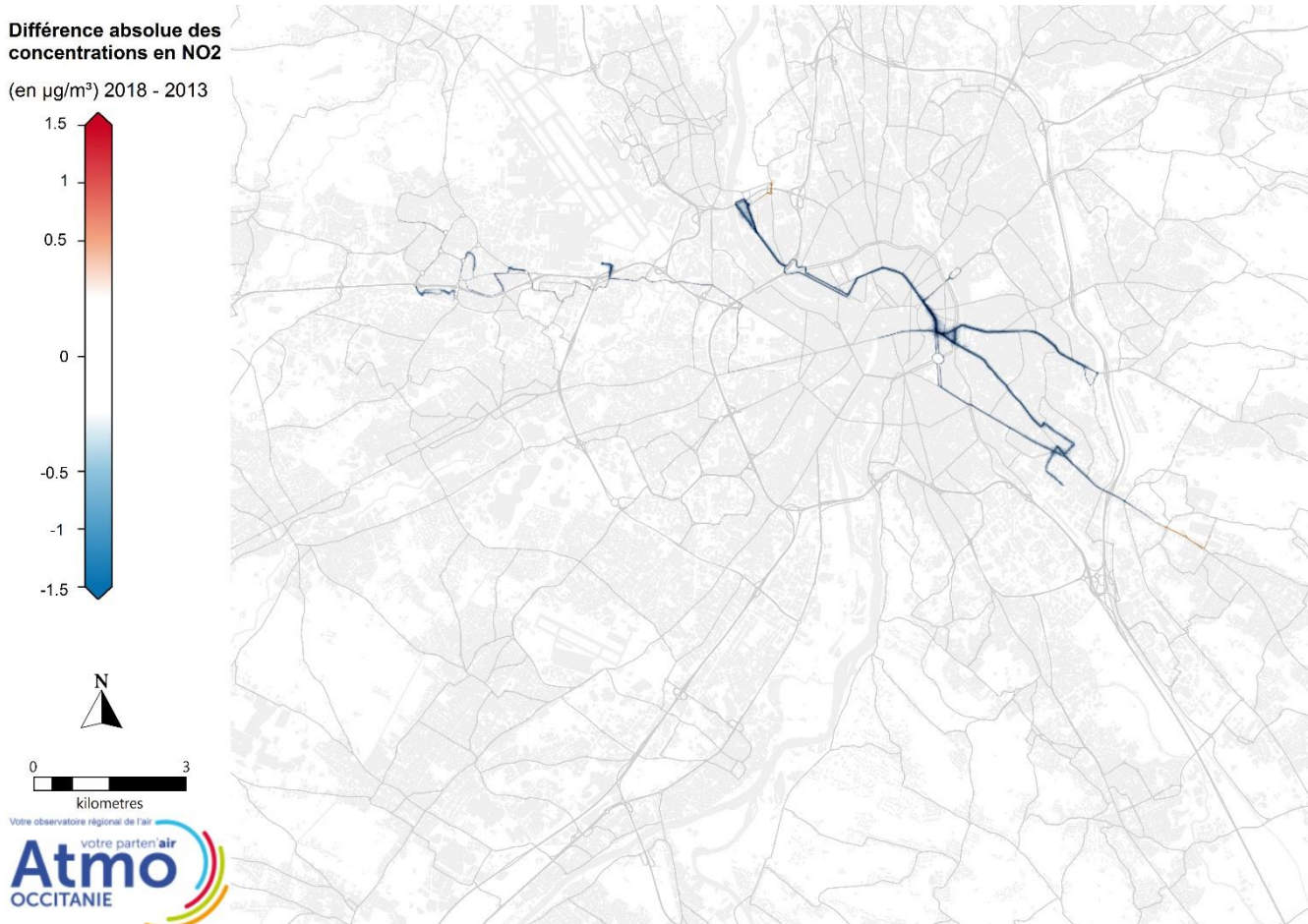
- une exposition à la pollution de l'air qui passe en-dessous de la valeur limite de protection de la santé (fixée à 40 µg/m³) pour moins de 100 personnes.

La baisse de NO₂ la plus forte est observée dans le centre de Toulouse, au niveau de l'axe routier commun aux lignes Linéo 8 et Linéo 1. En revanche, la ligne Linéo 6 n'a pas d'impact significatif sur les concentrations de NO₂.

Le tracé de certaines lignes Linéo est légèrement différent de celui des bus en circulation en 2013 :

- Pour la ligne Linéo 1 en raison d'une modification du terminus de la ligne Linéo 1,
- Pour la ligne Linéo 7, en raison d'un prolongement de la ligne vers Saint-Orens.

Ces modifications induisent une dégradation limitée, de moins de 1 µg/m³ en moyenne annuelle, des concentrations en NO₂ sur ces axes. Elles n'induisent pas de hausse du nombre de personnes soumises à des niveaux de NO₂ supérieures à la valeur limite pour la protection de la santé humaine.



Carte 2 : Différences de concentration entre le scénario projeté (année 2018 avec le réseau Linéo) et le scénario de référence (année 2018 avec le réseau de transport en commun tel qu'il existait en 2013)

ANNEXE I : PRÉSENTATION DES LIGNES LINEO ÉTUDIÉES

La présente étude concerne une première évaluation de l'impact de l'impact sur la qualité de l'air et les gaz à effet de serre des 5 lignes Linéo exploitées en 2018 en comparaison au système de transport en commun existant auparavant.

Les lignes de bus Linéo sont des lignes de bus optimisées (portions de voies en site propre, priorité aux feux...) avec une fréquence élevée (1 bus toutes les 6 à 9 min en heures de pointe selon les lignes) et une amplitude

horaire de 5h15 à 00h30, calée sur le métro et le tram, jusqu'à 1h le week-end.

Les lignes Linéo sont exploitées avec des bus articulés de différentes motisations respectant les normes Euro 6 :

- Des véhicules roulant au gaz naturel de normes Euro 6,
- Des Véhicules hybrides de normes Euro 6,
- Des véhicules diesel de normes Euro 5.

. Les principales caractéristiques de ces lignes sont présentées dans le tableau ci-dessous :

| Ligne | Trajet | Communes traversées | Nombre de voyageurs moyens | Nombre de voyageurs max pour une journée | Ligne remplacée |
|-------|---|-----------------------------------|----------------------------|--|-----------------|
| L1 | Sept Deniers - Gymnase de l'Hers | Toulouse | 15 574 | 25 436 | 16 |
| L2 | Arène - Saint-Martin du Touch - Colomiers | Colomiers - Toulouse | 7 915 | 13 738 | 64 |
| L6 | Ramonville - Castanet-Tolosan | Ramonville - Auzeville - Castanet | 4 364 | 8 101 | 62 |
| L7 | Cours Dillon - Saint-Orens | Toulouse - Saint-Orens | 8 123 | 12 801 | 10 |
| L8 | Marengo SNCF - Gonin | Toulouse | 7 015 | 11 780 | 22 |

Données TISSEO Collectivités

Les lignes étudiées sont situées sur l'agglomération toulousaine, sur un territoire fortement urbanisé avec la présence de bâti dense.

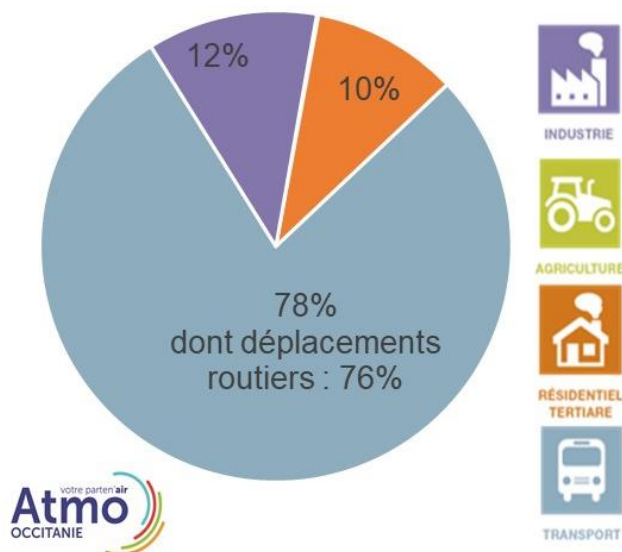
ANNEXE II : QUALIFICATION DE LA QUALITÉ DE L'AIR

ORIGINE DE LA POLLUTION SUR LES COMMUNES ACCUEILLANT UNE LIGNE LINEO

Les oxydes d'azote

Pour les sept communes sur lesquelles circulent les lignes Linéo, **les transports sont la 1^{ère} source d'oxydes d'azote.**

Ils contribuent à 78 % des émissions totales, les déplacements routiers contribuant, quant à eux, à 76% des émissions totales. Les dispositifs de chauffage résidentiel et tertiaire et les industries, représentent respectivement 10 et 12 % des émissions de d'oxydes d'azote (NOx).

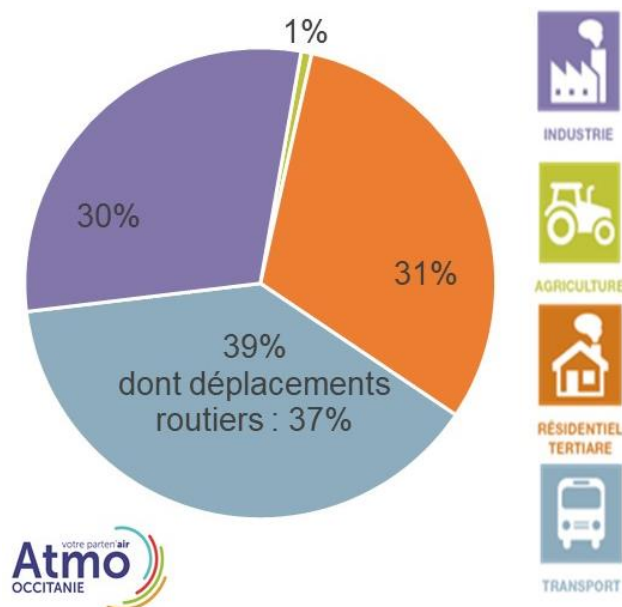


Graphe 1 : Répartition des sources d'oxydes d'azote sur les communes accueillant des lignes Linéo – année 2017
Source : Inventaire des émissions - Atmo Occitanie - ATMO_IRSV3.1_Occ_2010_2017

Les particules de diamètre inférieur à 10 µm

Pour les sept communes sur lesquelles circulent les lignes Linéo, **les émissions de particules PM10 sont majoritairement issues des déplacements routiers.**

Ainsi, ce secteur est la source de 37% des particules PM10 émises. Le résidentiel et les industries représentent respectivement 31 et 30 % des émissions de PM10.

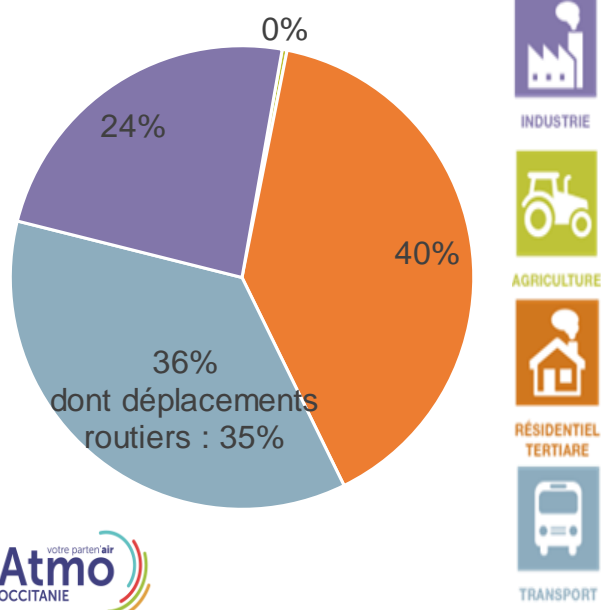


Graphe 2 : Répartition des sources de particules PM10 sur les communes accueillant des lignes Linéo – année 2017
Source : Inventaire des émissions - Atmo Occitanie - ATMO_IRSV3.1_Occ_2010_2017

Les particules de diamètre inférieur à 2,5 µm

Pour les sept communes sur lesquelles circulent les lignes Linéo, les émissions de **particules fines PM2,5** sont majoritairement issues du résidentiel-tertiaire.

Ainsi, ce secteur est la source de 40% des particules PM10 émises. Les déplacements routiers représentent, seconde source, représentent 35% des émissions de particules fines.

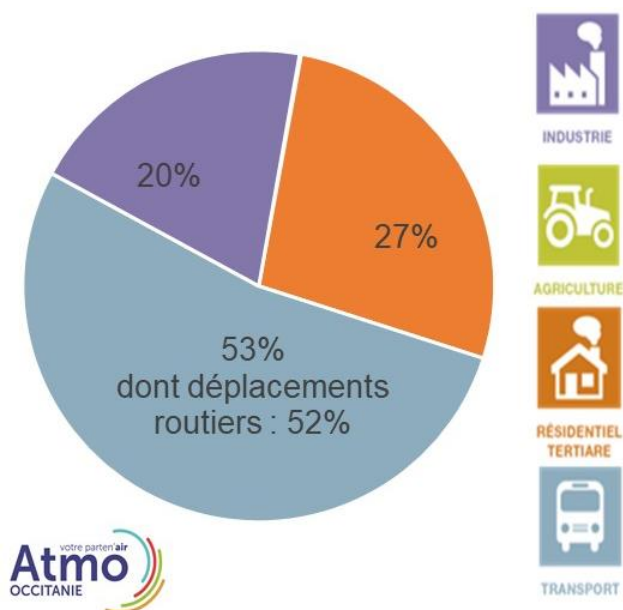


Graphe 3 : Répartition des sources de particules PM2.5 sur les communes accueillant des lignes Linéo - année 2017
 Source : Inventaire des émissions - Atmo Occitanie - ATMO_IRSV3.1_Occ_2010_2017

Gaz à effet de serre (GES)

Sur les sept communes accueillant des lignes Linéo, les émissions de gaz à effet de serre sont **majoritairement issues des déplacements routiers** lesquels représentent 52% de ces émissions.

Les secteurs résidentiel/tertiaire et industries représentent quant à eux respectivement 27% et 20% des émissions de GES.



Graphe 4 : Répartition des sources de Gaz à effet de serre sur les communes accueillant des lignes Linéo - année 2017
 Source : Inventaire des émissions - Atmo Occitanie - ATMO_IRSV3.1_Occ_2010_2017

NIVEAUX DE CONCENTRATIONS EN DIOXYDE D'AZOTE DANS L'ENVIRONNEMENT DES LIGNES DE BUS

Présentation de la campagne de mesure

En 2019, une campagne de mesures par **échantillonneurs passifs** a été menée avec pour objectifs :

- de caractériser plus précisément les niveaux de dioxyde d'azote le long des lignes Linéo,
- de vérifier les cartes de modélisation.

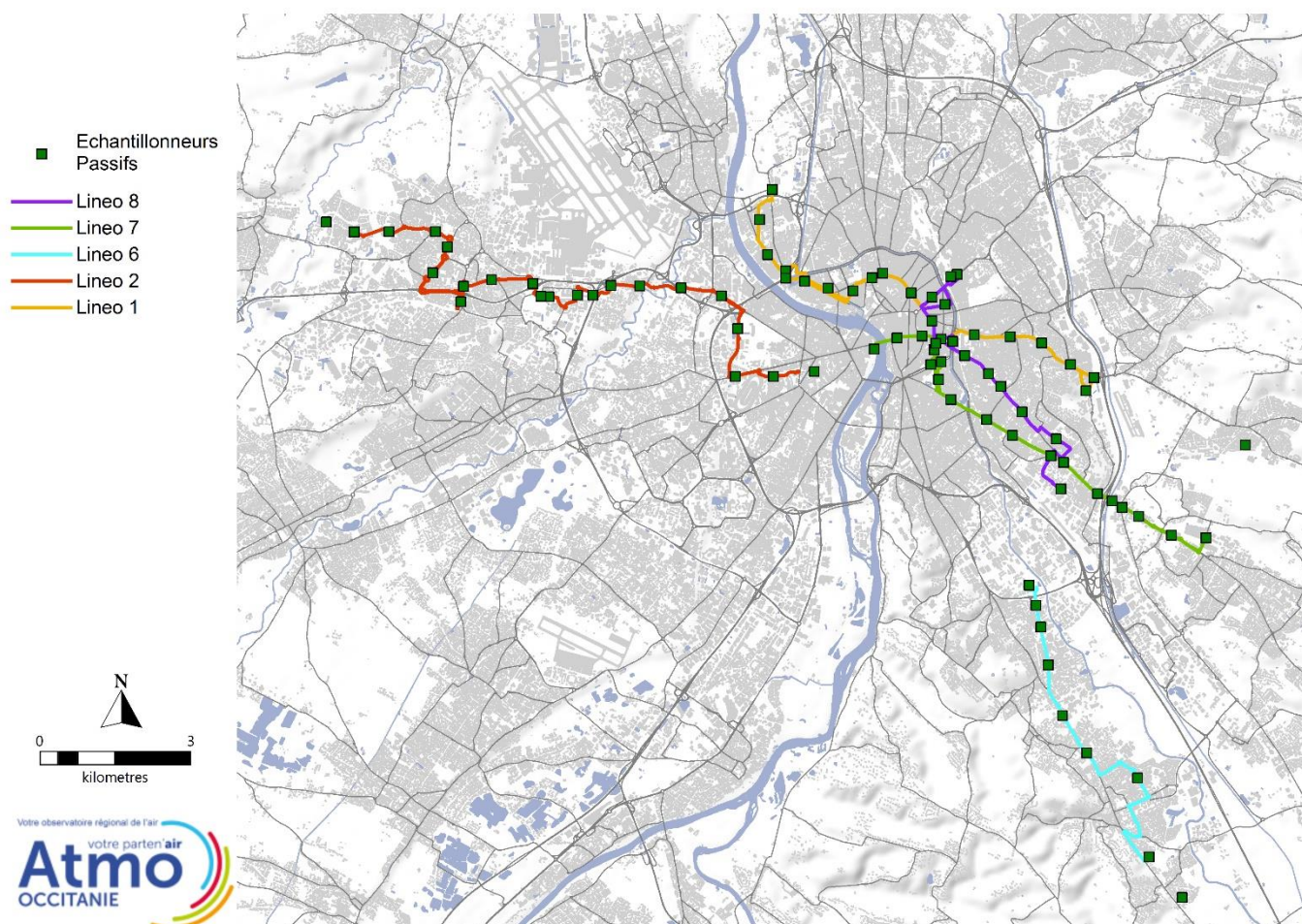
Ainsi, des échantillonneurs passifs permettant la mesure du dioxyde d'azote ont temporairement été implantés le long des lignes Linéo approximativement tous les kilomètres. Les échantillonneurs passifs, après analyse en laboratoire, fournissent une concentration moyenne sur l'ensemble du temps d'exposition.

La campagne de mesure, menée sur un mois, s'est déroulée du 25 avril au 23 mai 2019. Les **concentrations**

annuelles ont été estimées à partir des niveaux mesurés pendant la campagne de mesures, selon la méthode d'adaptation statistique des mesures (cf annexe V). Les méthodologies d'exploitation des mesures pour la modélisation des émissions et la cartographie des niveaux de pollution, sont décrites en annexe V.

Pour cette étude, le niveau de pollution en NO₂ a été évalué sur 70 sites le long des différentes lignes de bus.

La carte suivante illustre la localisation des échantillonneurs passifs lors de la campagne de mesures.



Carte 3 : Position des échantillonneurs passifs, campagne de mesures 2019

Concentrations mesurées

Le tableau ci-dessous décrit les statistiques issues des concentrations moyennes en dioxyde d'azote (NO₂) estimées sur l'année 2018. Il met en évidence des variations de concentrations importantes selon les lignes de bus mais également sur une même ligne.

Les minimums observés sont représentatifs des niveaux de fond généralement mesurés aux extrémités des lignes de bus tandis que les maxima sont représentatifs de l'exposition à proximité directe des axes de circulation les plus fréquentés.

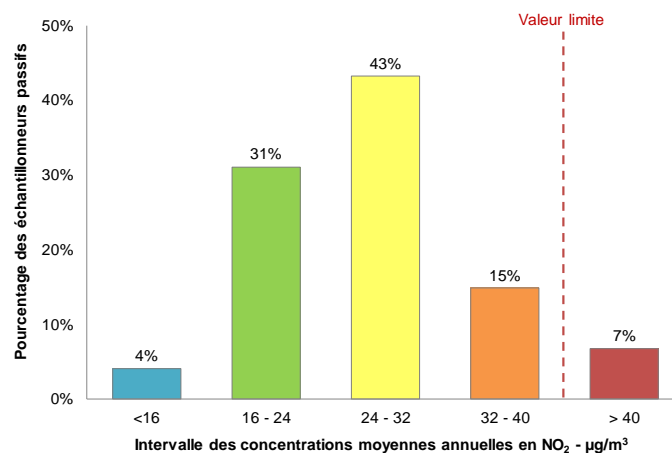
De même, les niveaux médians sont plus ou moins élevés selon l'environnement de la ligne de bus, et notamment selon les zones traversées.

Pour les lignes passant par le centre de Toulouse ; Linéo 1, 7 et 8, les concentrations médianes sont les plus élevées tandis que la ligne Linéo 6 desservant de Ramonville à Castanet-Tolosan apparaît être la ligne la moins exposée au dioxyde d'azote.

| | Concentration en DIOXYDE D'AZOTE - en µg/m ³ en moyenne sur l'année 2018 | | | | |
|----------------|---|---------|---------|---------|------------|
| | Minimum | Maximum | Moyenne | Médiane | Ecart Type |
| Linéo 1 | 18 | 44 | 30 | 30 | ±7 |
| Linéo 2 | 16 | 74 | 27 | 23 | ±13 |
| Linéo 6 | 14 | 48 | 24 | 19 | ±11 |
| Linéo 7 | 20 | 37 | 29 | 29 | ±5 |
| Linéo 8 | 15 | 33 | 26 | 27 | ±5 |

Tableau 1 : Valeurs statistiques de l'échantillon des mesures par échantillonneurs passifs NO₂, 2018

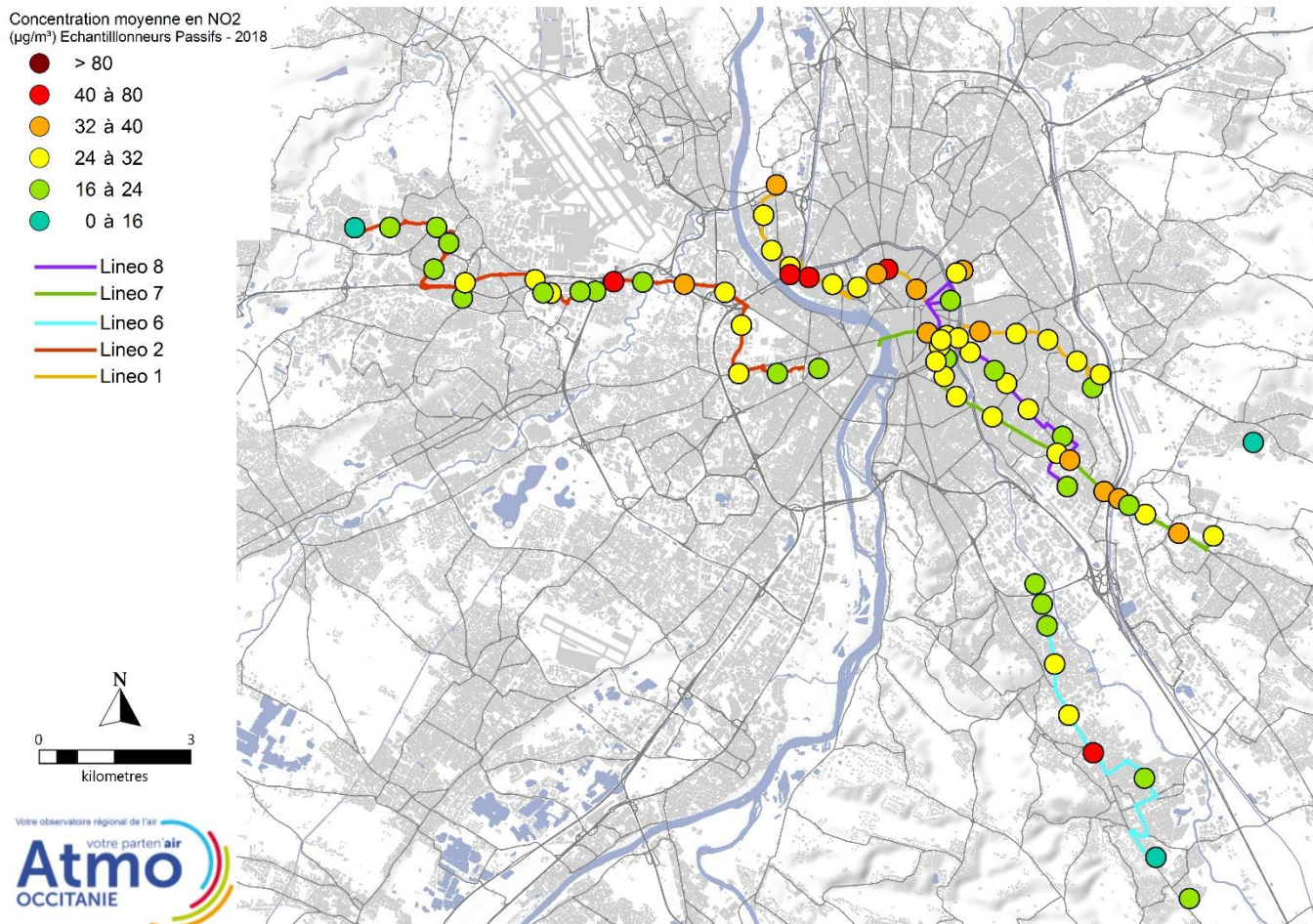
Le graphe ci-contre met en évidence la dispersion des concentrations des échantillonneurs passifs sur les sites de mesure. De répartition hétérogène sur l'ensemble de la bande d'étude, les concentrations sont très majoritairement inférieures à 40 µg/m³.



Graphe 5 : Répartition des échantillonneurs passifs en fonction des intervalles de concentration en NO₂, concentrations moyennes annuelles estimées 2018

La carte ci-après présente les gammes de concentrations observées sur les sites de mesures du NO₂ dans le domaine d'étude.

Cinq sites de mesure sont en dépassement de la valeur limite réglementaire. La concentration maximale est de 74 µg/m³.



Carte 4 : Concentrations moyennes annuelles estimées des échantillonneurs passifs en NO₂, 2018

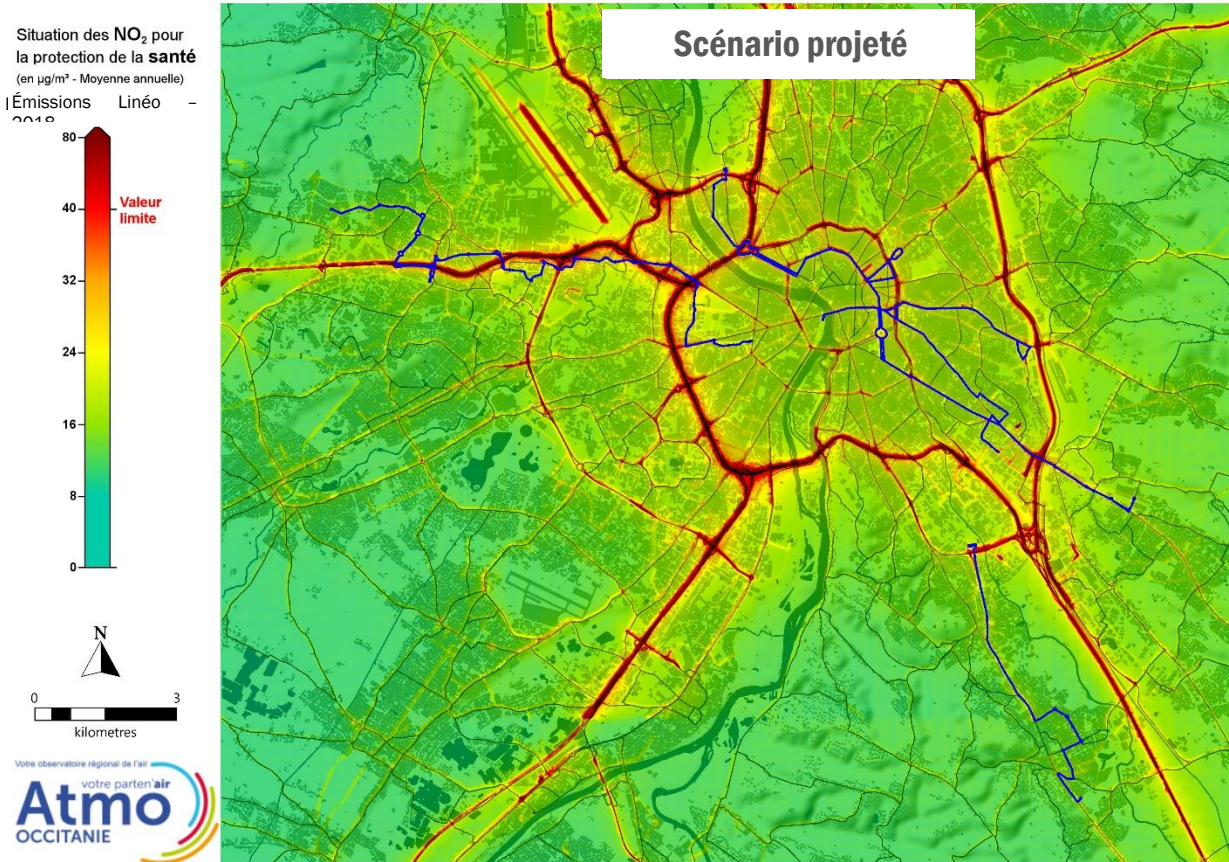
La qualité de l'air observée le long des lignes de bus Linéo est bonne pour les particules PM10 pour lesquels l'ensemble des réglementations est respecté en fond urbain et en proximité du trafic routier.

En fond urbain, les concentrations en dioxyde d'azote (NO₂) et en particules fines PM_{2,5} respectent les valeurs

réglementaires. En revanche, la valeur limite de protection de la santé du NO₂ est dépassée à proximité des grands axes de circulation. De même, l'objectif de qualité des PM_{2,5} n'est pas respecté dans ces environnements.

ANNEXE III – RÉSULTATS DES DISPERSIONS

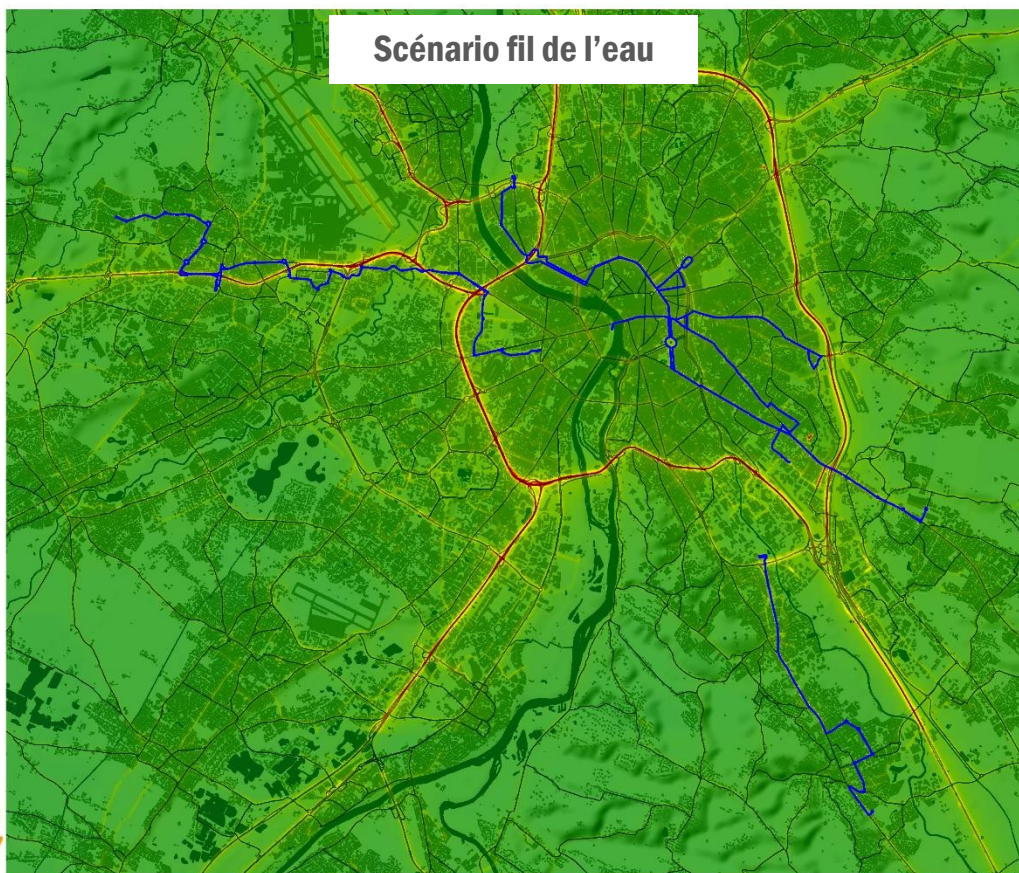
LE DIOXYDE D'AZOTE



LES PARTICULES PM10

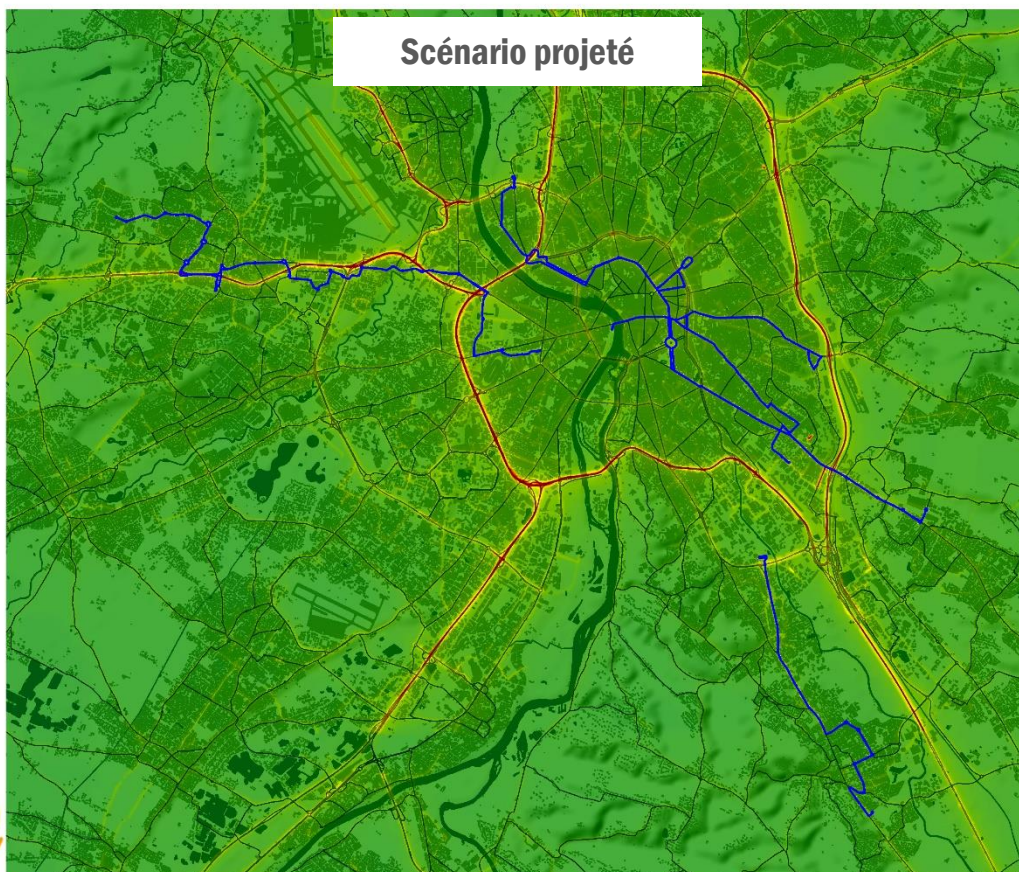
Situation des PM₁₀ pour la protection de la **santé**
(en µg/m³ - Moyenne annuelle)

Émissions bus - 2013



Situation des PM₁₀ pour la protection de la **santé**
(en µg/m³ - Moyenne annuelle)

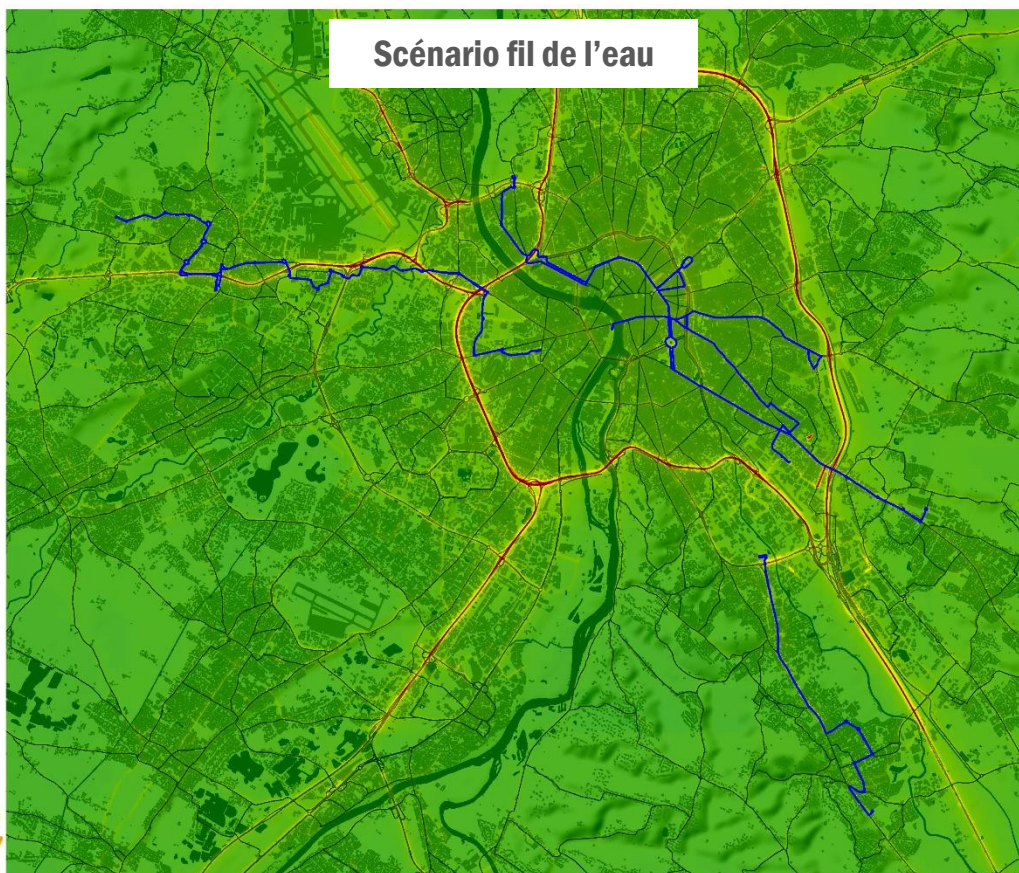
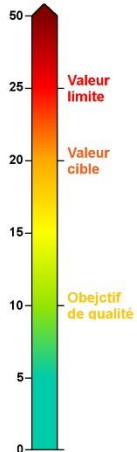
Émissions Linéo - 2018



LES PARTICULES PM_{2,5}

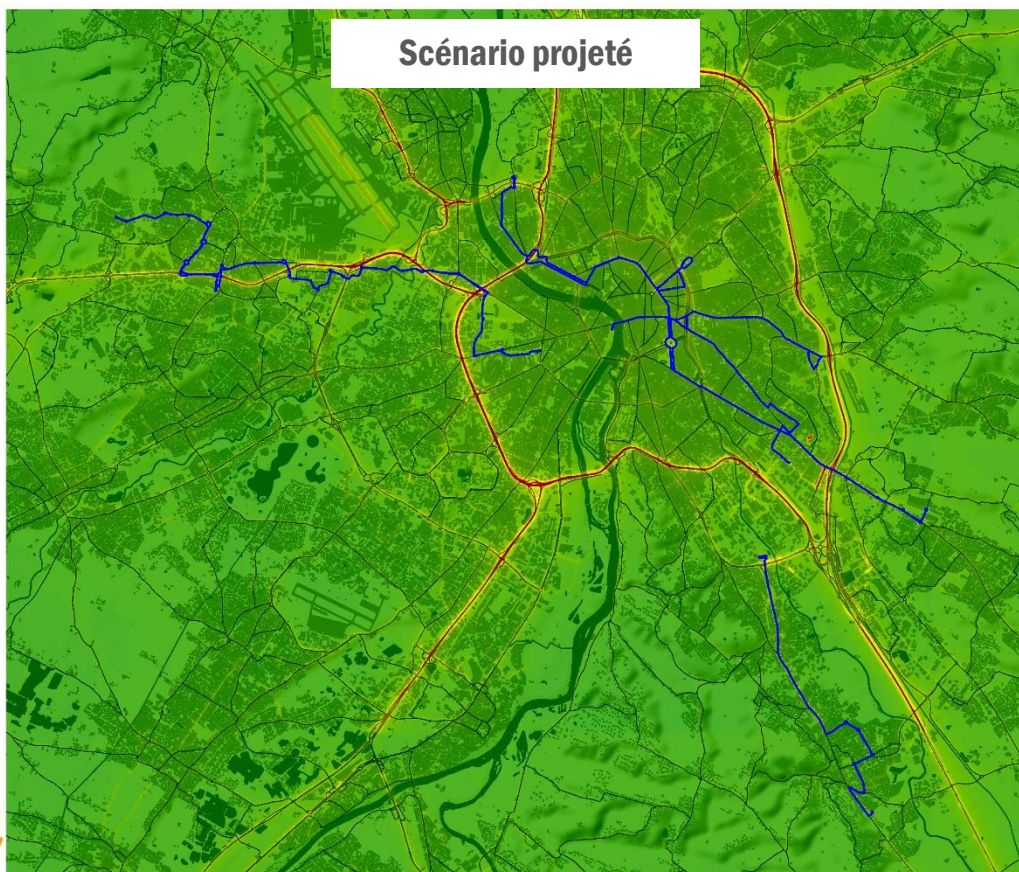
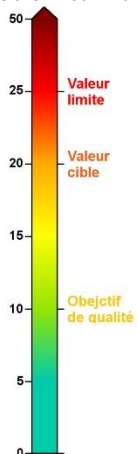
Situation des PM_{2,5} pour la protection de la **santé** (en µg/m³ - Moyenne annuelle)

Émissions bus - 2013



Situation des PM_{2,5} pour la protection de la **santé** (en µg/m³ - Moyenne annuelle)

Émissions Linéo - 2018



ANNEXE IV – CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES PENDANT LA CAMPAGNE DE MESURES

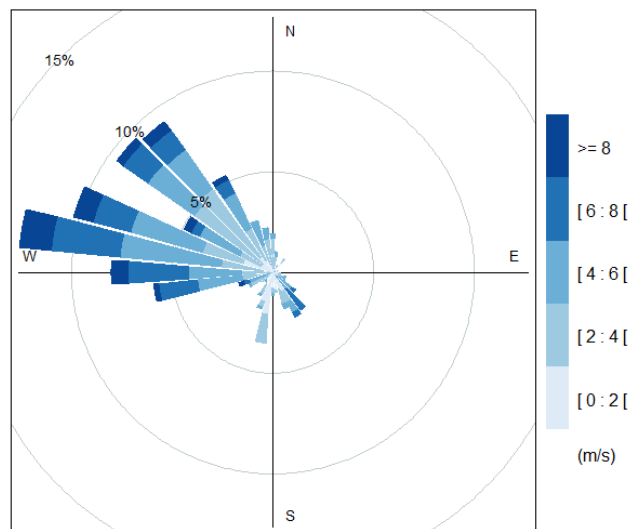
Les Informations ci-dessous ont été créées à partir de données de Météo-France.

D'après la rose des vents représentant la situation durant la campagne de mesure, le vent de Nord-Ouest est le vent dominant, avec des épisodes marqués par de violentes bourrasques.

La campagne de mesures a essentiellement été marquée par un temps instable, pluvieux et frais.

Ces conditions météorologiques favorables à la dispersion des polluants ont permis la mesure de niveaux de concentration légèrement inférieurs que ceux mesurés sur l'année 2018.

Station météorologique Toulouse-Blagnac
Période du 25 avril au 23 mai 2019



Graphe 6 : Rose des vents : campagne avec les échantillonneurs passifs

ANNEXE V - NOTES MÉTHODOLOGIQUES

CALCUL DES EMISSIONS DES LIGNES DE BUS ETUDIÉES EN 2013 ET 2018

Principe du calcul

Le calcul des émissions des bus étudiés est basé sur la méthodologie COPERT qui permet de convertir des données caractéristiques du trafic routier (trafic moyen journalier annuel, vitesse moyenne de circulation...) en émissions de polluants.

Un facteur d'émission est attribué pour chaque type de bus de l'étude, chaque polluant à la vitesse de circulation moyenne de chaque ligne de bus. La répartition du parc de bus prend en compte les normes d'émissions Euro qui fixent les limites maximales de rejets de polluants pour chaque type de bus composant la ligne.

Hypothèses prises

Le **trafic moyen journalier annuel (TMJA)** sur chaque ligne de bus a été calculé à partir de fréquence de passage des bus en période scolaire et pendant les vacances scolaires. Il correspond au nombre de passage aller/retour sur les axes de circulation des bus ; lorsqu'un aller n'a pas le même trajet que le retour, un coefficient de 0,5 est affecté au TMJA de cet axe.

Ne disposant pas de la **vitesse des bus en 2013**, la vitesse moyenne 2018 a été attribuée aux lignes de bus classiques correspondantes pour 2013.

Dans cette étude, les données 2013 et 2018 sont fournies par Tisseo, en particulier :

- La fréquence de passage des bus en période scolaire et pendant les vacances scolaires afin de déterminer un trafic moyen journalier annuel.
- La distance parcourue de chaque ligne Linéo et le temps de trajet permettant d'attribuer une vitesse de circulation moyenne pour chaque ligne de bus.
- La répartition du parc de bus de chacune de ces lignes afin d'attribuer les facteurs d'émissions de chaque polluant étudiés.

A ce jour, il n'existe pas de **facteurs d'émissions COPERT pour les bus hybrides électriques diesel**. Ils sont assimilés à des bus diesel euro 6, ce qui induit une surévaluation des émissions de ces bus en 2018 par rapport à des bus diesel hybride électrique.

La **répartition moyenne des bus classiques et Linéo** dans le parc de véhicules de TISSEO a été appliquée à l'ensemble des lignes étudiée.

METHODOLOGIE DE L'ADAPTATION STATISTIQUE DES ECHANTILLONNEURS PASSIFS

Les mesures des échantillonneurs passifs sont statistiquement corrigées par une équation de type linéaire. Cette équation correspond à la droite de

tendance des « moyennes pendant la période de campagne » sur les « moyennes annuelles » du réseau des stations fixes d'Atmo Occitanie.

METHODOLOGIE DE L'INVENTAIRE, DE LA MODELISATION ET DE LA CARTOGRAPHIE

Calcul des données d'émission et de consommation énergétique

Hypothèses et choix formulés sur le parc bus

Pour les bus hybrides (diesel + électricité), la méthodologie employée pour le calcul des émissions routières, COPERT V, ne fournit pas de facteurs d'émissions pour cette catégorie. Aussi, il a été décidé de considérer les bus hybrides comme des bus diesel de norme EURO 6, soit la norme la plus récente et contraignante.

Le calcul des émissions pour le trafic routier se fait en deux temps : le réseau structurant et le réseau secondaire, en prenant en compte les émissions liées à la consommation de carburant, à l'usure des équipements (pneus, freins et routes) et au ré-envoi des particules lors du passage des véhicules. Le transport routier représente une part importante dans les émissions de l'agglomération toulousaine.

- Le réseau structurant représente les grands axes de circulation pour lesquels il existe des données de comptage fournies par les partenaires d'Atmo Occitanie (Conseils départementaux ASF, DIRSO, DIRMC, Collectivités, modèles trafic (SGGD), etc.). Sur ces axes les émissions sont calculées en fonction du trafic moyen journalier annuel (TMJA), de la vitesse autorisée et de la composition des véhicules pour chaque heure de la semaine en prenant en compte les surémissions liées aux ralentissements aux heures de pointe.
- Les émissions liées à la circulation sur le reste du réseau routier (réseau secondaire) sont calculées en prenant en compte les caractéristiques communales (commune rurale, en périphérie, ...), la population, le nombre d'actifs et les données des enquêtes déplacements.

L'ensemble du réseau structurant est réparti en tronçons (portions de routes homogènes en terme de trafic et de vitesses). Les tronçons sont considérés comme sources de polluants de type linéaires. Les émissions du réseau secondaire, qui correspondent à des zones comme indiquée ci-dessus, sont, elles, de type surfacique.

Facteurs d'émissions

Le calcul des émissions dues au trafic routier est basé sur la méthodologie COPERT qui permet de convertir des données caractéristiques du trafic automobile (trafic moyen journalier annuel, pourcentage de poids lourds, vitesse moyenne de circulation...) en émissions de polluants. Un facteur d'émission est attribué à chaque polluant et pour chaque catégorie de véhicule. Il est déterminé en fonction du type de véhicule (véhicule particulier, poids lourds...), de la vitesse de circulation, du type de moteur (essence ou diesel), du cylindrée du véhicule et de sa date de mise en circulation pour tenir compte des normes d'émissions Euro qui fixent les limites maximales de rejets de polluants pour les véhicules roulants neufs.

En fonction des données de trafic et de ces facteurs d'émissions détaillés, le logiciel réalisant l'inventaire quantifie les émissions de polluants atmosphériques ainsi que la consommation énergétique des véhicules sur chaque tronçon ou zone définie, et pour chaque horizon ou scénario.

Données de trafic

Des modélisations des données de comptage sous la forme de flux de véhicules pour l'heure de pointe du matin (HPM) et l'heure de pointe du soir (HPS) pour 2013 et 2020 (sans et avec le projet du TUS) ont été fournies par Tisseo Collectivités. Une estimation des TMJA (trafic moyen journalier annuel) a été réalisée selon la méthodologie établie dans le cadre du PDU. Un pourcentage de poids lourd a été affecté à chaque tronçon. Le pourcentage de poids lourd retenu pour ces horizons est le même que pour l'état initial.

Les vitesses moyennes de circulation retenues sur les tronçons dans la zone d'étude ont été établies sur la base des limites réglementaires de circulation en prenant en compte le taux de saturation des voies.

MODELISATION DE LA DISPERSION DES POLLUANTS

Principe de la méthode

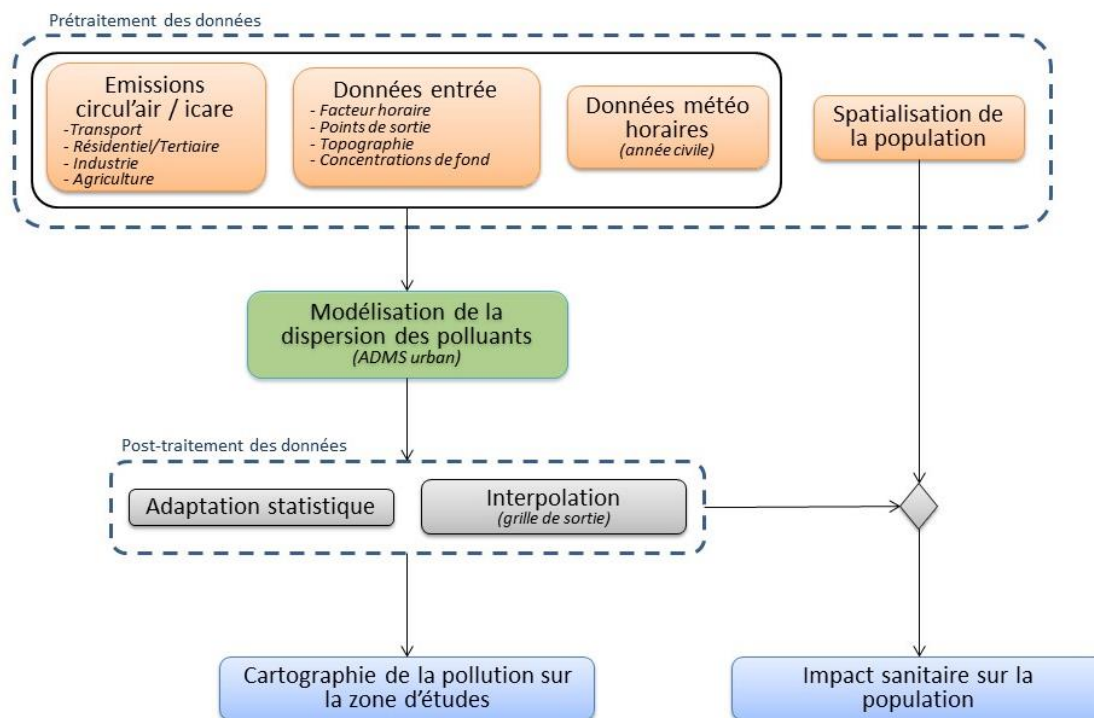


Schéma 1 : Méthodologie utilisée pour la modélisation de la dispersion à fine échelle sur la zone d'études

Le modèle ADMS-Urban permet de simuler la dispersion des polluants atmosphériques issus d'une ou plusieurs sources ponctuelles, linéiques, surfaciques ou volumiques selon des formulations gaussiennes.

Ce logiciel permet de décrire de façon simplifiée les phénomènes complexes de dispersion des polluants atmosphériques. Il est basé sur l'utilisation d'un modèle Gaussien et prend en compte la topographie du terrain de manière assez simplifiée, ainsi que la spécificité des mesures météorologiques (notamment pour décrire l'évolution de la couche limite).

Le principe du logiciel est de simuler heure par heure la dispersion des polluants dans un domaine d'étude sur une année entière, en utilisant des chroniques météorologiques réelles représentatives du site. A partir de cette simulation, les concentrations des polluants au sol sont calculées et des statistiques conformes aux réglementations en vigueur (notamment annuelles) sont élaborées.

L'utilisation de données météorologiques horaires sur une année permet en outre au modèle de pouvoir calculer les percentiles relatifs à la réglementation

Le logiciel ADMS-Urban est un modèle gaussien statistique cartésien. Le programme effectue les calculs de dispersion individuellement pour chacune des sources (ponctuelles, linéiques et surfaciques) et somme pour chaque espèce les contributions de toutes les sources de même type.

Pour le dioxyde d'azote, les émissions introduites dans ADMS-Urban concernent les NOx. Or seule une partie de NOx est oxydée en NO₂ en sortie des pots d'échappement.

L'estimation des concentrations en dioxyde d'azote (NO₂) à partir de celles d'oxydes d'azote (NOx) est réalisée par le biais de 2 types de module intégrés dans le logiciel ADMS-Urban.

Les données d'entrée du modèle hors déplacements routiers

L'objet de cette section est de présenter la méthodologie utilisée pour agréger les données nécessaires à la modélisation fine échelle sur la zone d'études.

Les émissions

Atmo Occitanie réalise un inventaire d'émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre, et de le met à jour suivant un guide méthodologique mis en place dans le cadre de l'arrêté du 24 août 2009 relatif au Système National d'Inventaires d'Émissions et de Bilans dans l'Atmosphère (SNIEBA), le Pôle de Coordination nationale des Inventaires Territoriaux (PCIT) associant :

- le Ministère en charge de l'Environnement,
- l'INERIS,
- le CITEPA,
- les Associations Agréées de Surveillance de Qualité de l'Air.

Ce guide constitue la référence nationale à laquelle chaque acteur local doit se rapporter pour l'élaboration des inventaires territoriaux.

L'outil de calcul des émissions est utilisé pour estimer les émissions de 4 grands secteurs principaux :

- trafic routier,
- industriel,
- résidentiel/tertiaire,
- agricole.

Le calcul d'émission consiste à croiser des données d'activité (comptage routier, cheptels, consommation énergétique, etc.) avec des facteurs d'émission relatifs à cette activité.

L'inventaire des émissions référence une trentaine de substances avec les principaux polluants réglementés (NO_x, particules en suspension, NH₃, SO₂, CO, benzène, métaux lourds, HAP, COV, etc.) et les gaz à effet de serre (CO₂, N₂O, CH₄, etc.).

Les quantités d'émissions sont disponibles à l'échelle de la commune, de la communauté de communes, du département de la région, avec une définition pouvant aller de l'hectare à l'axe routier.

La mise à jour de l'inventaire est faite annuellement en fonction de la disponibilité des données.

Outre les données d'émission du trafic routier calculées à partir des données de trafic fournies par TISSEO Collectivités, les émissions des secteurs de l'industrie, du résidentiel tertiaire et de l'agriculture sont intégrés dans la réalisation de la cartographie des concentrations sur le domaine d'étude.

L'industrie

Atmo Occitanie est chargé d'effectuer les inventaires d'émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre, et de les mettre à jour suivant un guide méthodologique mis en place dans le cadre de l'arrêté du 24 août 2009 relatif au Système National d'Inventaires d'Émissions et de Bilans dans l'Atmosphère (SNIEBA), le Pôle de Coordination nationale des Inventaires Territoriaux (PCIT) associant :

- le Ministère en charge de l'Environnement,
- l'INERIS,
- le CITEPA,
- les Associations Agréées de Surveillance de Qualité de l'Air.

Ce guide constitue la référence nationale à laquelle chaque acteur local doit se rapporter pour l'élaboration des inventaires territoriaux.

Les émissions issues du secteur industriel sont déterminées d'une part à partir des déclarations annuelles d'émissions faites auprès de la DREAL (base Installations Classées Pour l'Environnement) et d'autre part à partir des données relatives aux emplois par secteurs d'activité (INSEE). Pour les polluants pour lesquels les informations ne sont pas disponibles, Atmo Occitanie calcule une estimation de ces émissions à partir de caractéristiques de l'activité (consommation énergétique, production, etc.) du site, et de facteurs d'émissions provenant du guide OMINEA du CITEPA. Les activités des carrières, des chantiers et travaux de BPT sont prise en compte grâce aux quantités d'extraction et surface permettant de calculer les émissions de particules fines.

Ainsi Atmo Occitanie suit **l'évolution des émissions** de l'ensemble des installations classées de la région Midi-Pyrénées depuis 2008, et met à jour **annuellement** ces données.

Le résidentiel / tertiaire

Les émissions sont essentiellement dues aux dispositifs de chauffage et ont été déterminées à partir des données de consommation d'énergie (gaz naturel, fioul, bois, électricité, etc.) à l'échelle communale. Dans le cas où les données de consommation ne sont pas disponibles, des données statistiques sont alors utilisées prenant en compte la composition des logements sur le territoire et l'activité économique.

L'agriculture

Atmo Occitanie utilise les données issues du recensement agricole réalisé par l'AGRESTE au sein des services de la DRAAF. Elles permettent de disperser des données d'activités agricoles à l'échelle communale sur l'ensemble de la région. La culture des sols engendre, au-delà des émissions liées à l'utilisation de machines munies de moteurs thermiques, des émissions dues aux labours des sols et aux réactions consécutives à l'utilisation de

fertilisants. L'élevage se traduit par des émissions liées, d'une part, à la fermentation entérique et, d'autre part, aux réactions chimiques engendrées par les déjections animales.

Le transport hors trafic routier

Deux autres moyens de transport peuvent faire l'objet d'estimation des émissions :

- Les émissions du secteur aérien sont estimées selon la disponibilité des données sur les communes d'implantation des aéroports de la région.
- Les émissions dues au trafic ferroviaire sont estimées pour les communes traversées par les lignes de chemin de fer et selon les données disponibles (SNCF Réseau, ...)

Les autres données intégrées

Topographie

La topographie n'a pas été intégrée dans cette modélisation.

Pollution de fond

Les choix de caractérisation de la pollution de fond et des sources d'émissions complémentaires au trafic routier à intégrer au modèle sont des étapes déterminantes dans une étude de modélisation en milieu urbain. Pour réaliser ces choix, il est tout d'abord essentiel de comprendre les différentes contributions régionales et locales dans la structure de la pollution urbaine. Celles-ci peuvent ainsi être décrites par le schéma suivant :

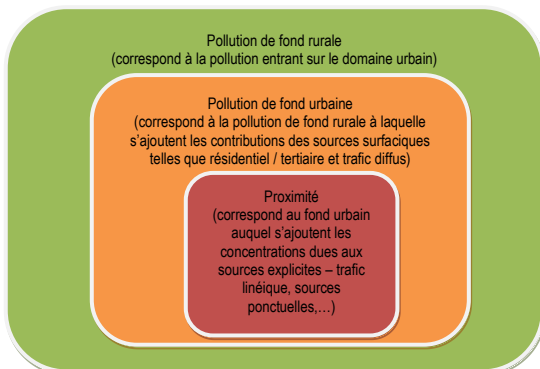


Schéma 2 : Les principales échelles de pollution en milieu urbain

Lorsque l'on s'intéresse à la pollution de fond urbaine au sens d'un modèle, celle-ci diffère sensiblement du fond urbain mesuré par les capteurs. En effet, au sens du modèle, la pollution de fond correspond à la pollution entrant sur le domaine modélisé. Les capteurs pour leur part, lorsqu'ils sont installés sur ce domaine, ne permettent pas de soustraire l'ensemble des sources locales. Ainsi la pollution de fond issue de la station rurale Peyrusse-Vieille dans le Gers est utilisée. Les biais potentiels quant à cette pollution de fond sont ensuite corrigés grâce à l'adaptation statistique.

Facteurs horaires

Les données de sortie d'émissions de l'inventaire sont des données annuelles et/ou horaires sur une année civile complète. Les facteurs horaires sont pris en compte de la manière suivante dans ADMS :

- Un facteur horaire moyen par type de voiries et par jour de la semaine est attribué à chaque axe routier pris en compte dans la modélisation.
- Pour les lignes de bus, un profil horaire moyen est attribué pour chaque ligne et par type de jour de la semaine (ouvré, samedi et dimanche). Un profil horaire moyen est également attribué pour chaque mois de l'année. Ces profils sont définis à partir des fréquences horaires réelles de passage des bus
- un facteur horaire constant est utilisé pour le secteur industriel
- un facteur horaire moyen sur la zone pour l'ensemble des émissions surfaciques (trafic surfacique, résidentiel/tertiaire, agriculture) est calculé. Ce calcul provient d'une moyenne pondérée entre les émissions horaires du trafic routier et celles du secteur résidentiel tertiaire sur l'ensemble du domaine d'études

Données météorologiques

La modélisation est réalisée pour obtenir des concentrations horaires. Les calculs de dispersion ont donc été menés à partir des mesures horaires de plusieurs paramètres météorologiques (vitesse et direction du vent, couverture nuageuse, température, etc.) fournies par la station météorologique de Toulouse Blagnac, station la plus proche de la zone d'études.

Spatialisation de la population

Les données de population spatialisées sur l'Occitanie selon la méthodologie nationale "MAJIC" (Létinois, 2014 et 2015) sont fournies par le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air. Les données résultantes sont des nombres d'habitants par bâtiment ou des nombres d'habitants agrégés par maille.

Post traitement de la modélisation

Adaptation statistique de données

Les sorties brutes de modèles de dispersion tels qu'ADMS correspondent rarement à la réalité des concentrations mesurées. En effet, différents effets sont difficilement pris en compte par la modélisation :

- Les surémissions de certains polluants dues à des bouchons suite à un accident
- La pollution de fond sur laquelle vient s'ajouter la dispersion des sources prises en compte (trafic routier, industrie, chauffage, etc.). En effet l'évolution de la pollution de fond entre deux heures consécutives est difficilement prise en compte par les modèles de dispersion.
- L'apport de pollution provenant de l'extérieur de la zone de modélisation

Ces différents points sont les sources principales de différence entre les sorties brutes de la modélisation et les mesures. L'hypothèse retenue dans cette méthodologie est que cette différence est homogène sur la zone d'étude et peut être représentée par un biais moyen horaire. Le but de l'adaptation statistique est donc d'estimer ce biais moyen sur la zone pour chaque heure de l'année et pour chaque polluant.

Sur l'agglomération toulousaine, les stations de fond d'Atmo Occitanie sont utilisées pour estimer ce biais horaire.

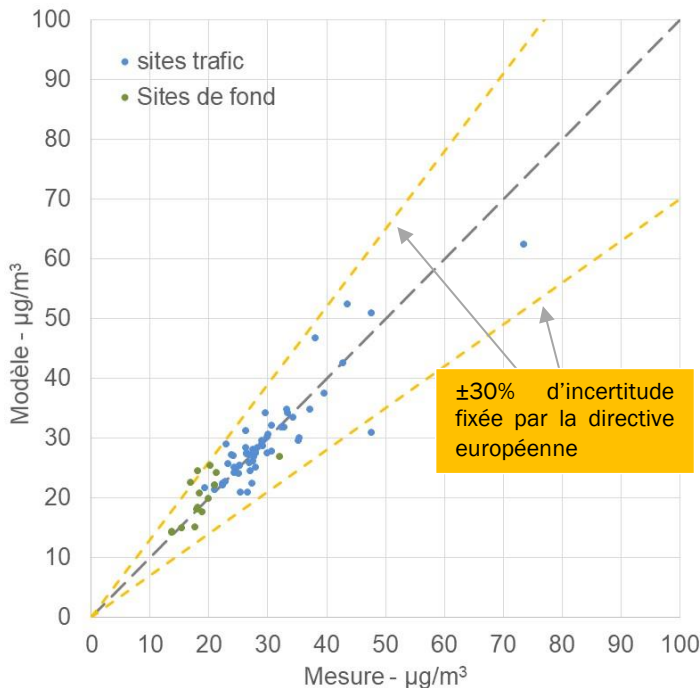
Interpolation des données

Les données de sortie de modélisation ne sont pas spatialement homogènes dans le domaine d'études. Aussi avant de créer une cartographie des concentrations, une interpolation par pondération inverse à la distance est effectuée sur une grille régulière.

METHODOLOGIE DE LA VALIDATION DU MODELE

Un modèle performant

Les critères statistiques utilisés pour valider le modèle ont été choisis en tenant compte des recommandations du faites par J.C. Chang et S. R. Hanna dans leurs mesures de la performance de modèles de qualité de l'air¹.



Dans le tableau ci après, nous indiquons les performances statistiques du modèle relativement aux concentrations moyennes annuelles en NO₂ modélisées et observées sur le domaine d'études.

¹ J.C Chang and S. R Hanna : Air quality model performance evaluation, Meteorology and Atmospheric Physics 87, 167–196 (2004)

Cartographie et Impact sur les populations

Les cartes de dispersion de la pollution sont obtenues en géo référençant l'interpolation des données décrites précédemment avec un Système d'Information Géographique (SIG).

Les cartes issues du SIG permettent de suivre l'évolution de la pollution sur une zone donnée en comparant les cartes sur plusieurs années.

Les concentrations interpolées de polluants dépassant les valeurs réglementaires sont croisées avec les données de population sur chaque point de grille ce qui permet à la fois de cartographier les zones de populations les plus touchées par la pollution mais aussi d'estimer le nombre d'habitants soumis à des taux de pollution dépassant les valeurs réglementaires.

| Indicateurs statistiques | Modèle 74 observations | Caractéristiques d'un modèle performant |
|--------------------------|------------------------|---|
| FB | -0.001 | -0.3 < FB < 0.3 |
| MG | 0.99 | -0.7 < MG < 1.3 |
| NMSE | 0.02 | NMSE <=2 |
| VG | 1.02 | VG < 1.6 |
| FAC2 | 1 | FAC2 > 0.5 |
| r | 0.91 | Le plus proche de 1 |

Les valeurs proches de 0 du biais fractionnel (FB) indiquent qu'en moyenne, le modèle tend à bien estimer les valeurs observées. Le tracé mesure / modèle indique une légère surestimation des concentrations modélisées dans les plus faibles concentrations.

NMSE permet de juger de l'erreur relative commise par le modèle. Plus NMSE est faible, plus les concentrations simulées par le modèle sont proches des observations. Le NMSE obtenu pour le modèle est correct.

L'indicateur logarithmique VG est autant sensible aux valeurs fortes qu'aux valeurs faibles. Proche de 1, l'écart entre mesure et observation est assez faible.

FAC2 renseigne sur la proportion des valeurs simulées à moins d'un facteur 2 des observations. 100% des valeurs simulées sont ainsi à moins d'un facteur 2 des observations.

La corrélation mesure la capacité du modèle à reproduire les variations temporelles des observations. Dans le cas du modèle utilisé, **91%** des concentrations modélisées sont corrélées avec les mesures.

La directive européenne 2008/50/CE du 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe fixe des objectifs de qualité pour les concentrations modélisées.

Pour le NO₂, l'erreur sur la moyenne annuelle doit être inférieure à $\pm 30\%$ sur les sites de fond (sites en vert sur le graphe). Cette incertitude est représentée par les lignes oranges sur le graphe.

L'erreur sur la moyenne annuelle est calculée selon la formule suivante :

$$\text{Erreur} = \frac{(\text{modèle} - \text{mesure})}{\text{mesure}}$$

Pour les sites de fond, les erreurs sur la moyenne annuelle obtenues en NO₂ sont inférieures à 30%. L'objectif de qualité fixé par la réglementation européenne pour les concentrations modélisées est respecté.

Les critères de performance trouvés dans la littérature sont atteints pour le modèle utilisé lequel peut être considéré comme relativement performant. Les concentrations sont donc correctement modélisées.

Principe de la méthode

Afin de vérifier la validité des résultats obtenus par la modélisation, nous avons utilisé des paramètres statistiques permettant de comparer les résultats de la modélisation aux résultats fournis par les échantillonneurs passifs.

Il existe dans la littérature de nombreux indicateurs ou outils de performance statistiques afin d'évaluer quantitativement la qualité d'un modèle de dispersion atmosphérique.

Le guide "evaluating the performance of Air Quality Models -3 juin 2010" du department for environment, food & Rural Affairs of United Kingdom recommande une certaine simplification et rationalisation en adoptant un nombre limité d'indicateurs statistiques.

Les indicateurs statistiques ont été choisis en suivant les recommandations faites par Chang et Hanna dans leurs mesures de la performance de modèles de qualité de l'air.

Les équations suivantes incluant le biais fractionnaire (FB), l'erreur quadratique moyenne normalisée (NMSE), la variance géométrique (VG), le coefficient de corrélation et la fraction de prédiction comprise dans un facteur 2 (FAC2) ont ainsi été utilisées :

Les performances des deux modèles sont évalués par les indicateurs statistiques suivants (formule indiquée ci-après) :

- le biais fractionnel (fractional bias) FB
- le biais moyen géométrique (MG),
- L'erreur quadratique normalisée ("normalized mean square error") NMSE,
- la variance géométrique (VG),
- Le coefficient de corrélation Corr,
- la fraction de prédiction comprise dans un facteur 2 FAC2.

Un modèle parfait aurait MG, VG, R et FAC2 =1 ; et FB et NMSE = 0.

Notons que, d'après les conventions utilisées, les valeurs de FB sont négatives en cas de sur-estimation, et positives en cas de sous-estimation des valeurs.

Des critères de performances acceptables ont été développés dans Chang et Hanna [2004] et Hanna et al [2004] à partir de l'évaluation de nombreux modèles sur un grand nombre d'expériences.

Un modèle est considéré comme acceptable si :

- $-0.3 < FB < 0.3$;
- $0.7 < MG < 1.3$
- $NMSE < 0.5$,
- $VG < 0.6$
- $0.5 < FAC2$

Présentation des indicateurs statistiques utilisés

On utilise les notations suivantes :

- Co: observation au temps i
- Cp: valeur modélisée au temps i
- N : nombre de couple de valeurs
- Les termes surmontés d'un trait désignent la moyenne temporelle de la grandeur indiquée.

Les différents paramètres présentés ici permettent de quantifier trois types d'erreur :

- l'erreur systématique, qui détermine si le modèle a tendance à sous-estimer ou surestimer globalement la réalité
- l'erreur locale, qui caractérise la "précision" des données du modèle (c'est à dire leur étalement autour de leur moyenne),
- l'erreur totale, qui caractérise la "justesse" globale des données du modèle par rapport à la réalité.

Il est intéressant lorsque l'on compare deux jeux de données de pouvoir estimer ces différents types d'erreur. Dans la suite, le type d'erreur que permet de quantifier chaque paramètre est indiqué.

FB : Biais fractionnel

$$FB = \frac{(\overline{C_o} - \overline{C_p})}{0.5 (\overline{C_o} + \overline{C_p})}$$

Signification : Le biais fractionnel est une normalisation de la valeur du biais. Ceci présente l'avantage de permettre la comparaison des valeurs de ce paramètre obtenues sur des échantillons différents. Ceci permet aussi de pouvoir interpréter la valeur du biais sans avoir à se référer aux données considérées : une même valeur de FB correspond à peu près au même type d'erreur quel que soit le cas étudié ou l'unité utilisée pour exprimer les grandeurs considérées.

Valeur recherchée : 0

Interprétation des valeurs : FB peut être positif ou négatif. Il est sans dimension. Si les valeurs observées et mesurées sont positives ou nulles (comme dans le cas de concentrations), FB est compris entre -2 et 2. Une valeur nulle indique que les données d'observations et les données modélisées ont la même moyenne. Le modèle est donc en mesure de bien restituer la valeur moyenne du paramètre considéré. Toutefois les écarts peuvent être ponctuellement ou systématiquement très importants : il suffit que les écarts positifs compensent les écarts négatifs.

Une valeur positive implique, qu'en moyenne, le modèle sous estime la mesure : la moyenne des données issues du modèle est plus faible que celle des données mesurées. Toutefois ponctuellement, le modèle peut donner une valeur supérieure à la mesure.

Une valeur négative implique qu'en moyenne, le modèle surestime globalement la mesure : la moyenne des données issues du modèle est plus forte que celle des données mesurées. Toutefois ponctuellement, le modèle peut donner une valeur inférieure à la mesure.

Type d'erreur : systématique

NMSE : Normalised mean square error

$$NMSE = \frac{(\overline{C_o} - \overline{C_p})^2}{\overline{C_o} \overline{C_p}}$$

Signification : ce terme qualifie l'erreur totale existant entre observation et mesure. Il est normalisé ce qui présente l'avantage de permettre la comparaison des valeurs de ce paramètre obtenu sur des échantillons différents. Ceci permet aussi de pouvoir interpréter la valeur du NMSE sans avoir à se référer aux données considérées : une même valeur de NMSE correspond à peu près au même type d'erreur quel que soit le cas étudié ou l'unité utilisée pour exprimer les grandeurs considérées.

Valeur recherchée : 0

Interprétation des valeurs : La NMSE est une grandeur positive ou nulle. Elle est sans dimension. Si elle est nulle, les valeurs du modèle sont toutes égales aux valeurs observées. Plus la NMSE est grande, plus l'écart entre mesure et observation est grand. La NMSE ne donne toutefois pas d'indication sur la distribution de cette erreur. Une grande valeur de NMSE peut correspondre soit à un biais fort, soit à un écart type des erreurs fort, soit aux deux à la fois.

Type d'erreur : totale

MG : Geometric Mean Bias

$$MG = \exp(\overline{\ln C_o} - \overline{\ln C_p})$$

Signification : MG est l'exponentielle du biais calculé à partir des logarithmes népériens des valeurs d'observations et des valeurs modélisées. Il donne le même type d'information que la valeur du biais. Toutefois les propriétés du logarithme font que ce paramètre est influencé par l'écart relatif entre les valeurs et non pas par l'écart brut.

Concrètement, pour une même erreur relative, le biais est plus sensible à un écart sur des valeurs fortes que sur des valeurs faibles car la même erreur relative conduira alors à un écart plus grand. MG sera aussi sensible à l'un qu'à l'autre.

Valeur recherchée : 1

Interprétation des valeurs : MG est une grandeur strictement positive. C'est un nombre sans dimension. Une valeur égale à 1 indique que les données d'observations et les données modélisées ont la même moyenne. Le modèle est donc en mesure de bien restituer la valeur moyenne du paramètre considéré. Toutefois les écarts peuvent être ponctuellement ou systématiquement très importants : il suffit que les écarts positifs compensent les écarts négatifs.

Une valeur supérieure à 1 implique qu'en moyenne, le modèle sous estime la mesure : la moyenne des données issues du modèle est plus faible que celle des données mesurées. Toutefois ponctuellement, le modèle peut donner une valeur supérieure à la mesure.

Une valeur inférieure à 1 implique, qu'en moyenne, le modèle surestime globalement la mesure : la moyenne des données issues du modèle est plus forte que celle des données mesurées. Toutefois ponctuellement, le modèle peut donner une valeur inférieure à la mesure.

Type d'erreur : systématique

VG : Geometric Mean Variance

$$VG = \exp\left[\overline{(\ln C_o - \ln C_p)^2}\right]$$

Signification : VG est l'exponentielle du carré du RMSE calculé à partir des logarithmes népériens des valeurs

d'observations et des valeurs modélisées. Il donne le même type d'information que la valeur du RMSE. Toutefois les propriétés du logarithme font que ce paramètre est influencé par l'écart relatif entre les valeurs et non pas par l'écart brut. Concrètement, pour une même erreur relative, le RMSE est beaucoup plus sensible à un écart sur des valeurs fortes que sur des valeurs faibles car la même erreur relative conduira alors à un écart plus grand. VG sera aussi sensible à l'un qu'à l'autre.

Valeur recherchée : 1

Interprétation des valeurs : VG est une grandeur supérieure ou égale à 1. C'est un nombre sans dimension. Si elle est égale à 1, les valeurs du modèle sont toutes égales aux valeurs observées. Plus VG est grand, plus l'écart entre mesure et observation est grand. La VG ne donne toutefois pas d'indication sur la distribution de cette erreur. Une grande valeur de VG peut correspondre soit à un biais fort, soit à un écart type des erreurs fort, soit aux deux à la fois.

Type d'erreur : locale

FAC2 :Factor of Two

FAC2 = fraction of data that satisfy $0.5 \leq \frac{C_p}{C_o} \leq 2.0$

Signification : Le FAC2 représente la fraction des données simulées qui sont en accord avec les données mesurées à un facteur 2 près.

Valeur recherchée : 1

Interprétation des valeurs : FAC2 est une grandeur comprise entre 0 et 1. Il est sans dimension. Une valeur nulle indique qu'aucune des données modélisées ne se trouve dans l'intervalle cité plus haut. Une valeur égale à 1 implique que les inégalités citées plus haut sont vérifiées pour chacune des valeurs simulées. Elle ne garantit pas une adéquation parfaite entre mesure et observation.

Type d'erreur : totale

R : Coefficient de corrélation linéaire

$$R = \frac{(C_o - \overline{C_o})(C_p - \overline{C_p})}{\sigma_{C_p} \sigma_{C_o}}$$

Signification : Ce paramètre permet de qualifier l'intensité de la liaison linéaire existante entre observation et valeur modélisée. Autrement dit, il évalue s'il existe une fonction affine du type $x_i = a \cdot x_i + b$ (avec a et b, 2 constantes) permettant une bonne restitution des valeurs des observations. D'un point de vue graphique, il permet de savoir s'il est possible de tracer une droite constituant une bonne approximation du nuage de points représentant les couples "observations/valeurs modélisées".

Valeur recherchée : 1 ou -1 (une valeur proche de -1 dénote toutefois un comportement étrange du modèle mais démontre sa bonne capacité de prévision moyennant une correction simple. Ce genre de cas met souvent en évidence une erreur grossière et facilement corrigéable au sein du modèle, ou dans le traitement des données).

Interprétation des valeurs : R est toujours compris entre -1 et 1. Si la valeur absolue de R est égale à 1, l'ensemble des valeurs observées peut être calculé à partir des valeurs modélisées par l'application d'une fonction affine (facilement calculable). Autrement dit, il est possible de construire une droite passant exactement par l'ensemble des points correspondant aux couples "observations/valeurs modélisée". Le signe de R donne alors le signe de la pente de cette droite ou encore le sens de variation de la fonction linéaire reliant observation et modèle : croissante si R est positif, décroissante si R est négatif.

Une valeur égale à 0, implique une absence de liaison linéaire entre les deux séries de données (modélisées et mesurées) c'est à dire qu'il n'existe pas de fonction affine qui, appliquée aux données modélisées, permette une amélioration de l'estimation des valeurs observées.

Les valeurs intermédiaires traduisent une plus ou moins grande importance de la liaison linéaire existante entre les valeurs observées et les valeurs modélisées. Le signe de R donne alors le comportement relatif global des données modélisées et observées : si R est positif, les valeurs modélisées tendent à croître lorsque les valeurs observées croissent. L'inverse se produit lorsque R est négatif.

Type d'erreur : locale

ANNEXE VI – GÉNÉRALITÉS SUR LES PRINCIPAUX POLLUANTS ÉTUDIÉS

NO₂ LE DIOXYDE D'AZOTE

Sources

Le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO₂) sont émis lors des phénomènes de combustion. Le dioxyde d'azote est un polluant secondaire issu de l'oxydation du NO. Les sources principales sont les véhicules (près de 60%) et les installations de combustion (centrales thermiques, chauffages...).

Le pot catalytique a permis, depuis 1993, une diminution des émissions des véhicules à essence. Néanmoins, l'effet reste encore peu perceptible compte tenu de l'âge moyen des véhicules et de l'augmentation forte du trafic automobile. Des études montrent qu'une fois sur 2 les européens prennent leur voiture pour faire moins de 3 km, une fois sur 4 pour faire moins de 1 km et une fois sur 8 pour faire moins de 500m ; or le pot catalytique n'a une action sur les émissions qu'à partir de 10 km.

PM₁₀, PM_{2,5} LES PARTICULES

PM = Particulate Matter (matière particulaire)

Sources

Les particules peuvent être d'origine naturelle (embruns océaniques, éruption volcaniques, feux de forêt, érosion éolienne des sols, pollens ...) ou anthropique (liées à l'activité humaine). Dans ce cas, elles sont issues majoritairement de la combustion incomplète des combustibles fossiles (circulation automobile, centrale thermique, sidérurgie, cimenteries, incinération de déchets, manutention de produits pondéraux, minerais et matériaux,...).

Une partie d'entre elles, les particules secondaires, se forme dans l'air par réaction chimique à partir de polluants précurseurs comme les oxydes de soufre, les oxydes d'azote, l'ammoniac et les COV. On distingue les particules de diamètre inférieur à 10 microns (PM₁₀), à 2,5 microns (PM_{2.5}) et à 1 micron (PM₁).

Effets sur la santé

Le dioxyde d'azote est un gaz irritant qui pénètre dans les plus fines ramifications des voies respiratoires. Dès que sa concentration atteint 200 µg/m³, il peut entraîner une altération de la fonction respiratoire, une hyper réactivité bronchique chez l'asthmatique et un accroissement de la sensibilité des bronches aux infections chez l'enfant.

Effets sur l'environnement

Les oxydes d'azote participent aux phénomènes des pluies acides, à la formation de l'ozone troposphérique, dont ils sont l'un des précurseurs, à l'atteinte de la couche d'ozone stratosphérique et à l'effet de serre.

Effets sur la santé

Plus une particule est fine, plus sa toxicité potentielle est élevée.

Les plus grosses particules sont retenues par les voies aériennes supérieures. Les plus fines pénètrent profondément dans l'appareil respiratoire où elles peuvent provoquer une inflammation et altérer la fonction respiratoire dans son ensemble. Les particules ultra fines sont suspectées de provoquer également des effets cardio-vasculaires. Certaines particules ont des propriétés mutagènes et cancérigènes : c'est notamment le cas de certaines particules émises par les moteurs diesel qui véhiculent certains hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Une corrélation a été établie entre les niveaux élevés de PM₁₀ et l'augmentation des admissions dans les hôpitaux et des décès, liés à des pathologies respiratoires et cardiovasculaires.

Ces particules sont quantifiées en masse mais leur nombre peut varier fortement en fonction de leur taille.

Effets sur l'environnement

Les effets de salissures des bâtiments et des monuments sont les atteintes à l'environnement les plus évidentes.



L'information sur la **qualité de l'air** en **Occitanie**

www.atmo-occitanie.org