AtmoSud

Inspirer un air meilleur



Projet d'électrification frugale de la ligne ferroviaire entre Aix-en-Provence et Marseille

Octobre 2021

RÉSUMÉ :
PROJET D'ELECTRIFICATION FRUGALE DE LA LIGNE FERROVIAIRE ENTRE AIX-EN-PROVENCE ET MARSEILLE
Octobre 2021

Cette étude répond aux questions de la SNCF sur les évolutions de la qualité de l'air entre le projet MGA2, qui permet une augmentation de capacité pour les circulations ferroviaires (passage de 3 trains/h /sens à 4 trains/h/sens) entre les gares d'Aix-en-Provence et Marseille, et le projet d'électrification frugale utilisant une propulsion alternative sur batterie sur le même volume de circulations.

Une évaluation globale portant sur les émissions et les concentrations en air ambiant a été réalisée pour étudier les impacts sur la qualité de l'air du projet de modernisation de la ligne ferroviaire entre Aix-en-Provence et Marseille. Une évaluation supplémentaire des impacts en gare d'Aix-en-Provence a également été réalisée.

► Une baisse attendue des émissions du ferroviaire

Le scénario avec une propulsion alternative sur batterie devrait permettre **une diminution significative des émissions** par rapport au scénario MGA2 :

- Emissions énergétiques sur la ligne : - 60 % pour les PM10, PM2.5, NOx et - 80 % pour le CO_2
- Emissions énergétiques en gare d'Aix-en-Provence : de -90 % à -97% pour les PM10, PM2.5, NOx et CO_2

L'augmentation des **émissions non énergétiques**, dues à l'usure des équipements par frottement, est **non significative** entre le scénario MGA2 et le scénario avec batterie avec une variation de +0.5% pour les PM10 et PM2.5.

Le scénario avec une propulsion alternative sur batterie devrait également permettre une diminution significative des émissions par rapport à la situation de référence 2016 sur l'ensemble de la ligne et en gare d'Aix-en-Provence.

► Une amélioration de la qualité de l'air avec le projet d'électrification frugale

L'impact du ferroviaire sur les concentrations en NO_2 au niveau de la gare de Aix-en-Provence et tout au long de la ligne jusqu'à Marseille **est faible,** à l'exception des têtes de tunnel où la contribution en NO_2 peut atteindre de l'ordre de 10µg.m^{-3}. La contribution de ce secteur d'activité aux concentrations en particules fines (PM10 et PM2.5) n'est pas significative.

Le scénario MGA2 entrainerait une légère dégradation de la qualité de l'air. La contribution supplémentaire du ferroviaire en gare d'Aix-en-Provence (+2 µg/m^3) dans un environnement proche des seuils pourrait faire apparaitre localement des dépassements en NO_2. L'augmentation moyenne sur l'ensemble du parcours est faible (+0.3 µg/m^3). Les têtes de tunnel en milieu urbain resteraient des zones à surveiller.

Le **scénario avec une propulsion alternative sur batterie** permettrait de limiter l'impact du ferroviaire sur la qualité de l'air. Cette solution est **efficace pour réduire les niveaux en NO_2** induits par le trafic ferroviaire. La baisse moyenne sur l'ensemble du parcours et en gare d'Aix-en-Provence (-1 µg/m^3 par rapport à la situation de référence 2016) permettrait une amélioration. Ce scénario permettrait également d'**encourager l'usage des transports en commun.**

Rédaction :	**Revue :**	**Approbation :**
Morgane Imbertesche morgane.imbertesche@atmosud.org Romain Derain romain.derain@atmosud.org	Damien Piga damien.piga@atmosud.org	Edwige Révélat edwige.revelat@atmosud.org
Contact :	**Date de parution :**	**Références :**
Patricia Lozano patricia.lozano@atmosud.org	01/03/2021	23PT0913

REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement les équipes de SNCF Réseau pour la transmission des données nécessaires à la réalisation de cette étude ainsi que pour les échanges techniques de qualité sur l'utilisation et l'interprétation de ces données.

PARTENAIRES

SNCF Réseau



SOMMAIRE

1. Contexte de l'étude 7

2. Données de l'étude 9

2.1 Description du projet de modernisation de la ligne Marseille Aix par la SNCF Réseaux 9

2.2 Données d'exploitation utilisées pour l'étude 10

2.2.1 Typologies des engins 10
2.2.2 Trafics et consommation de carburant 10
2.2.3 Facteurs d'émissions 11
2.2.4 Hypothèse de travail 11

2.3 Scénarios étudiés 12

2.4 Polluants étudiés 12

3. Impact des trains en circulation sur la ligne ferroviaire entre Aix-en-Provence et Marseille 13

3.1 Consommations de gazole des trains en circulation 13

3.2 Émissions atmosphériques des trains en circulation 14

3.2.1 Émissions non énergétiques 14
3.2.2 Émissions énergétiques 15
3.2.3 Émissions indirectes 17

3.3 Impact sur les concentrations en air ambiant 17

3.3.1 État de référence 2016 17
3.3.2 Scénario A (MGA2) 19
3.3.3 Scénario B (batterie) 20
3.3.4 Évolution entre la référence 2016 et les différents scénarii 2022 22
3.3.5 Les autres polluants particulaires 22

4. Étude en gare d'Aix-en-Provence 24

4.1 Émissions atmosphériques des trains en gare d'Aix-en-Provence 24

4.1.1 Comparaison des scénarios en gare d'Aix-en-Provence 24
4.1.2 Évolution horaire des émissions en gare d'Aix-en-Provence 25

4.2 Concentrations en air ambiant en gare d'Aix-en-Provence 26

4.2.1 État de référence 2016 26
4.2.2 Scénario A (MGA2) 27
4.2.3 Scénario B (Batterie) 29
4.2.4 Évolution entre la référence 2016 et les différents scénarios 30
4.2.5 Les autres polluants particulaires 31

5. Conclusion 32

GLOSSAIRE 33

ANNEXES 37

Calcul des émissions 47

Méthode de calcul des émissions sur les voies entre Aix-en-Provence et Marseille 47
Méthode de calcul des émissions en gare d'Aix-en-Provence 48

Calcul des consommations 49

Calcul des concentrations en air ambiant 49

Outil numérique utilisé 49
Données d'entrée et hypothèses pour la modélisation 49

Cartographies pour les particules PM10 51

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Données de trafic, de consommation et de parcours - Ligne Aix en Provence – Marseille (hypothèses de mars 2020) 10
Tableau 2 : Temps et rotation en gare d'Aix-en-Provence 10
Tableau 3 : Facteurs d'émission par type d'engins et par polluants - Engins en circulation 11
Tableau 4 : Facteurs d'émissions par type d'engins et par polluants - Engins au ralenti 11
Tableau 5: Consommation de diesel suivant les scénarios et gain par rapport à l'année de référence 13
Tableau 6: Émissions non énergétiques, énergétiques et indirectes calculées pour chacun des scénarios 14
Tableau 7 : Variations relatives des émissions énergétiques entre les différents scénarios et l'année de référence 16
Tableau 8 : Synthèse des émissions en gare d'Aix-en-Provence 24
Tableau 9 : Nomenclature SNAP pour le secteur ferroviaire 47
Tableau 10 : Facteur de consommation et facteur d'émission du CO_2 électriques. 48

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Contribution par engins à la consommation totale de gazole pour chaque scénario sur la ligne Aix-Marseille 13
Figure 2 : Émissions non énergétiques des trains en circulation 15
Figure 3 : Émissions énergétiques des trains en circulation 16
Figure 4 : Cartographies des concentrations du NO_2 pour l'année de référence 2016, à gauche toutes sources – à droite contribution du ferroviaire uniquement. Ligne ferroviaire mise en évidence par un masque de transparence 18
Figure 5 : Cartographies des concentrations du NO_2 pour l'année 2022 avec le scénario A (MGA2), à gauche toutes sources – à droite contribution du ferroviaire uniquement 19
Figure 6 : Tunnel ferroviaire engendrant une surconcentration en milieu urbain 20
Figure 7 : Cartographies des concentrations du NO_2 pour l'année 2022 avec le scénario B (batterie), à gauche toutes sources – à droite contribution du ferroviaire uniquement 21
Figure 8 : Cartographies des différences absolues des concentrations en NO_2 entre le scénario B et le scénario A (à gauche) et le scénario B et la référence 2016 (à droite) 23
Figure 9 : Synthèse des émissions en gare d'Aix-en-Provence 24
Figure 10 : Évolution des émissions horaires au cours d'une journée en gare d'Aix-en-Provence Haut : scénario A – Bas : scénario B 25
Figure 11 : Cartographie des concentrations du NO_2 pour l'année de référence 2016 26
Figure 12 : Cartographie des concentrations du NO_2 pour l'année de référence 2016, contribution du ferroviaire uniquement 27
Figure 13 : Cartographie des concentrations du NO_2 pour l'année 2022 avec le scénario A (MGA2) 28
Figure 14 : Cartographie des concentrations du NO_2 pour l'année 2022 avec le scénario A (MGA2), contribution du ferroviaire uniquement 28
Figure 15 : Cartographie des concentrations du NO_2 pour l'année 2022 avec le scénario B (Batterie) 29
Figure 16 : Cartographie des concentrations du NO_2 pour l'année 2022 avec le scénario B (Batterie), contribution du ferroviaire uniquement 29
Figure 17 : Cartographie des différences absolues des concentrations en NO_2 entre le scénario B et le scénario A 30
Figure 18 : Cartographie des différences absolues des concentrations en NO_2 entre le scénario B (Batterie 2022) et la référence 2016 30
Figure 19 : Cartographie des concentrations en PM10 pour l'année de référence 2016 31
Figure 20 : Cartographie des concentrations en PM2.5 pour l'année de référence 2016 31
Figure 21 : Carte de l'indicateur combiné (ISA 2018) des concentrations de NO_2, PM10 et O_3 38
Figure 22 : Pourcentage de contribution de chaque secteur par polluant sur la région Sud, année 2016 (source : inventaire version 6) 39
Figure 23 : Pourcentage de contribution de chaque secteur de transport par polluant sur la région Sud, année 2016 (source : inventaire version 6) 40
Figure 24 : Pourcentage de contribution de chaque secteur par polluant sur la commune d'Aix-en-Provence, année 2016 (source : inventaire version 6) 41
Figure 25: Les classes de taille des particules 43
Figure 26 : source d'émission linéaire pour les trains en gare 50
Figure 27 : source d'émission linéaire pour les trains en circulation 50

Figure 28 : Cartographies des concentrations en PM10 pour l'année de référence 2016, à gauche toutes sources – à droite contribution du ferroviaire uniquement 51
Figure 29 : Cartographies des concentrations en PM10 pour l'année 2022 avec le scénario A (MGA2), à gauche toutes sources – à droite contribution du ferroviaire uniquement 52
Figure 30 : Cartographies des concentrations en PM10 pour l'année 2022 avec le scénario B (Batterie), à gauche toutes sources – à droite contribution du ferroviaire uniquement 53
Figure 31 : Cartographies des concentrations en PM2.5 pour l'année de référence 2016, à gauche toutes sources – à droite contribution du ferroviaire uniquement 54
Figure 32 : Cartographies des concentrations en PM2.5 pour l'année 2022 avec le scénario A (MGA2), à gauche toutes sources – à droite contribution du ferroviaire uniquement 55
Figure 33 : Cartographies des concentrations en PM2.5 pour l'année 2022 avec le scénario B (Batterie), à gauche toutes sources – à droite contribution du ferroviaire uniquement 56

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 Zones à enjeux et exposition des populations 38
ANNEXE 2 Les sources de pollutions de l'air 39
ANNEXE 3 Polluants visés par l'étude 42
ANNEXE 4 Effets sur la santé et sur l'environnement 44
ANNEXE 5 Réglementation et recommandations OMS 45
ANNEXE 6 Méthodologie déployée dans le cadre de cette étude 47
ANNEXE 7 Impacts des trains en circulation sur les concentrations en air ambiant : polluants particulaires 51

1. Contexte de l'étude

► Contexte général sur la qualité de l'air

Le territoire de la métropole Aix-Marseille Provence cumule une forte densité de population, avec 1 860 000 habitants, ainsi que des espaces naturels remarquables : calanques, massifs… Cependant, les sources d'émissions y sont nombreuses et variées avec des grandes agglomérations et zones urbanisées, des réseaux de trafic routiers, autoroutiers, maritimes et ferroviaires, de grands pôles industriels, pétrochimiques, maritimes et aéroportuaires et des pôles d'activités.

La France fait actuellement l'objet de deux procédures précontentieuses européennes pour non-respect des valeurs limites de particules (PM_{10}) et de dioxyde d'azote (NO_2) et pour insuffisance de plans d'actions en vue de réduire cette pollution chronique. L'agglomération Aix-Marseille est directement visée par ces deux procédures.

► Chiffres-clés de la qualité de l'air sur la Métropole Aix-Marseille-Provence

- De 22 à 29 épisodes de pollution par an entre 2017 et 2020 (PM10 et O_3 confondus)
- Une baisse des émissions de polluants est constatée sur le territoire : -32 % pour le NO_2 depuis 2000 et -50 % pour le SO_2 en 20 ans. Cependant cette dynamique est inégale selon les secteurs.
- 55 000 métropolitains exposés au-delà de la valeur limite pour la santé humaine (polluant NO_2) et, lorsqu'on s'attache à la ligne directrice OMS plus sévère : 77 % de la population de la métropole est concernée (polluant : PM10)
- Des secteurs sensibles : centre urbain de Marseille avec 30 000 personnes exposées, quartiers sud-ouest d'Aix-en-Provence et Martigues avec un millier de personnes exposées, et la zone industrielle de l'étang de Berre (66 communes) pour laquelle une première évaluation des risques sanitaires met en évidence cette zone à enjeu.

Plus de détail en ANNEXE 1.

► Modernisation de la ligne ferroviaire Aix-Marseille et étude préliminaire

La SNCF a engagé depuis 2016 plusieurs travaux visant à moderniser la ligne ferroviaire entre Aix-en-Provence et Marseille. Ces travaux permettront d'augmenter le nombre d'utilisateurs de cette ligne en augmentant les fréquences de rotations et devraient entrainer un report modal des utilisateurs des transports routiers individuels vers une solution de transport en commun.

En 2019, une première étude[1] réalisée par AtmoSud a caractérisé les évolutions d'émissions impliquées par ces nouveaux aménagements, entre le scénario de référence (2016) et le scénario MGA2 (scénario A) de doublement des rotations entre les gares d'Aix-en-Provence et Marseille. Les contributions et évolutions attendues des émissions du secteur des transports routiers et non routiers ont également été étudiées dans le cadre de cette étude.

AtmoSud a réalisé ces évaluations tant au niveau de la quantification des émissions qu'au niveau de la thématique environnement et qualité de l'air de façon plus globale (quartier gare d'Aix-en-Provence et gare Saint-Charles à Marseille), avec des développements sur les thèmes suivants :

- Diagnostic de la qualité de l'air sur Aix-en-Provence et Marseille ;
- Mise à jour de l'inventaire des émissions du secteur ferroviaire en Provence-Alpes-Côte d'Azur ;
- Impact du projet de modernisation de la ligne Aix-Marseille sur les émissions de polluants atmosphériques ;
- Impact global du projet de modernisation sur les transports.

Les résultats de cette première étude ont servi de base pour l'évaluation du nouveau projet et ont permis de réaliser une synthèse globale.

[1] https://www.atmosud.org/sites/paca/files/atoms/files/191217_sncf_rapport-emissions-lignesncf-aixmarseille-vf.pdf

► Objectifs de cette étude

Cette seconde étude a pour nouvel objectif d'étudier les évolutions de la qualité de l'air du projet MGA2 de doublement des rotations entre les gares d'Aix-en-Provence et Marseille (scénario A) et du projet utilisant une propulsion alternative sur batterie (scénario B). Ces évolutions sont à comparer à la situation de référence avant-projet, l'année de référence 2016.

Une évaluation supplémentaire des impacts à fine échelle en gare d'Aix-en-Provence est réalisée. Elle permet d'estimer l'impact de l'augmentation du trafic en gare dans la configuration du projet MGA2 (scénario A) ainsi que dans le scénario de fonctionnement sur batteries (scénario B). Ce second scénario doit permettre la recharge des batteries lors du stationnement en gare et donc de limiter les émissions atmosphériques.

► Contexte règlementaire de l'étude

Cette étude répond à une volonté propre de la SCNF d'évaluer l'impact des évolutions de son réseau sur la qualité de l'air. L'étude est donc non réglementaire. Il n'existe ainsi pas d'encadrement strict des méthodes et polluants à surveiller. Les polluants retenus par AtmoSud sont ceux sur lesquels un impact du projet est attendu, sur lesquels des dépassements de normes réglementaires dans le domaine d'étude sont observés et ceux entrant dans le cadre d'études sur les transports[2].

[2] Liaison routière Fos-Salon, AtmoSud 2020 - https://fos-salon.debatpublic.fr/images/documents/dmo/dmo-fos-salon-etudes-complementaires-premiers-elements-et-enjeux-sur-qualite-de-lair.pdf

2. Données de l'étude

2.1 Description du projet de modernisation de la ligne Marseille Aix par la SNCF Réseaux

Source : SNCF Réseau

Un projet qui va faciliter le quotidien des habitants

UN PROJET QUI VA FACILITER LE QUOTIDIEN DES HABITANTS EN COMPLÉMENT DE LA 1ÈRE PHASE DE MODERNISATION QUI A ESSENTIELLEMENT PORTÉ SUR UN RENFORCEMENT DE LA DESSERTE INTRA-MARSEILLAISE.

La 2nde phase de modernisation de la ligne offrira, des trains plus rapides, plus fréquents et plus fiables

Plus de trains : une fréquence de desserte plus régulière sera rendue possible avec la mise en place d'un train toutes les 15 minutes entre les principaux pôles de Marseille, St Antoine, Simiane, Gardanne et Aix-en-Provence, au lieu de toutes les 20 minutes. Les haltes périurbaines seront desservies toutes les 30 minutes au lieu de toutes les 40 minutes,

Plus de fiabilité grâce à la modernisation des installations ferroviaires de la gare d'Aix-en-Provence qui seront télécommandées depuis Marseille et là une augmentation du linéaire de double voie ;

Plus de sécurité par la suppression du dernier passage à niveau situé entre Marseille et Aix-en-Provence (Chemin de la Guiramande à Aix-en-Provence) et par la suppression de la traversée à niveau des voies par les piétons en gare d'Aix-en-Provence, remplacée par une passerelle et un ascenseur sur quai ;

Plus de confort et de places assises dans les trains, par la possibilité pour la Région PACA de mettre en place des trains de longue composition ayant une plus grande capacité d'emport, grâce à la mise en œuvre de quais de 220 mètres de long dans les principaux pôles, permettant ainsi d'augmenter le nombre de place assises

Plus de maillage territorial : avec la création de la halte de Plan-de-Campagne, le projet apporte une accessibilité nouvelle pour le territoire en se situant sur une zone de rabattement intéressante par rapport à l'autoroute, tout en desservant un pôle d'activité majeur.

Des aménagements qui profitent à tous

Pour parvenir aux objectifs fixés, plusieurs aménagements sont à l'étude :

LA MODERNISATION DES INSTALLATIONS FERROVIAIRES DE LA GARE D'AIX-EN-PROVENCE

permettra d'accueillir quatre trains par heure et par sens. Des aménagements seront réalisés, notamment l'élargissement du pont de l'avenue Robert-Schuman et la création de murs de soutènement. Ces travaux offriront une solution durable et pérenne pour le développement du ferroviaire autour de l'étoile d'Aix : vers Vitrolles via Plan d'Aillane (ligne Aix-Étang de Berre) et vers le nord d'Aix-en-Provence (Ligne Aix-Meyrargues).

LA SUPPRESSION DU PASSAGE À NIVEAU 110,

entre Aix-en-Provence et Marseille, situé chemin de la Guiramande sur la commune d'Aix-en-Provence. Il sera remplacé par un ouvrage d'art permettant le franchissement de l'infrastructure ferroviaire en toute sécurité.

LE DOUBLEMENT DE LA VOIE FERRÉE SUR 3,5KM ENTRE GARDANNE ET LUYNES

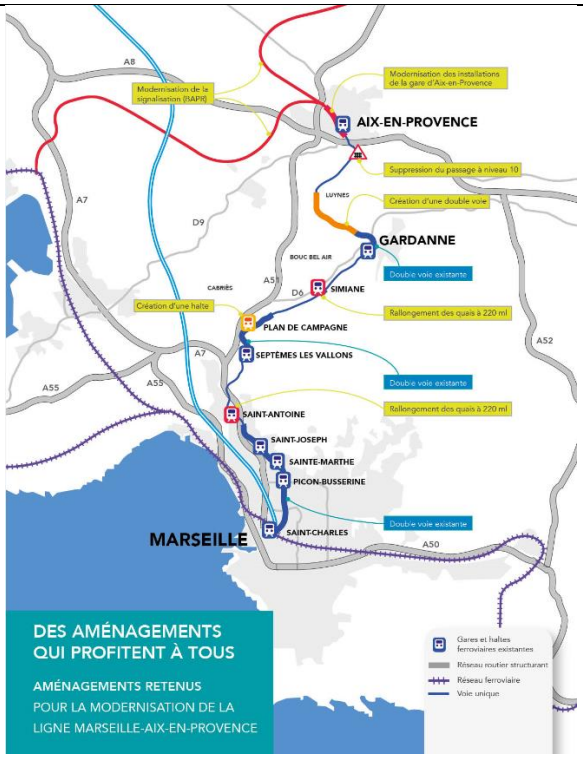
permettra le croisement des trains, entraînant ainsi plus de fluidité sur la ligne et une augmentation de la fréquence. Des mesures environnementales et paysagères sont prévues afin de réduire et compenser les impacts liés à la réalisation de cette double voie.

LE RALLONGEMENT DES QUAIS LATÉRAUX DE LA GARE DE SIMIANE ET DU QUAI CENTRAL DE LA HALTE DE SAINT-ANTOINE,

permettra l'usage sur la ligne de trains de plus grande capacité avec **un train toutes les 15 minutes en heures de pointe** à
destination ou en provenance de Marseille et Aix-en-Provence.

LA CRÉATION DE LA HALTE DE PLAN DE CAMPAGNE

permettra un meilleur maillage du territoire et un accès à la zone commerciale.



Des projets interconnectés pour plus de mobilité

Les projets programmés sur le territoire par l'ensemble des acteurs, représenteront demain une réelle alternative à la voiture et bénéficieront aux habitants de la région avec une offre de transport multimodale :

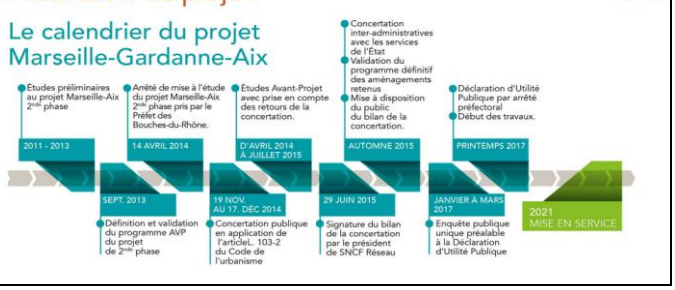
- Priorité aux transports en commun sur autoroute
- Projets de transports collectifs en sites propres
- Modernisation de la ligne Marseille-Gardanne-Aix (2nde phase)
- Accès facilité à ces deux réseaux (pôles d'échanges et parkings relais)

La modernisation de la ligne doit être poursuivie pour accueillir plus de voyageurs et proposer des trains plus rapides et plus réguliers avec de plus grandes capacités, mais ces aménagements ne doivent pas être menés sans reconsidérer plus généralement la mobilité du secteur.

C'est une offre globale, bénéficiant à l'ensemble de la région, qui est en oeuvre afin d'établir un maillage efficace permettant à chacun d'emprunter facilement les transports pour rejoindre l'une des gares comprises entre Aix et Marseille. Les connexions se feront plus simplement et plus efficacement. De même, des infrastructures adaptées, notamment des parkings, permettront de se garer facilement et poursuivre son trajet en train.

Une telle approche favorisera la migration des habitants vers le rail et réduirait les bouchons entre Marseille et Aix en agissant ainsi sur l'environnement par une diminution de la pollution, largement due au trafic routier.

Le calendrier du projet



2.2 Données d'exploitation utilisées pour l'étude

Les différentes données utilisées dans le cadre de cette étude et détaillées dans les sections suivantes sont celles communiquées à AtmoSud et validées par la SNCF au moment de la réalisation de l'étude.

2.2.1 Typologies des engins

Les engins roulants sur la ligne Aix-en-Provence-Marseille se répartissent en 3 catégories :

- Les trains **XTER** effectuant des trajets semi-directs sur la ligne des Alpes. Ce sont des trains roulants munis d'un moteur gazole.
- Les trains **BGC** sont des autorails de grande capacité. Ce sont des trains dits navettes (omnibus ou semi-directs), effectuant des rotations entre les gares de Marseille et d'Aix-en-Provence.

Les trains de marchandises, ou **FRET**. Les trajets de ces trains s'effectuent entre les gares de Gardanne et de Fos / Môle Central.

2.2.2 Trafics et consommation de carburant

Les trafics et les données kilométriques sont fournis par SNCF Réseau. Ces données sont issues de l'application OSMOSE qui regroupe le nombre de kilomètres parcourus pour chaque engin.

Les trafics communiqués étant sur une base de jours ouvrés, les trafics moyens journaliers annuels (TMJA) sont obtenus par le calcul suivant :

$$TMJA = \frac{(T_i * 300)}{360}$$

avec i : Scénario

T : Nb trains par type de motrice

Les facteurs de consommation de carburant sont également fournis par SNCF Réseau. Ils sont issus de l'application ENERGOLD.

L'ensemble de ces données est regroupé dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Données de trafic, de consommation et de parcours - Ligne Aix en Provence – Marseille (hypothèses de mars 2020)

	XTER	BGC	FRET
Trafic 2016 – TMJA [nb]	27.1	30.5	3.77
Trafic 2022 – TMJA [nb]	17.53	71.89	2.74
Consommation moyenne [l/km]	1.7	1.6	3.44
Parcours [km]	36	36	11
Parcours caténaire (projet et batterie) [km]	0	8.5	0

Les temps d'attente en gare d'Aix-en-Provence sont fournis par la SNCF au travers d'un document interne. Les données synthétisées issues de ces documents sont regroupées dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Temps et rotation en gare d'Aix-en-Provence

	XTER	BGC	FRET
Temps moyen en gare [minutes]	2	15	2
Nombre de rotation en gare [nb]	20	46	5

2.2.3 Facteurs d'émissions

Les facteurs d'émissions de polluant des moteurs thermiques en fonctionnement sont mesurés au banc par la SNCF lors de leur homologation. Ils sont regroupés dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Facteurs d'émission par type d'engins et par polluants - Engins en circulation

Série	Type de moteur	Consommation [l/km]	CO [g/km]	NOx [g/km]	PM [g/km]	CO_2 [kg/km]
X72500 Bi-caisses	UIC 1	1.7	7.1	56	0.6	4
X76500 Tri-caisses	Euro 2	3.44	4.2	47	0.9	4.3
X76500 Tri-caisses	Euro 3	3.44	2.5	34	0.2	4.4
Moyenne X76500 – Tri-caisses	-	3.44	3.35	40.5	0.55	4.35
B81500 Quadri-caisses	Euro 3	1.6	2.5	33	0.2	4.2
B81500 Quadri-caisses	Etape IIIA	1.6	3.6	23	0.3	4.6
Moyenne B81500 Quadri-caisses	-	1.6	3.05	28	0.25	4.4

Les facteurs d'émissions de polluants des moteurs thermiques au ralenti sont mesurés au banc par la SNCF. Ils sont regroupés dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Facteurs d'émissions par type d'engins et par polluants - Engins au ralenti

Série	Type de moteur	Consommation [l/h]	CO [g/h]	NOx [g/h]	PM [g/h]	CO_2 [kg/h]
X72500 Bi-caisses	UIC 1	21.4	289	800	14	55
X76500 Tri-caisses	Euro 2	5.8	96	136	6	15
X76500 Tri-caisses	Euro 3	3.7	32	196	2	14
Moyenne X76500 – Tri-caisses	-	4.75	64	166	4	14.5
B81500 Quadri-caisses	Euro 3	3.7	32	196	2	14
B81500 Quadri-caisses	Etape IIIA	3.2	30	131	0.8	12
Moyenne B81500 Quadri-caisses	-	3.45	31	178.5	1.4	13

2.2.4 Hypothèse de travail

- Les données des séries X72500 Bi-caisses sont utilisées pour les types d'engins XTER.
- Les données moyennes des séries B81500 Quadri-caisses sont utilisées pour les types d'engins BGC.
- Les données moyennes des séries X76500 Tri-caisses sont utilisées pour le Fret.
- Le temps de préchauffage des motrices correspond à 20 minutes pour les engins XTER et à 15 minutes pour les engins BGC, hormis si le temps de retournement dans les roulements est inférieur à ces durées.
- Les arrêts en gare de Aix-en-Provence pour les trains de type FRET sont en moyenne de 2 minutes.

Ces hypothèses de travail ont été définies en mars 2020. Au moment de la publication de ce rapport (octobre 2021), les hypothèses ont évoluées et les trains de type FRET ne stationneront plus en gare d'Aix-en-Provence. L'hypothèse retenue dans ce rapport majore donc l'impact de cette activité en gare.

2.3 Scénarios étudiés

Dans le but d'estimer les variations d'émissions issues de l'évolution du trafic ferroviaire entre Aix-en-Provence et Marseille, les calculs seront réalisés pour trois scénarios :

- **Année de référence** : 2016, dernière année avant travaux.
- **Scénario A - MGA2** : Augmentation des rotations entre Aix-en-Provence et Marseille d'ici 2022. Tous les trains sont équipés de moteur thermique.
- **Scénario B - propulsion alternative sur batterie**: Augmentation des rotations entre Aix-en-Provence et Marseille d'ici 2022. Les engins de type BGC omnibus sont équipés de batterie, les engins XTER semi-directs et le fret conservent les moteurs thermiques (gazole). Ce scénario B implique une électrification des voies sur 8,5 km (Tableau 1) entre Aix-en-Provence et Marseille et en gare d'Aix-en-Provence, pour permettre le rechargement des batteries.

Cette étude est réalisée avec l'hypothèse que seuls les trains BGC circulant en navette entre Marseille et Aix-en-Provence seront équipés de batterie (soit environ 70% des circulations entre Marseille et Aix-en-Provence).

2.4 Polluants étudiés

Les polluants retenus par AtmoSud sont ceux sur lesquels un impact du projet est attendu, sur lesquels des dépassements de normes réglementaires dans le domaine d'étude sont observés et ceux entrant dans le cadre d'études sur les transports.

Les polluants étudiés en émissions dans le cadre de cette étude sont :

- Les oxydes d'azote NOx;
- Les particules fines ;
- Le monoxyde de carbone CO ;
- Le dioxyde de carbone CO_2.

Pour les cartographies des concentrations, seuls les particules fines (PM10 et PM2.5) et le NO_2 sont étudiés.

Les oxydes d'azote (NOx) regroupent le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO_2). Le NO est un composé instable qui, à température ambiante, se combine avec l'oxygène atmosphérique pour former du NO_2. En concentration, le NO n'est pas réglementé dans l'air ambiant, l'impact sanitaire étant caractérisé pour le NO_2. Ainsi, seul le NO_2 est traité en concentration pour l'étude des oxydes d'azote.

Les particules fines regroupent les PM10 et les PM2.5. Ces deux catégories de particules ont des valeurs règlementaires de concentrations en air ambiant et sont donc traitées dans les cartographies de concentrations de cette étude.

Pour l'étude du CO, les concentrations dans l'air ambiant sont très faibles, inférieures à 1 µg/m^3 depuis plus de 10 ans, ce qui les situent très en-dessous des seuils règlementaires (cf. ANNEXE 5). Ce polluant n'est donc pas problématique en air ambiant et ses concentrations ne sont donc pas cartographiées.

Enfin, le CO_2 est un gaz à effet de serre qui n'a pas d'impact sanitaire en air ambiant. En revanche, ces émissions ont un impact global sur le climat. Il est donc traité uniquement en termes d'émissions dans le cadre de cette étude.

La présentation des résultats est organisée en deux grandes parties :

- une **première analyse** les **résultats pour les trains en circulation** sur la ligne ferroviaire entre Aix-en-Provence et Marseille,

- une **seconde analyse** les **résultats pour les trains stationnant** en gare d'Aix-en-Provence.

3. Impact des trains en circulation sur la ligne ferroviaire entre Aix-en-Provence et Marseille

Pour chacune de ces analyses, une première section présente les résultats de consommation, une seconde section présente les résultats d'émissions de polluants et de gaz à effet de serre et une troisième section présente les résultats des concentrations dans l'air ambiant.

Les méthodologies de calculs déployées dans le cadre de cette étude sont présentées en ANNEXE 6.

3.1 Consommations de gazole des trains en circulation

L'évolution de la consommation de gazole entre les différents scénarios est donnée dans le Tableau 5. L'augmentation du trafic dans le scénario A (MGA2) entraine une augmentation significative des consommations tandis que le scénario B (alternative batterie) conduit à une forte diminution des consommations et un gain important par rapport à la situation de référence 2016.

Tableau 5: Consommation de diesel suivant les scénarios et gain par rapport à l'année de référence

	2016	Scénario A	Scénario B
Consommation de gazole (litres/an)	1 246 600	1 940 800	429 400
Gain par rapport à la référence (2016)	-	+ 694 300	- 817 200

La Figure 1 représente le détail de ces consommations par type de motrice entre les scénarios. La consommation de gazole des engins BCG représente 49 % de la consommation totale de gazole sur le tronçon Aix / Marseille en 2016, contre 77 % en 2022 pour le scénario A (MGA2). Avec le scénario B (alternative batterie) la consommation de gazole des engins BGC est nulle (91 % XTER ; 9 % FRET). En 2016 la consommation de gazole sur la ligne Aix-Marseille représentait 35 % de la consommation totale sur le trafic TER de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur.

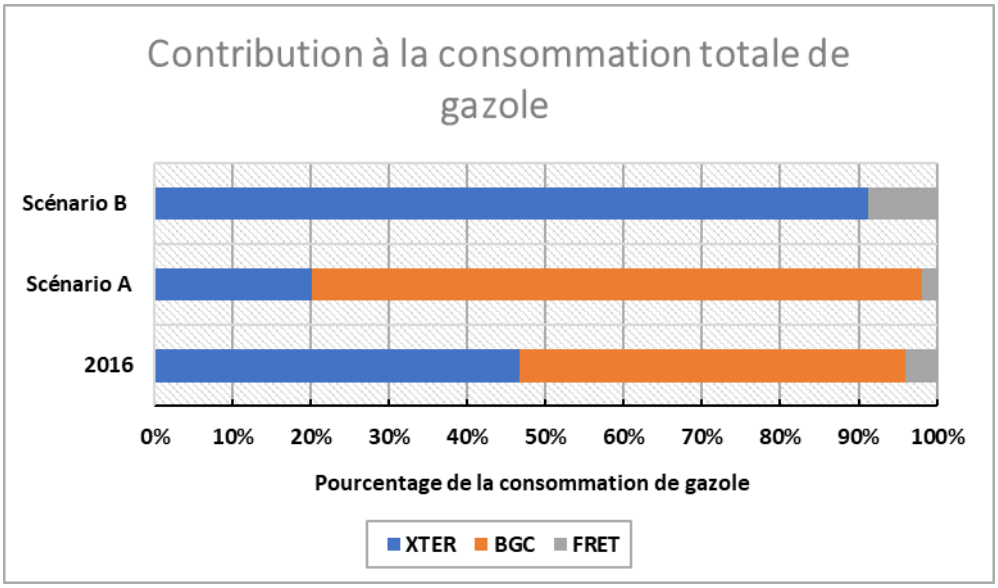


Figure 1 : Contribution par engins à la consommation totale de gazole pour chaque scénario sur la ligne Aix-Marseille

Le scénario B (alternative batterie) pour les engins BCG permet une économie d'environ 1 500 000 litres de gazole sur une année par rapport au scénario A et une économie de plus de 800 000 litres par rapport à l'année de référence.

Remarques

Dans le cadre de la réalisation des inventaires d'émissions, AtmoSud calcule chaque année les consommations liées à la circulation sur l'ensemble des tronçons routiers de la région Sud. D'après l'inventaire 2016, sur **l'axe Marseille / Aix-en-Provence**, la consommation sur une année, tout type de véhicules confondus (véhicule lourd et léger), était de **65 868 TEP**[3].

Si on convertit en TEP la somme des consommations des trains, tous engins confondus, dans le cas du scénario A (**MGA2**), cela équivaut à **1596 TEP**. Cela représente donc 2,4 % de la consommation du trafic routier sur l'axe Marseille / Aix-en-Provence pour l'année de référence 2016.

Dans le cas du scénario B (**alternative batterie**) la consommation des trains représente **353 TEP**, soit 0,5% de la consommation du trafic routier sur le même axe.

3.2 Émissions atmosphériques des trains en circulation

Les différents types d'émissions reportés dans cette étude sont :

- Les émissions énergétiques : issues de la combustion de carburant pour alimenter en énergies les motrices ;
- Les émissions non énergétiques : issues des frottements mécaniques (usure des freins, des roues, des rails et des caténaires) ;
- Les émissions indirectes : liées à la production d'électricité qui sera nécessaire pour alimenter les motrices utilisant une propulsion sur batterie (SCOPE2). Elles sont calculées uniquement pour le CO_2.

La méthodologie déployée dans le cadre de cette étude est présentée en ANNEXE 6. Le bilan des émissions de chaque scénario et la différence par rapport à l'année de référence 2016 sont donnés dans le Tableau 6.

Tableau 6: Émissions non énergétiques, énergétiques et indirectes calculées pour chacun des scénarios

	Emissions non énergétiques		Emissions énergétiques					Emissions indirectes
	PM10 [kg/an]	PM2.5 [kg/an]	NOx [kg/an]	CO_2 [t/an]	PM10 [kg/an]	PM2.5 [kg/an]	CO [kg/an]	CO_2 [t/an]
2016	3 019	872	31 776	3 254	306	16	3 801	-
Scénario A	4 637	1 340	39 795	5 126	361	19	4 553	-
Différence Scénario A – 2016	*+ 1 619*	*+ 468*	*+ 8 019*	*+ 1 872*	*+ 55*	*+ 3*	*+ 752*	-
Scénario B	4 673	1 346	13 345	969	137	7	1 672	484
Différence Scénario B – 2016	*+ 1 654*	*+ 473*	*- 18 431*	*- 2 284*	*- 169*	*- 9*	*- 2 129*	*+ 484*

3.2.1 Émissions non énergétiques

Les émissions non énergétiques concernent uniquement les polluants particulaires, PM10 et PM2.5. La Figure 2 illustre les émissions non énergétiques des trains en circulation selon les deux scénarios et l'année de référence. Les émissions de particules PM10 et PM2.5 augmentent avec le scénario A (MGA2) par rapport à l'année de référence en raison de la hausse du nombre de trains et par conséquent de l'usure du matériel roulant.

Cette augmentation est sensiblement plus élevée avec le scénario B (alternative batterie). Ce résultat est dû à une plus longue utilisation des caténaires, augmentant les émissions dues à leur usure. Ce rallongement des caténaires et

[3] Une « tep » ou « tonne d'équivalent pétrole » équivaut à l'énergie calorifique résultant de la combustion d'une tonne de pétrole brut « moyen ».

leur utilisation est nécessaire pour permettre la recharge des batteries sur une portion du tronçon Aix-en-Provence–Marseille (cf. Tableau 1).

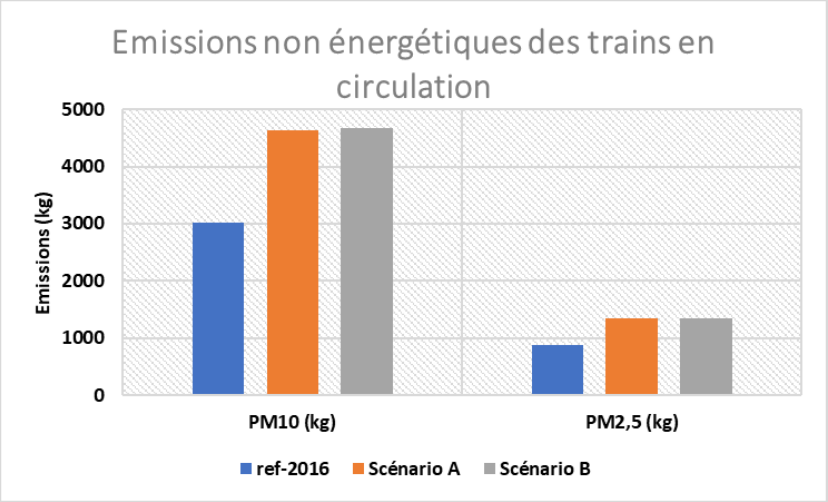


Figure 2 : Émissions non énergétiques des trains en circulation

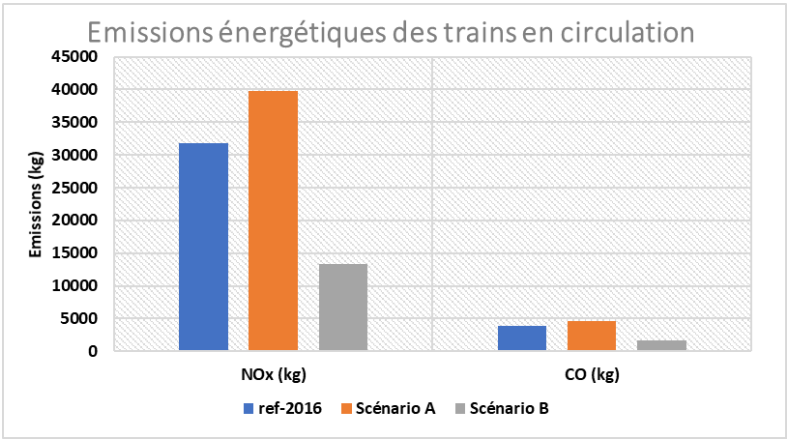
Les **émissions non énergétiques** dans les scénarios A et B **augmentent par rapport à l'année de référence**, proportionnellement à l'augmentation du trafic. La différence entre les deux scénarios est faible.

3.2.2 Émissions énergétiques

Les émissions énergétiques concernent les polluants NOx, CO_2, CO, PM10, PM2.5. Les émissions ont été estimées pour chacun des scénarios et l'année de référence 2016 (Figure 3).

Le scénario A (MGA2) entraine une augmentation des émissions énergétiques sur tous les polluants étudiés par rapport à l'année de référence.

L'alternative batterie (scénario B) est installée sur les engins de type BGC, qui possèdent la plus grande consommation de gazole annuelle sur la ligne Aix-Marseille (Figure 1). Avec le scénario B les émissions énergétiques diminuent par rapport au scénario A et également par rapport à l'année de référence.



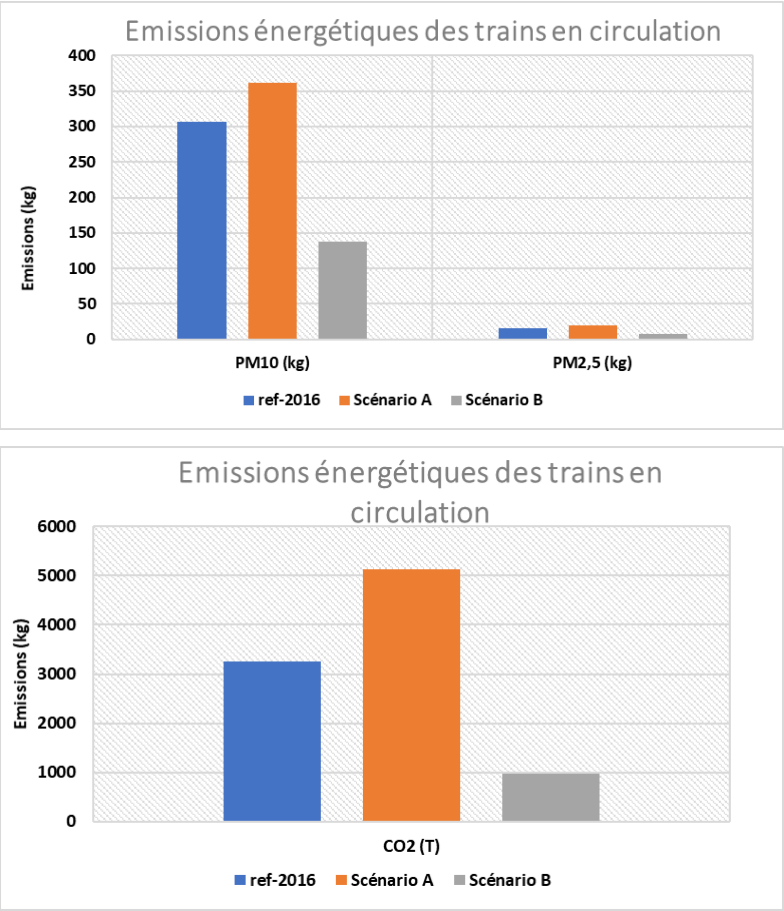


Figure 3 : Émissions énergétiques des trains en circulation

Tableau 7 : Variations relatives des émissions énergétiques entre les différents scénarios et l'année de référence

	CO [%]	NOx [%]	PM10 [%]	PM2.5 [%]	CO_2 [%]
Différence Scénario A – 2016	+ 20	+ 25	+ 18	+ 18	+ 58
Différence Scénario B – 2016	- 63	- 66	- 62	- 62	- 81

La variation d'émission plus élevée pour le CO_2 que pour les autres polluants (Tableau 7) s'explique par des facteurs d'émission dépendant du polluant et de l'engin considéré. Dans le cas du CO_2, le facteur d'émission est plus important pour les engins BGC que pour les engins XTER et FRET. Pour les NOx, CO, PM10 et PM2.5, c'est l'inverse, le facteur d'émission est plus faible pour les BGC que pour les XTER et FRET (Tableau 3). Cela entraine donc une tendance différente entre les polluants.

Le **scénario B** (alternative batterie) permet une **réduction des émissions énergétiques de 60 à 80 %** par rapport à l'année de référence. A l'inverse, le scénario A (MGA2) entraine une augmentation des émissions énergétiques de 18 à 58 %.

3.2.3 Émissions indirectes

Avec le scénario B (alternative batterie) les émissions énergétiques diminuent. Pour affirmer que cette diminution est réellement vertueuse, il faut prendre en considération les émissions indirectes qu'engendre la consommation d'électricité pour le fonctionnement des motrices BGC (alternative batterie).

La méthodologie déployée dans le cadre de cette étude est présentée en annexe 6.

Les émissions indirectes supplémentaires de CO_2 pour le scénario B sont égales à **484 TCO_2elec[4]/an** (Tableau 6.).

La diminution des émissions énergétiques directes de **CO_2** est de **2 284 T/an** (Tableau 6) entre l'année de référence (2016) et le scénario B (alternative batterie).

Le bilan total (émissions directes + indirectes) des émissions de CO_2 entre l'année de référence et le scénario B est **de – 1 800 TCO_2.**

Le **scénario B** (batterie) permet une **diminution globale de 1 800 T/an de CO_2** par rapport à l'année de référence 2016.

3.3 Impact sur les concentrations en air ambiant

Dans les sections suivantes, les concentrations en dioxyde d'azote (NO_2) dans l'air ambiant sont présentées pour chacun des 3 scénarios étudiés. Les interprétations des résultats étant les mêmes pour les particules fines (PM10 et PM2.5), les cartographies associées sont présentées en annexe de cette étude (ANNEXE 7). Une dernière section donne une analyse synthétique des résultats obtenus pour les concentrations en particules fines.

3.3.1 État de référence 2016

La Figure 4 (partie gauche) représente les moyennes annuelles des concentrations en NO_2 pour l'état de référence 2016 avec la prise en compte des trains en circulation. Les dépassements de la valeur limite annuelle en NO_2 (fixée à 40 µg/m^3) s'observent le long des axes routiers et dans les centres urbains d'Aix-en-Provence et de Marseille. Les trains en circulation dégradent localement les niveaux en NO_2 le long du tracé sans toutefois engendrer un dépassement de la valeur limite réglementaire.

La carte de droite de la Figure 4 représente la contribution seule des trains en circulation pour l'année de référence 2016. Les niveaux en NO_2 dépassent rarement les 10 µg/m^3, ce qui représente seulement un quart de la valeur limite règlementaire annuelle. La contribution moyenne engendrée par le ferroviaire en circulation est faible d'environ +2.5 µg/m^3.

La prise en compte des portions en tunnel engendre des **surconcentrations localisées au niveau des têtes de tunnels**. Les têtes de tunnels sont donc des zones **à surveiller quand elles se situent en zone urbaine** où les surconcentrations qu'elles engendrent s'ajoutent à la pollution de fond urbaine.

[4] ou équivalent dioxyde de carbone correspond à la masse de dioxyde de carbone qui aurait le même potentiel de réchauffement climatique qu'une quantité donnée d'un autre gaz à effet de serre. En France, près de 80 % de l'électricité provient du nucléaire, 12 % de l'hydraulique et 6 % de l'éolien. Ces différents modes de production libèrent différent type de gaz à effet de serre. C'est pourquoi on parle de CO2e dans le cas d'un calcul lié à la production d'électricité.

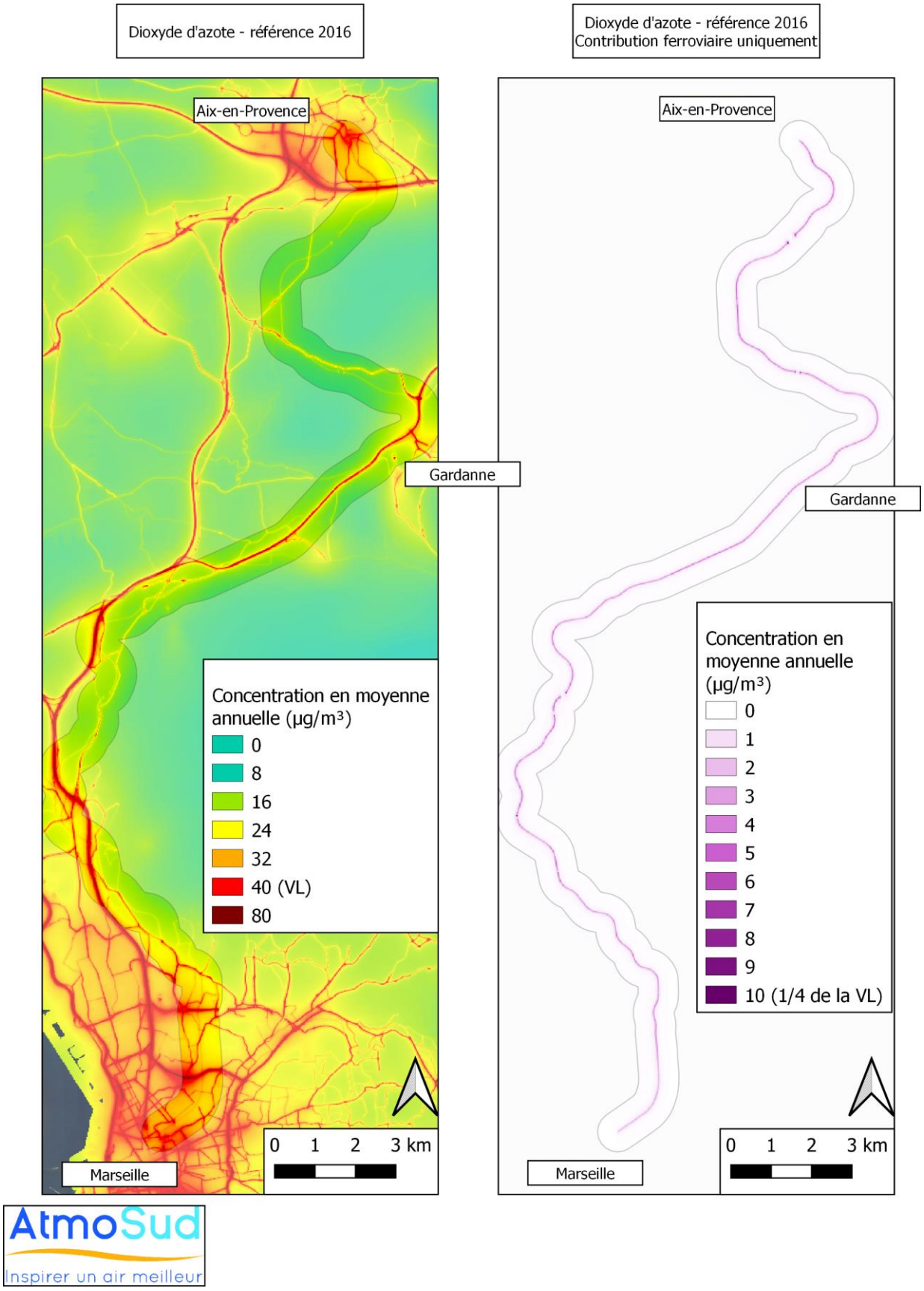


Figure 4 : Cartographies des concentrations du NO_2 pour l'année de référence 2016, à gauche toutes sources – à droite contribution du ferroviaire uniquement. Ligne ferroviaire mise en évidence par un masque de transparence

3.3.2 Scénario A (MGA2)

Sur la Figure 5, la carte de gauche représente les concentrations moyennes annuelles en dioxyde d'azote (NO_2) dans le cas du scénario A intégrant un doublement du trafic ferroviaire en 2022. Il n'y a pas d'évolution des zones en dépassement.

La carte de droite représente la contribution seule des trains en circulation pour 2022. La contribution moyenne est plus importante (+2.8 µg/m^3) en accord avec les hausses d'émissions estimées. Mais comme dans l'état initial de 2016, les contributions dépassent rarement les 10 µg/m^3.

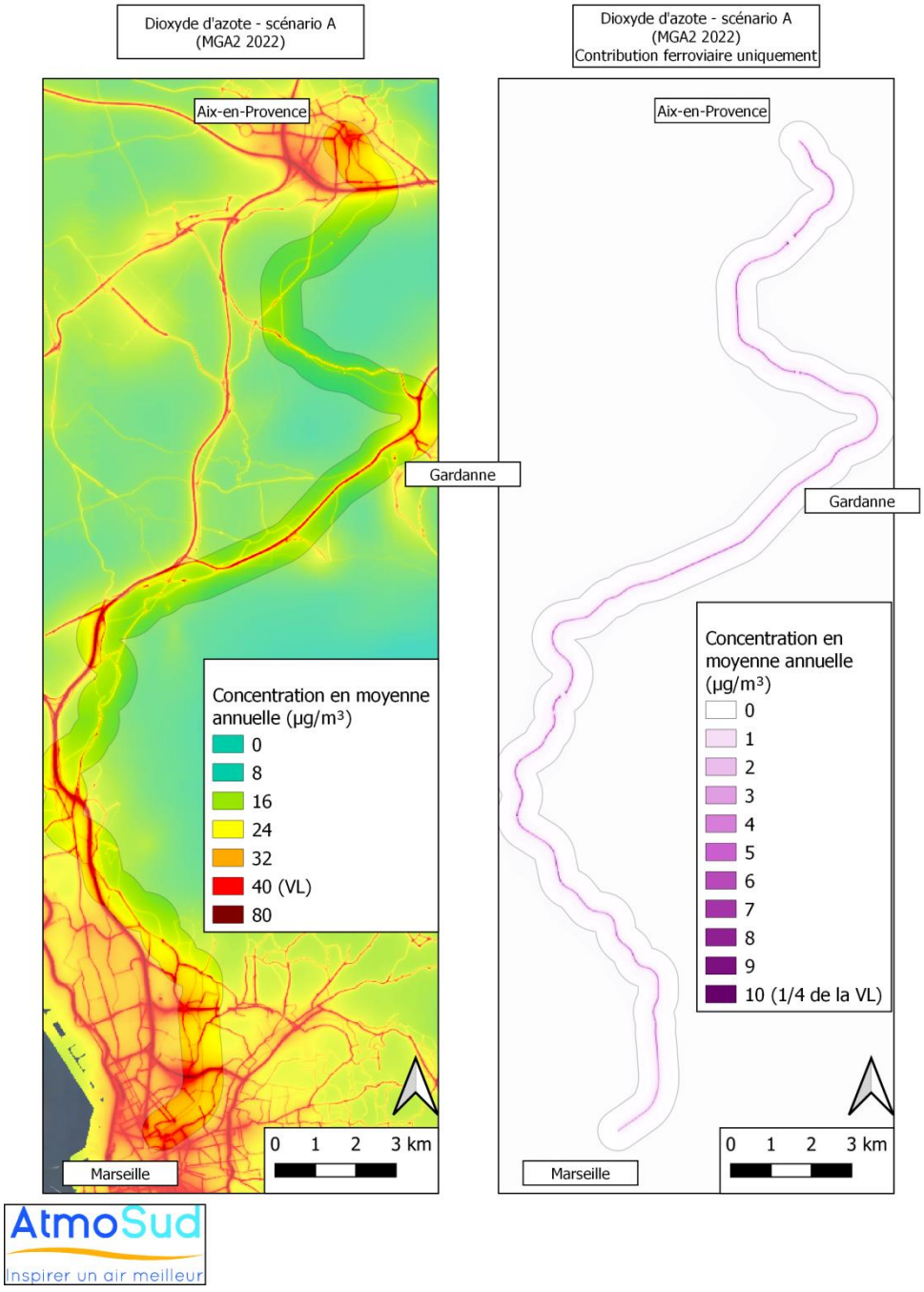


Figure 5 : Cartographies des concentrations du NO_2 pour l'année 2022 avec le scénario A (MGA2), à gauche toutes sources – à droite contribution du ferroviaire uniquement

► Focus sur une tête de tunnel

Dans le quartier Verduron situé dans le 15e arrondissement de Marseille, le tunnel ferroviaire à proximité du boulevard Henri Barnier génère une surconcentration qui vient s'ajouter à la pollution environnante et dégrader la qualité de l'air à proximité d'habitation (Figure 6). La surconcentration en NO_2 en moyenne annuelle est de l'ordre de 10 µg/m^3. Malgré des niveaux élevés, il n'y a pas de dépassement du seuil réglementaire au niveau de ces têtes de tunnel.

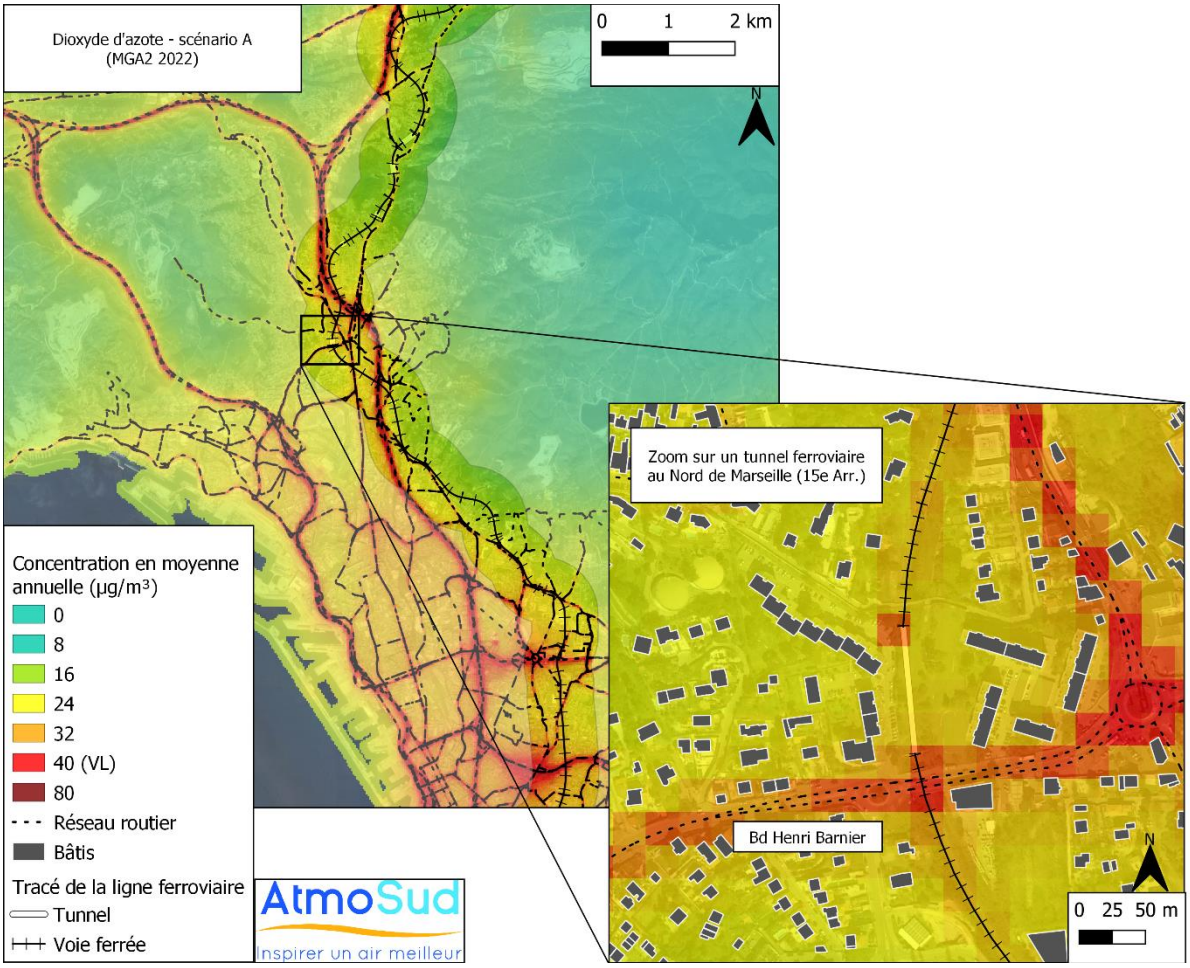


Figure 6 : Tunnel ferroviaire engendrant une surconcentration en milieu urbain

3.3.3 Scénario B (batterie)

Sur la Figure 7, la carte de gauche représente les concentrations moyennes annuelles en dioxyde d'azote (NO_2) dans le cas du scénario B intégrant l'usage d'un mode de propulsion alternative par batterie au doublement du trafic ferroviaire en 2022. L'impact de la circulation des trains avec batterie est faible et difficile à remarquer sur cette carte.

La carte de droite, représentant la contribution seule des trains en circulation pour ce scénario, montre une très faible contribution. En effet, l'usage de batterie remplace les moteurs diesel, principaux responsables des émissions de NO_2 pour les trains en circulation. La contribution moyenne sur le tracé est d'environ +1.4 µg/m^3 : elle est plus faible que dans l'état de référence de 2016. Les surconcentrations observables au niveau de têtes de tunnels sont également réduites.

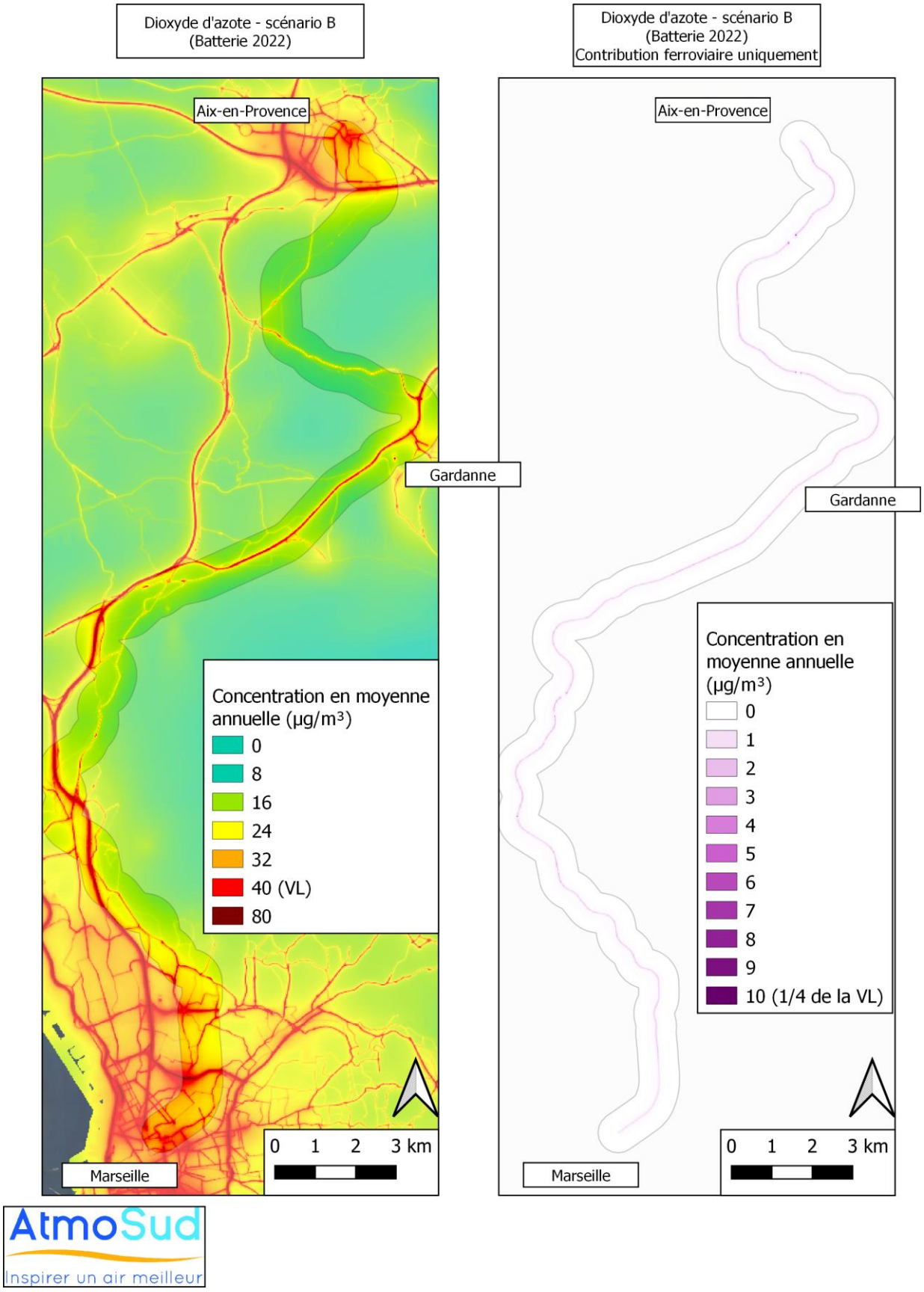


Figure 7 : Cartographies des concentrations du NO_2 pour l'année 2022 avec le scénario B (batterie), à gauche toutes sources – à droite contribution du ferroviaire uniquement

3.3.4 Évolution entre la référence 2016 et les différents scénarii 2022

La Figure 8 montre la carte de différence absolue entre le scénario B (batterie) et le scénario A (MGA2) (à gauche) et la carte de différence absolue entre le scénario B et la référence 2016 (à droite).

La carte de gauche met en avant l'amélioration des niveaux de NO_2 lié à l'usage des batteries en remplacement des moteurs diesel. Comme vu dans la partie émission, l'usage de batterie en remplacement du diesel permet de réduire fortement les émissions de NOx et donc de réduire les niveaux de NO_2 sur le tracé entre les gares d'Aix-en-Provence et Marseille (en moyenne -1.4 µg/m^3).

La carte de droite montre l'évolution positive des concentrations en NO_2 entre l'état de référence 2016 et le scénario B faisant l'usage de batteries comme mode de propulsion. Malgré la hausse du trafic ferroviaire entre Aix-en-Provence et Marseille, l'utilisation de moteurs non thermiques permet de réduire l'impact du secteur ferroviaire sur la qualité de l'air (en moyenne -1.1 µg/m^3).

Le **scénario B** utilisant les batteries comme mode de propulsion est le plus vertueux sur le plan de la qualité de l'air. Il permet de **réduire les concentrations de dioxyde d'azote** sur le tracé ferroviaire.

3.3.5 Les autres polluants particulaires

Des cartes identiques au dioxyde d'azote présentées précédemment ont été réalisées pour les polluants particulaires PM10 et PM2.5 et sont placées en ANNEXE 7.

Les cartes de références 2016 intégrant le ferroviaire dans les concentrations moyennes annuelles en particules ne montrent pas de niveaux dépassant les valeurs seuils (40 µg/m^3 pour les PM10 et 25 µg/m^3 pour les PM2.5) aux abords du tracé entre Aix-en-Provence et Marseille. La contribution des trains circulant est en moyenne de +0.4 µg/m^3 pour les PM10 et de +0.1 µg/m^3 pour les PM2.5. Ces apports peu visibles sur la cartographie s'expliquent par la diversité des sources en particules engendrant un niveau de fond élevé sur le territoire.

Pour les scénarios A (MGA2) et B (Batterie), les observations sur les niveaux de particules sont les mêmes que pour la situation de référence 2016 : aucun dépassement sur les voies du train. La pollution particulaire engendrée par la circulation des trains est peu visible du fait des niveaux de fond importants (entre 16 et 24 µg/m^3 pour les PM10 et entre 10 et 15 µg/m^3 pour les PM2.5). Localement sur le tracé entre Aix-en-Provence et Marseille, les deux scénarios augmentent en moyenne d'environ 0.5 µg/m^3 les concentrations en PM10 et d'environ 0.2 µg/m^3 les concentrations en PM2.5. Ces variations ne sont pas significatives.

Le changement de mode propulsion engendre une faible baisse des émissions de particules : moins de 4% de variation entre le scénario A (MGA2) et le scénario B (batterie). Les émissions non énergétiques liées à l'usure des caténaires ou du matériel roulant restent prépondérantes par rapport aux émissions énergiques. En moyenne les émissions énergiques ne représentent que 8 % du total des émissions en particules de ce secteur.

L'**impact du ferroviaire** sur les niveaux de particules est très réduit. Les deux scénarios n'ont **pas d'impact significatif** sur la qualité de l'air le long de l'axe ferroviaire.

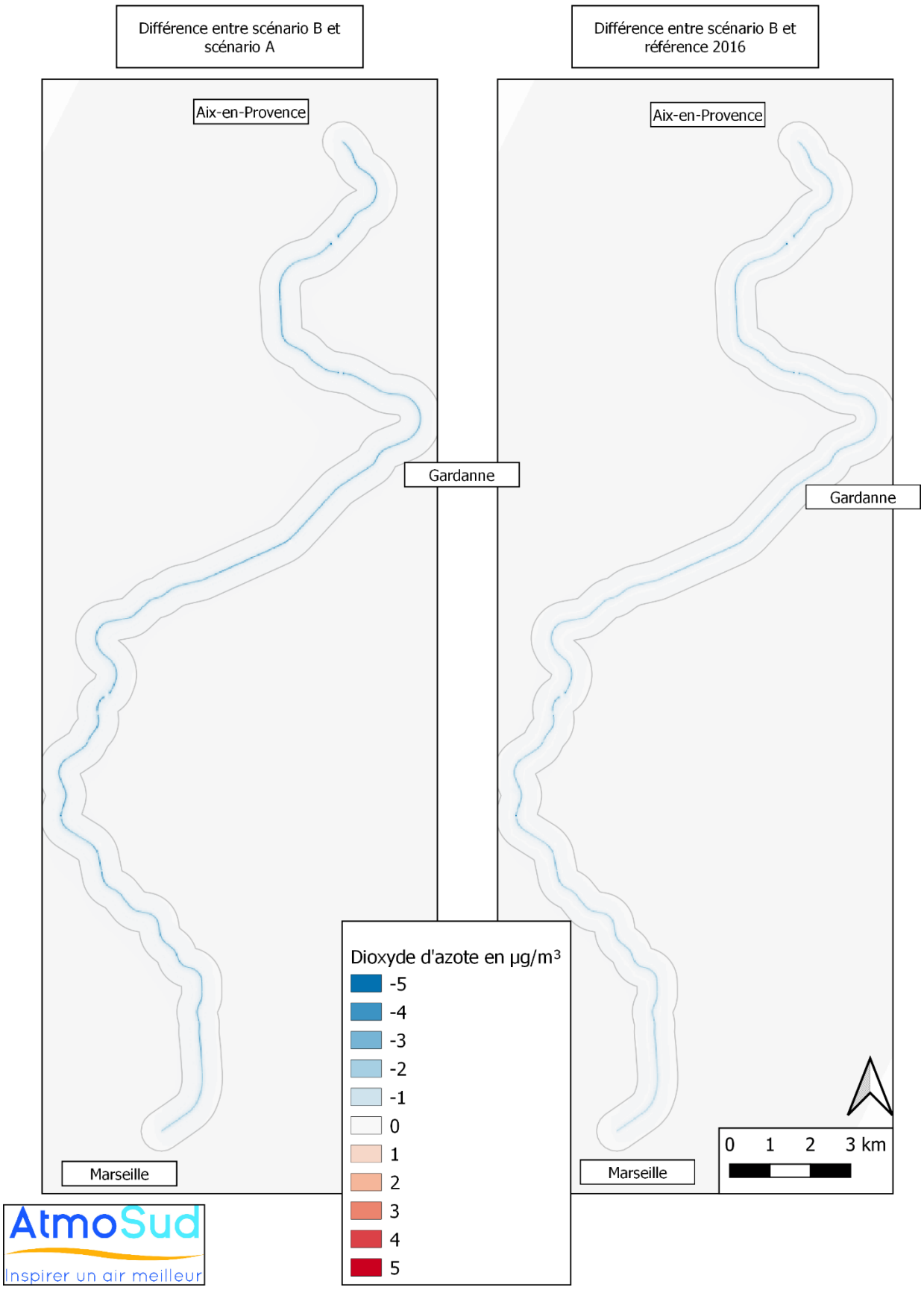


Figure 8 : Cartographies des différences absolues des concentrations en NO_2 entre le scénario B et le scénario A (à gauche) et le scénario B et la référence 2016 (à droite)

4. Étude en gare d'Aix-en-Provence

4.1 Émissions atmosphériques des trains en gare d'Aix-en-Provence

La méthodologie de calcul mise en œuvre pour cette section est présentée en ANNEXE 6.

4.1.1 Comparaison des scénarios en gare d'Aix-en-Provence

Les calculs des émissions atmosphériques des trains durant leur stationnement en gare d'Aix-en-Provence sont réalisés pour le scénario A (MGA2), le scénario B (alternative batterie) et pour l'année de référence 2016. Les résultats de ces calculs ainsi que la comparaison des scénarios à l'année de référence sont présentés dans le Tableau 8. Les valeurs d'émissions sont également représentées dans la Figure 9.

Tableau 8 : Synthèse des émissions en gare d'Aix-en-Provence

	NOx [kg/an]	CO_2 [t/an]	PM10 [kg/an]	PM2.5 [kg/an]	CO [kg/an]
2016	849.9	62.3	7.4	0.4	165.7
Scénario A	1 850.7	135.1	14.6	0.8	333.8
Différence Scénario A – 2016	+ 1 000.7	+ 72.8	+ 7.1	+ 0.4	+ 168.1
Scénario B	42.7	3.3	0.8	0.0	16.0
Différence Scénario B – 2016	- 807.2	- 58.9	- 6.6	- 0.3	- 149.8

Entre l'année de référence et le scénario A (MGA2), les émissions en gare augmentent significativement, de l'ordre de 50 %. A l'inverse, la mise en place du scénario B (alternative batterie) entraine une réduction importante des émissions par rapport au scénario A (MGA2) et également par rapport à la situation de référence 2016.

Dans le scénario A (MGA2), la source principale des émissions en gare sont les engins de type BGC. Dans le scénario B (alternative batterie), leurs émissions sont alors éliminées grâce à leur raccordement au réseau électrique.

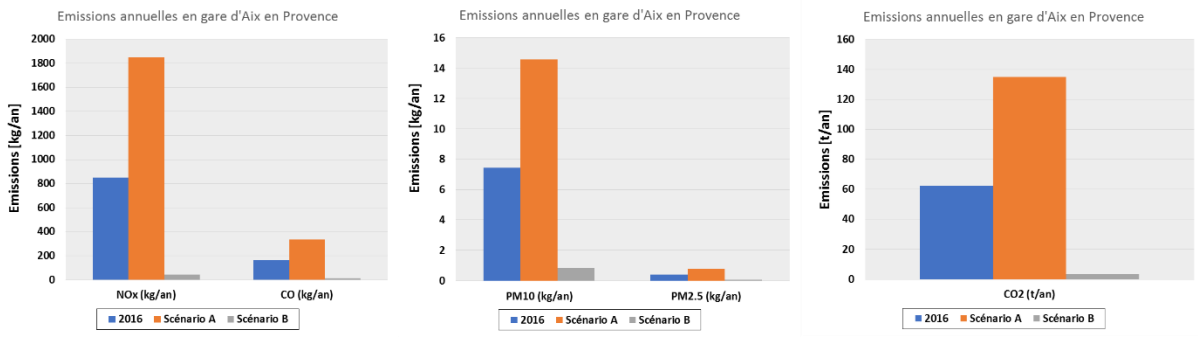


Figure 9 : Synthèse des émissions en gare d'Aix-en-Provence

Le **scénario B** (alternative batterie) permet une **réduction significative des émissions en gare** d'Aix-en-Provence par rapport au scénario A (MGA2) et également par rapport à l'année de référence 2016.

4.1.2 Évolution horaire des émissions en gare d'Aix-en-Provence

Les données fournies ont également permis d'étudier l'évolution horaire des émissions en gare d'Aix-en-Provence au cours d'une journée (jours ouvrés). L'évolution temporelle des émissions étant semblable pour tous les polluants étudiés, le choix a donc été fait de ne représenter que le CO, NOx et CO_2 pour ne pas surcharger les figures. La figure 10 illustre ces variations intra-journalières.

Dans le scénario A, un premier pic d'émissions est observé en matinée autour de 7 heures et un second en fin de journée, centré sur 19h. Ces pics correspondent aux heures de pointes du trafic ferroviaire en gare d'Aix-en-Provence.

Avec l'alternative batterie (figure 10 – scénario B), on observe une nette diminution des émissions sur l'ensemble de la journée. Un pic d'émissions est à noter à 5 heures (NOx ~140 g/h pour le scénario B ; NOx ~260 g/h pour le scénario A). Ce pic est dû aux manœuvres des trains en gare. Ces émissions impactent faiblement les usagers, le pic de fréquentation de la gare se situant aux alentours de 7 heures du matin. Un second pic est également visible à 19 heures. Comme précédemment, ce pic est nettement moins important dans le scénario B (NOx ~ 85 g/h) que dans le scénario A (NOx ~ 250 g/h). Ce pic est lié à la présence plus importante de trains XTER et FRET en gare.

Ces données sont exploitées dans la section suivante relative aux impacts des trains en gare d'Aix-en-Provence sur les concentrations en air ambiant. Elles ont permis de définir les profils temporels d'émissions de ces sources.

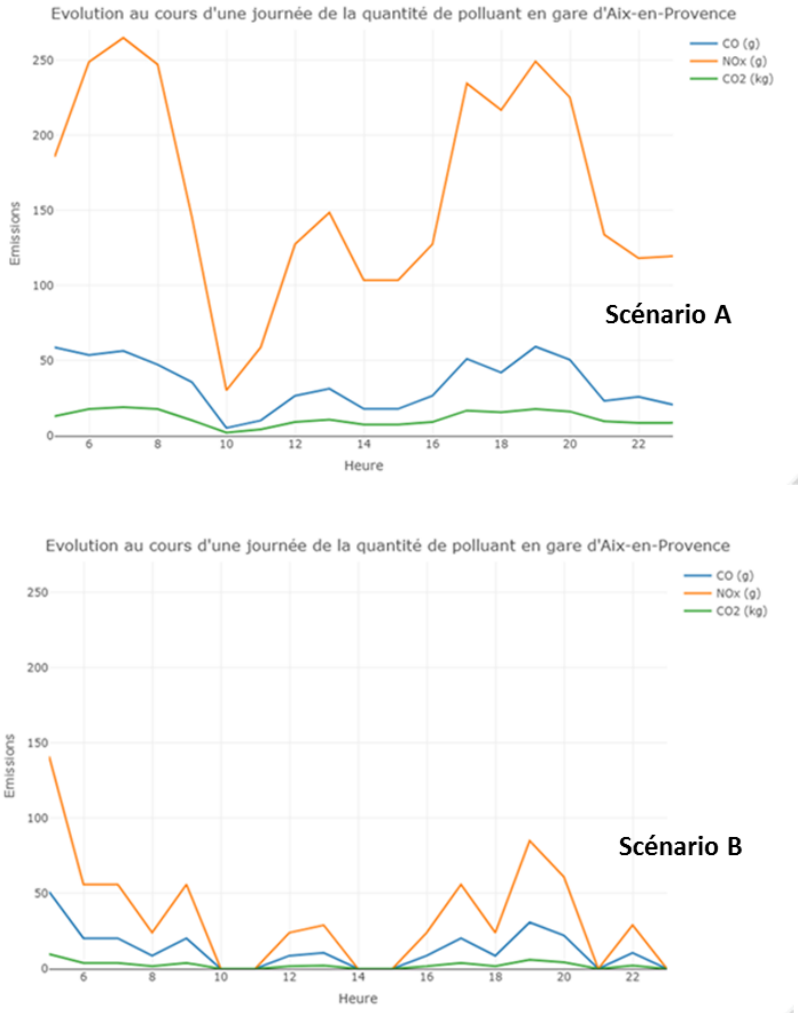


Figure 10 : Évolution des émissions horaires au cours d'une journée en gare d'Aix-en-Provence
Haut : scénario A – Bas : scénario B

4.2 Concentrations en air ambiant en gare d'Aix-en-Provence

Dans les sections suivantes, les concentrations en dioxyde d'azote (NO_2) dans l'air ambiant sont présentées pour chacun des 3 scénarios étudiés. Une dernière section analyse les résultats obtenus pour les concentrations en particules fines.

4.2.1 État de référence 2016

La Figure 11 représente les concentrations moyennes annuelles en dioxyde d'azote (NO_2) pour l'état de référence 2016 avec la prise en compte des trains en gare d'Aix-en-Provence. Les dépassements de la valeur limite annuelle en NO_2 (fixée à 40 µg/m^3) s'observent le long des axes routiers du centre urbain, à proximité de la gare (rue Gustave Desplaces et avenue Maurice Blondel). Les trains stationnant en gare dégradent localement les niveaux en NO_2 sur les voies sans causer de dépassement local du seuil réglementaire.

La Figure 12 présente la contribution du ferroviaire seul sur les niveaux en NO_2. L'apport en gare est faible (en moyenne +1.6 µg/m^3) et ne dépasse pas les 5 µg/m^3, soit moins de 1/8 de la valeur limite annuelle réglementaire.

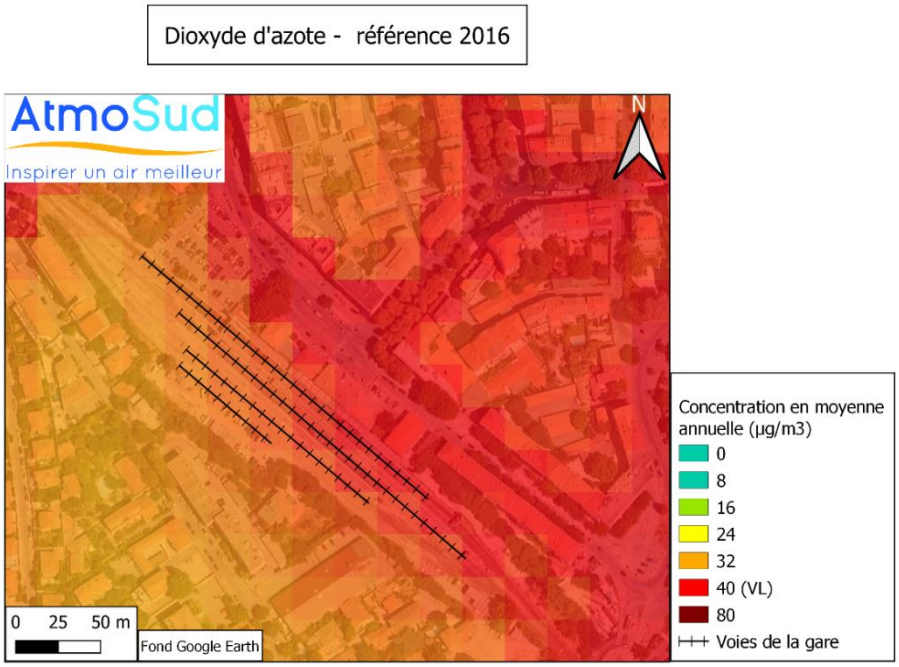


Figure 11 : Cartographie des concentrations du NO_2 pour l'année de référence 2016

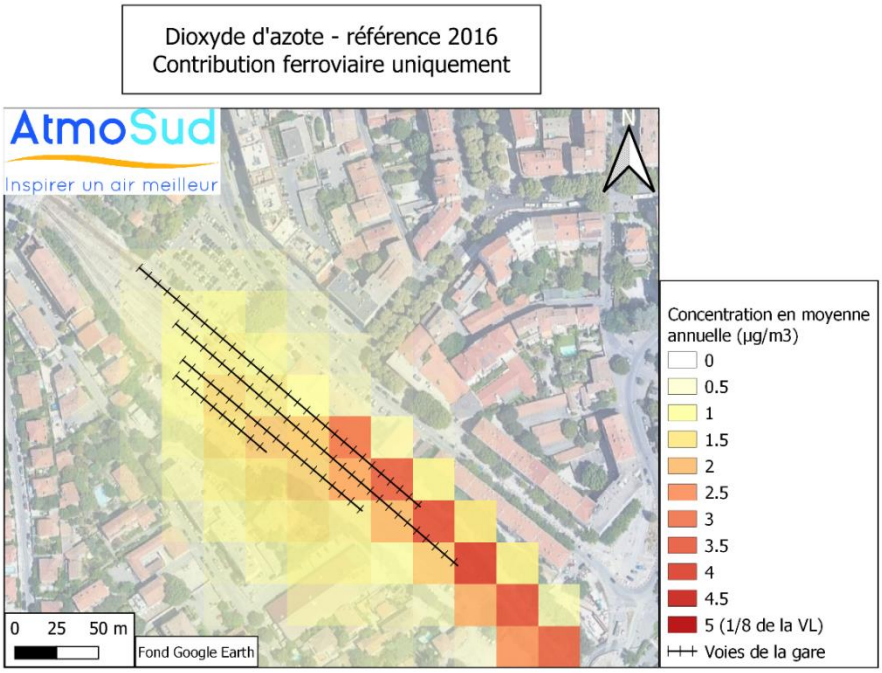


Figure 12 : Cartographie des concentrations du NO_2 pour l'année de référence 2016, contribution du ferroviaire uniquement

La qualité de l'air est peu dégradée par l'activité ferroviaire. La **contribution du ferroviaire** sur les concentrations en dioxyde d'azote **est faible** et n'engendre **pas de dépassement de la valeur limite en gare**.

4.2.2 Scénario A (MGA2)

La Figure 13 représente les concentrations moyennes annuelles en dioxyde d'azote dans le cas du scénario A (MGA2) intégrant un doublement du trafic ferroviaire. Ce scénario dégrade la situation en ajoutant des zones en dépassement localisées sur les voies ferrées. Les axes routiers en face de la gare, déjà en dépassement, se dégradent encore.

La Figure 14 présente la contribution du ferroviaire seul sur les niveaux en NO_2 pour ce scénario. L'apport en gare est plus fort que pour la référence 2016. Cette différence est directement liée aux émissions de NOx qui augmentent de 125 % (sans fret) par rapport à la situation initiale. La dégradation moyenne est d'environ 3.6 µg/m^3 et ne dépasse pas les 5 µg/m^3, soit moins de 1/8 de la valeur limite réglementaire.

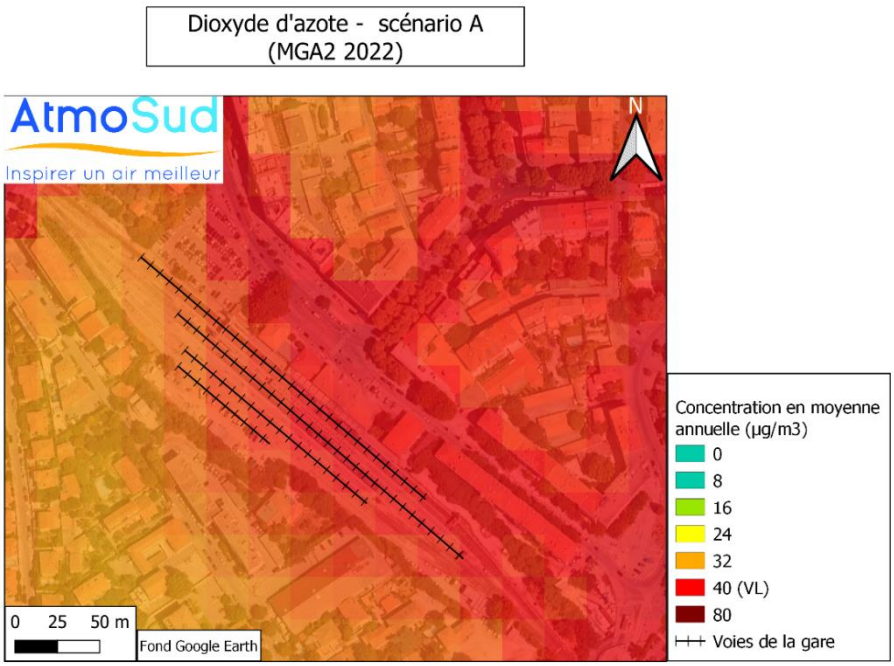


Figure 13 : Cartographie des concentrations du NO_2 pour l'année 2022 avec le scénario A (MGA2)

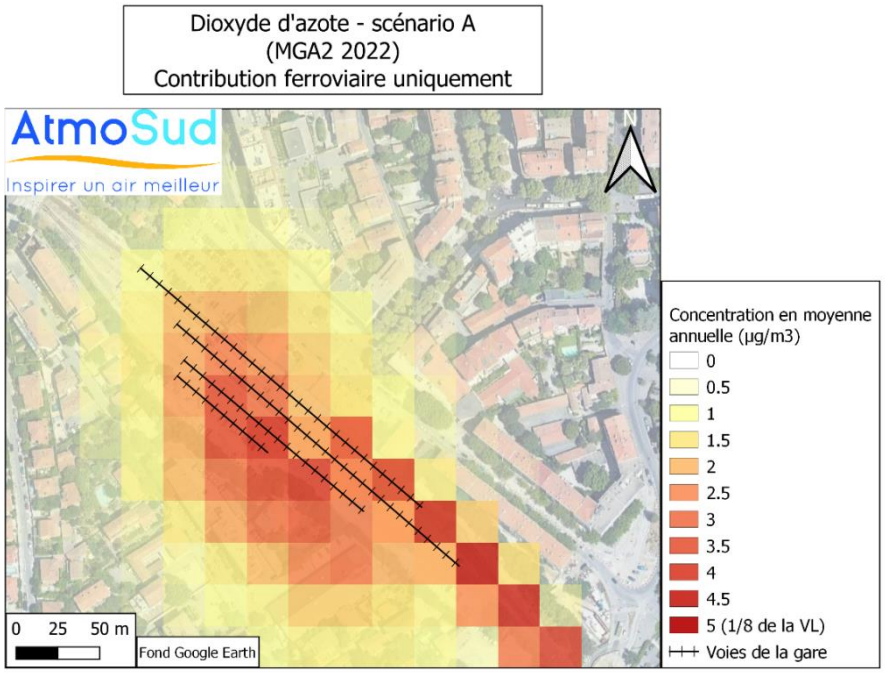


Figure 14 : Cartographie des concentrations du NO_2 pour l'année 2022 avec le scénario A (MGA2), contribution du ferroviaire uniquement

4.2.3 Scénario B (Batterie)

La Figure 15 représente les concentrations moyennes annuelles en dioxyde d'azote pour le scénario remplaçant les diesels par des batteries en 2022. Cette alternative de propulsion permet de réduire de 97 % les émissions de NOx en gare. Les zones en dépassement devant la gare se réduisent légèrement : les axes routiers sont encore bien visibles.

La Figure 16 montre la contribution du ferroviaire pour ce scénario. L'apport en gare est négligeable et seule la contribution des trains en circulation peut se percevoir sur cette carte. Le passage des trains sur batterie évite l'utilisation de diesel et donc supprime la quasi-totalité des émissions de NOx.

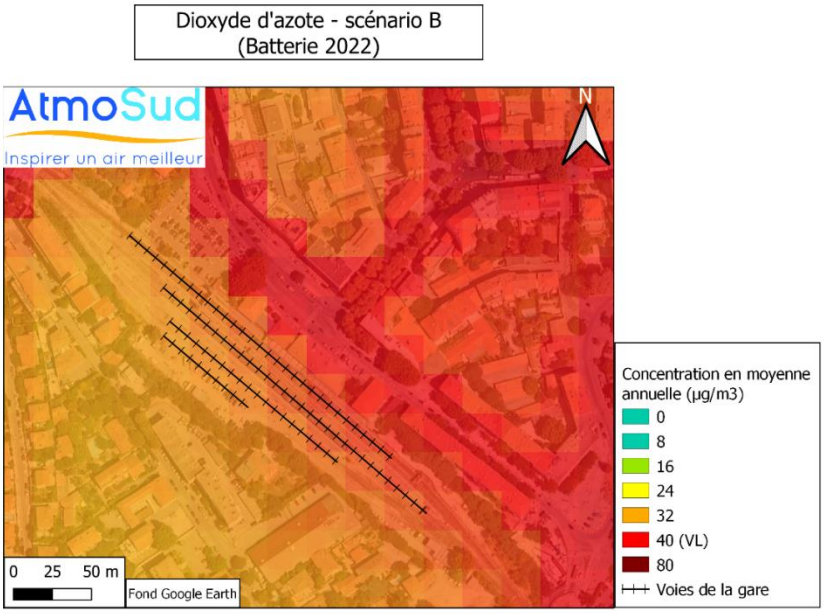


Figure 15 : Cartographie des concentrations du NO_2 pour l'année 2022 avec le scénario B (Batterie)

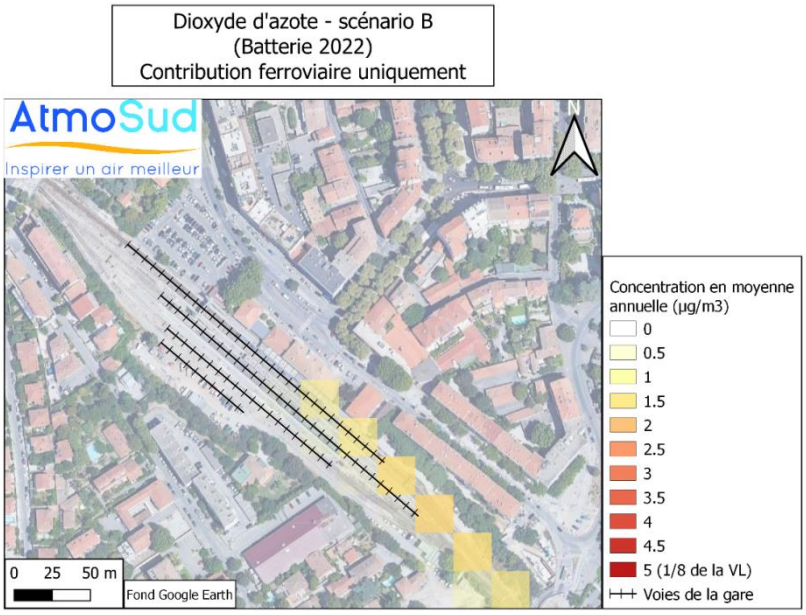


Figure 16 : Cartographie des concentrations du NO_2 pour l'année 2022 avec le scénario B (Batterie), contribution du ferroviaire uniquement

4.2.4 Évolution entre la référence 2016 et les différents scénarios

La Figure 17 montre l'évolution entre le scénario A (MGA2) et le scénario B (alternative batterie). Comme vu précédemment, l'usage de batterie en remplacement du diesel permet de réduire fortement les émissions de NOx. L'impact sur les concentrations en NO_2 en gare d'Aix-en-Provence est significatif avec une baisse des niveaux pouvant aller jusqu'à environ 4 µg/m^3 sur la moyenne annuelle.

Une amélioration est également attendue entre l'état de référence 2016 et le scénario B (alternative batterie) avec une diminution des concentrations en NO_2 pouvant atteindre 1.6 µg/m^3 sur la moyenne annuelle en gare (Figure 18).

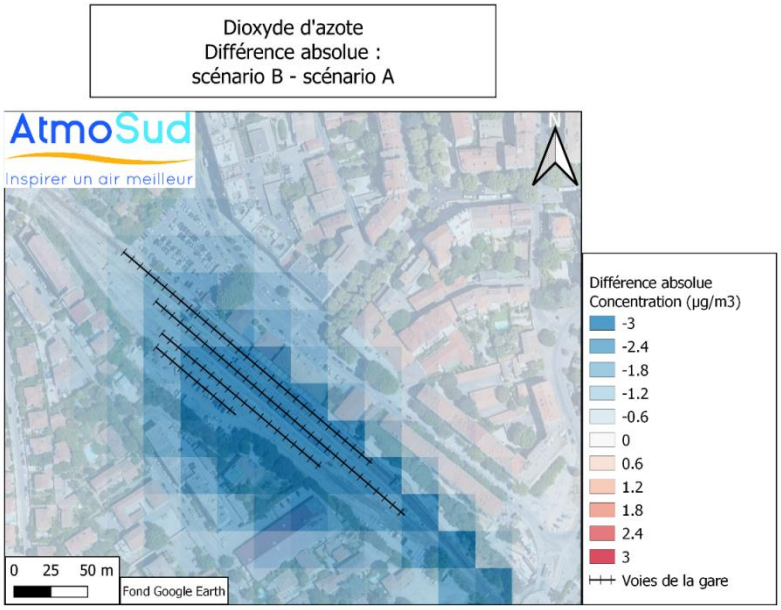


Figure 17 : Cartographie des différences absolues des concentrations en NO_2 entre le scénario B et le scénario A

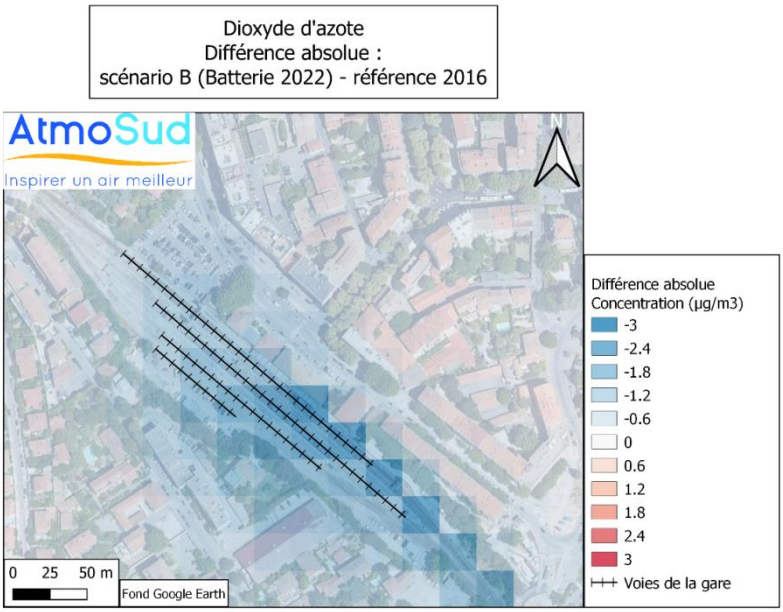


Figure 18 : Cartographie des différences absolues des concentrations en NO_2 entre le scénario B (Batterie 2022) et la référence 2016

L'usage de **batteries** permettra aux trains en attente de ne plus émettre de polluants. Avec le **scénario B**, une **diminution des concentrations en NO_2** est attendue. La **qualité de l'air en gare** devrait ainsi s'**améliorer** par rapport à la situation de référence 2016.

4.2.5 Les autres polluants particulaires

Les émissions de polluants particulaires des trains stationnant en gare sont très faibles par rapport aux émissions des trains en circulation : elles représentent moins de 1% du total (émissions en gare + émissions en circulation). Les contributions du ferroviaire seul sont faibles et non significatives (inférieures à 1 µg/m^3). Seules les cartes de concentrations en PM10 et PM2.5 pour l'année de référence 2016 sont présentées en Figure 19 et Figure 20. Elles illustrent l'absence de problématique liée aux particules au niveau de la gare d'Aix-en-Provence.

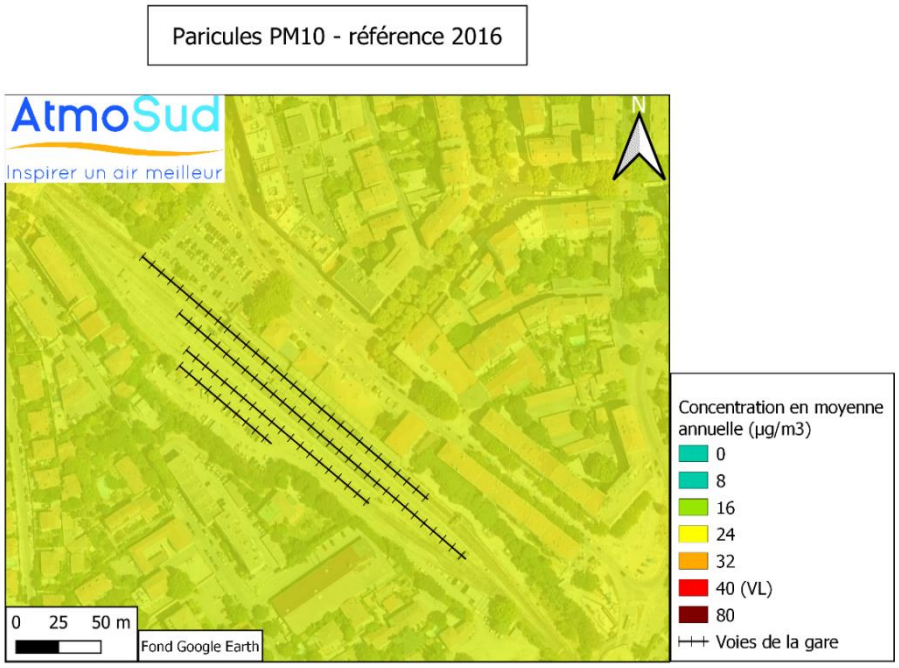


Figure 19 : Cartographie des concentrations en PM10 pour l'année de référence 2016

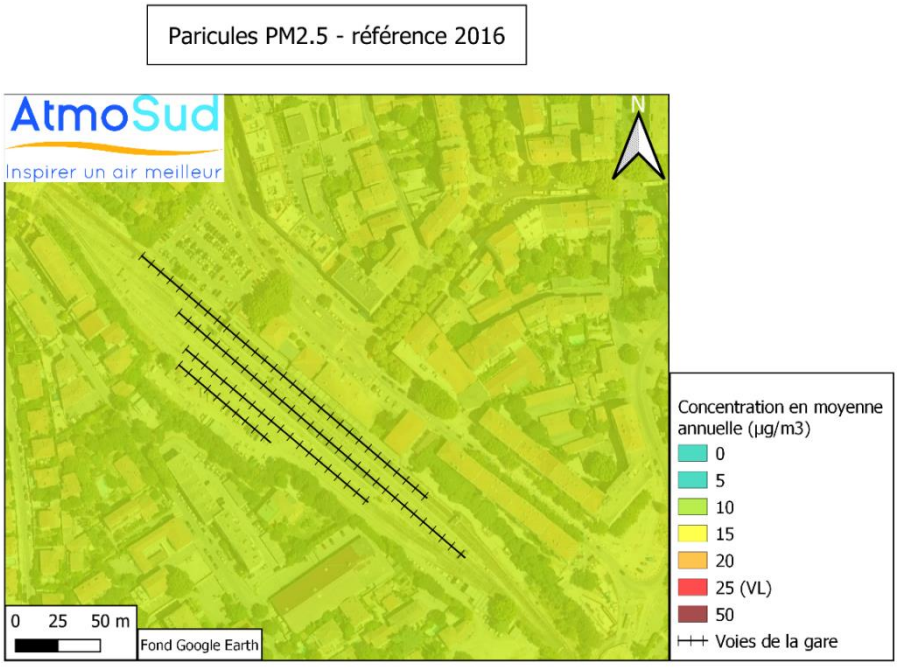


Figure 20 : Cartographie des concentrations en PM2.5 pour l'année de référence 2016

5. Conclusion

L'évaluation du projet de modernisation de la SNCF entre les gares d'Aix-en-Provence et Marseille a étudié les impacts en termes de qualité de l'air de 2 scénarios :

- **Scénario A - MGA2** : augmentation des rotations entre Aix-en-Provence et Marseille
- **Scénario B - alternative batterie** : augmentation des rotations entre Aix-en-Provence et Marseille avec l'utilisation d'une alternative batterie pour une partie des engins

Ces scénarios ont été comparés à la situation de référence de 2016 en termes d'**émissions** et de **concentrations** dans l'air ambiant sur l'intégralité de la ligne ferroviaire et en gare d'Aix-en-Provence.

L'étude de la situation de référence démontre que **l'impact du ferroviaire est faible** en termes d'émissions par rapport aux autres secteurs d'activité. À Aix en Provence, ce secteur est responsable de **seulement 1% des émissions en NOx** et moins de 1% des émissions en particules. Ce faible impact sur les émissions implique des **contributions faibles dans la dégradation de la qualité de l'air** environnant les voies et la gare d'Aix-en-Provence pour le NO_2 et les particules PM10 et PM2.5.

Le **scénario A - MGA2** qui prévoit une augmentation d'environ 25% des rotations entre Aix-en-Provence et Marseille **engendre une hausse des émissions** de NOx et de particules liée à un usage plus important de moteur diesel et à une augmentation de l'usure des équipements.

Ce scénario a **des effets négatifs sur les concentrations de NO_2 en air ambiant**. Dans certaines situations particulières telles que les têtes de tunnel ou la proximité d'axes routiers fréquentés, il peut contribuer à la dégradation de la qualité de l'air et participer aux dépassements du seuil règlementaire du NO_2.

Les niveaux de **particules** augmentent également mais **l'impact n'est pas significatif** du fait d'une très faible contribution et de niveaux de fond élevés en PM10 et PM2.5.

Le **scénario B - alternative batterie** réduit l'impact de la hausse du trafic ferroviaire en diminuant significativement l'usage des moteurs diesel dans la flotte de train circulant et stationnant en gare.

Ce scénario conduit à une forte réduction des émissions de NOx. En termes d'impact sur la qualité de l'air, ce scénario **réduit les concentrations de NO_2 par rapport à la situation de référence 2016**, au niveau des voies de circulation ainsi qu'en gare d'Aix-en-Provence.

Cette baisse est moins marquée **pour les particules**. De plus, l'usage de batteries n'évite pas l'usure du matériel roulant génératrice de poussières. Pour les particules, ce scénario n'a **pas d'effet significatif**. Cela s'explique par la faible contribution du ferroviaire dans les concentrations de PM10 et de PM2.5.

Le **bilan global d'émissions de CO_2** est également **positif pour le scénario B – alternative batterie**. En totalisant les émissions directes de CO_2 ainsi que celles indirectes, dues à la production d'électricité, ce scénario permet une **diminution globale de 1 800 T/an de CO_2** par rapport à l'année de référence 2016.

Ce projet de modernisation faisant **l'usage d'une propulsion alternative par batterie** permettra une diminution des concentrations de polluants dans l'air ambiant, au niveau des voies et en gare. Ce projet **montre les efforts engagés par la SNCF pour réduire l'impact de son activité sur la qualité de l'air**.

Le doublement des rotations entre Aix-en-Provence et Marseille **permettra également d'encourager l'usage des Transports en Commun** dont l'impact sur les émissions et les concentrations est réduit par rapport à l'usage de véhicules particuliers.

GLOSSAIRE

Définitions

Lignes directrices OMS : Seuils de concentration définis par l'OMS et basés sur un examen des données scientifiques accumulées. Elles visent à offrir des indications sur la façon de réduire les effets de la pollution de l'air sur la santé. Elles constituent des cibles à atteindre qui confère une protection suffisante en termes de santé publique.

Maximum journalier de la moyenne sur huit heures : Il est sélectionné après examen des moyennes glissantes sur huit heures, calculées à partir des données horaires et actualisées toutes les heures. Chaque moyenne sur huit heures ainsi calculée est attribuée au jour où elle s'achève ; autrement dit, la première période considérée pour le calcul sur un jour donné sera la période comprise entre 17 h la veille et 1 h le jour même ; la dernière période considérée pour un jour donné sera la période comprise entre 16 h et minuit le même jour.

Pollution de fond et niveaux moyens : La pollution de fond correspond à des niveaux de polluants dans l'air durant des périodes de temps relativement longues. Elle s'exprime généralement par des concentrations moyennées sur une année (pour l'ozone, on parle de niveaux moyens exprimés généralement par des moyennes calculées sur huit heures). Il s'agit de niveaux de pollution auxquels la population est exposée le plus longtemps et auxquels il est attribué l'impact sanitaire le plus important.

Pollution de pointe : La pollution de pointe correspond à des niveaux de polluants dans l'air durant des périodes de temps courtes. Elle s'exprime généralement par des concentrations moyennées sur la journée ou l'heure.

Procédures préfectorales : Mesures et actions de recommandations et de réduction des émissions par niveau règlementaire et par grand secteur d'activité.

Seuil d'alerte à la population : Niveau de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère, au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine ou la dégradation de l'environnement, justifiant l'intervention de mesures d'urgence.

Seuil d'information-recommandations à la population : Niveau de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère, au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine des groupes particulièrement sensibles de la population, rendant nécessaires des informations immédiates et adéquates.

Objectif de qualité : n niveau de concentration à atteindre à long terme, sauf lorsque cela n'est pas réalisable par des mesures proportionnées, afin d'assurer une protection efficace de la santé humaine et de l'environnement.

Valeur cible : Un niveau de concentration fixé dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine et/ou l'environnement dans son ensemble, à atteindre dans la mesure du possible sur une période donnée.

Valeur limite : Un niveau de concentration fixé sur la base des connaissances scientifiques, dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine et/ou l'environnement dans son ensemble, à atteindre dans un délai donné et à ne pas dépasser une fois atteint.

Couche limite : Couche atmosphérique en contact direct avec la surface terrestre, dans laquelle se produisent des modifications d'un point de vue dynamique et thermique. Son épaisseur varie d'une centaine de mètres à quelques kilomètres selon les caractéristiques du sol (rugosité, relief, …), la saison (humidité, flux de chaleur, température).

Particules d'origine secondaires : Les particules secondaires résultent de la conversion en particules, des gaz présents dans l'atmosphère. Cette conversion, soit directement gaz-solide, soit par l'intermédiaire des gouttes d'eau, est appelée nucléation. La nucléation est le mécanisme de base de la formation des nouvelles particules dans l'atmosphère. Les principaux précurseurs impliqués dans la formation des particules secondaires sont le dioxyde de soufre (SO_2), les oxydes d'azote (NOx et nitrates), les composés organiques volatils (COV) et l'ammoniac (NH3). Les particules secondaires sont essentiellement des particules fines (<2.5 µm).

AOT 40 : Égal à la somme des différences entre les concentrations horaires d'ozone supérieures à 80 µg/m^3 (mesurés quotidiennement entre 8 h et 20 h, heure d'Europe Centrale) et la valeur 80 µg/m^3 pour la période du 1er mai au 31 juillet de l'année N. La valeur cible de protection de la végétation est calculée à partir de la moyenne sur 5 ans de l'AOT40. Elle s'applique en dehors des zones urbanisées, sur les Parcs Nationaux, sur les Parcs Naturels Régionaux, sur les réserves Naturelles Nationales et sur les zones arrêtées de Protection de Biotope.

Percentile 99,8 (P 99,8) : Valeur respectée par 99,8 % des données de la série statistique considérée (ou dépassée par 0,2 % des données). Durant l'année, le percentile 99,8 représente dix-huit heures.

Sigles

AASQA : Association Agrées de Surveillance de la Qualité de l'Air

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

ANTS : Association Nationale des Techniques Sanitaires

ARS : Agence Régionale de Santé

CSA : Carte Stratégique Air

CERC : Cellule Économique Régionale du BTP PACA

DRAAF : Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt de la région PROVENCE-ALPES-CÔTE-D'AZUR

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

EPCI : Etablissement Public de Coopération Intercommunale

EQAIR : Réseau Expert Qualité de l'Air intérieur en région PROVENCE-ALPES-CÔTE-D'AZUR

IARC : International Agency for Research on Cancer

ISA : Indice Synthétique Air

LCSQA : Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air

OMS : Organisation Mondiale de la Sante

ORP PROVENCE-ALPES-CÔTE-D'AZUR : Observatoire des résidus de Pesticides en région PROVENCE-ALPES-CÔTE-D'AZUR

PCAET : Plan climat air énergie territorial

PDU : Plan de Déplacements Urbains

PLU : Plan local d'Urbanisme

PPA : Plan de Protection de l'Atmosphère

PRSA : Plan Régional de Surveillance de la qualité de l'Air

SCoT : Schéma de Cohérence Territoriale

ZAS : Zone Administrative de Surveillance

Unité de mesures

mg/m^3 : milligramme par mètre cube d'air (1 mg = 10^{-3} g = 0,001 g)

$\mu g/m^3$: microgramme par mètre cube d'air (1 µg = 10^{-6} g = 0,000001 g)

ng/m^3 : nanogramme par mètre cube d'air (1 ng = 10^{-9} g = 0,000000001 g)

TU : Temps Universel

Polluants

As : Arsenic

B(a)P : Benzo(a)Pyrène

BTEX : Benzène - Toluène - Éthylbenzène - Xylènes

C_6H_6 : Benzène

Cd : Cadmium

CO : Monoxyde de carbone

CO_2 : Dioxyde de carbone

COV : Composés Organiques Volatils

COVNM : Composés Organiques Volatils Non Méthaniques

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

ML : Métaux lourds (Ni, Cd, Pb, As)

Ni : Nickel

NO / NO_2 : Monoxyde d'azote / Dioxyde d'azote

NOx : Oxydes d'azote

O_3 : Ozone

Pb : Plomb

PM non volatile : Fraction des particules en suspension présente dans l'air ambiant qui ne s'évapore pas à 50°C.

PM volatile : Fraction des particules en suspension qui s'évaporent entre 30°C et 50°C. Cette fraction des particules est mesurée depuis 2007.

PM 10 : Particules d'un diamètre < 10 µm

PM 2.5 : Particules d'un diamètre < 2,5 µm

SO_2 : Dioxyde de soufre

Classification des sites de mesure

Cette classification a fait l'objet d'une mise à jour au niveau national en 2015. Les stations de mesures sont désormais classées selon 2 paramètres leur environnement d'implantation et l'influence des sources d'émission.

Environnement d'implantation

- **Implantation urbaine** : Elle correspond à un emplacement dans une zone urbaine bâtie en continu, c'est-à-dire une zone urbaine dans laquelle les fronts de rue sont complètement (ou très majoritairement) constitués de constructions d'au minimum deux étages
- **Implantation périurbaine** : Elle correspond à un emplacement dans une zone urbaine majoritairement bâtie, constituée d'un tissu continu de constructions isolées de toutes tailles, avec une densité de construction moindre
- **Implantation rurale** : Elle est principalement destinée aux stations participant à la surveillance de l'exposition de la population et des écosystèmes à la pollution atmosphérique de fond, notamment photochimique.

Influence des sources

- **Influence Industrielle** : Le point de prélèvement est situé à proximité d'une source (ou d'une zone) industrielle. Les émissions de cette source ont une influence significative sur les concentrations.
- **Influence Trafic** : Le point de prélèvement est situé à proximité d'un axe routier majeur. Les émissions du trafic ont une influence significative sur les concentrations.
- **Influence de Fond** : Le point de prélèvement n'est soumis à aucun des deux types d'influence décrits ci-après. L'implantation est telle que les niveaux de pollution sont représentatifs de l'exposition moyenne de la population (ou de la végétation et des écosystèmes) en général au sein de la zone surveillée. Généralement, la station est représentative d'une vaste zone d'au moins plusieurs km².

ANNEXES

ANNEXE 1 Zones à enjeux et exposition des populations

► Zones à enjeux et exposition des populations

La diversité des polluants surveillés reflète les multiples sources d'émission et activités anthropiques du territoire : particules fines (PM10, PM2.5), dioxyde d'azote (NO_2), ozone (O_3), benzène (C_6H_6), monoxyde de carbone (CO), dioxyde de carbone (CO_2)…

Même si la tendance d'évolution des concentrations est globalement à la baisse (-32 % de NO_2 sur les Bouches-du-Rhône depuis les années 2000, par exemple), cette dynamique est inégale et la situation peut rester dégradée en fonction des zones.

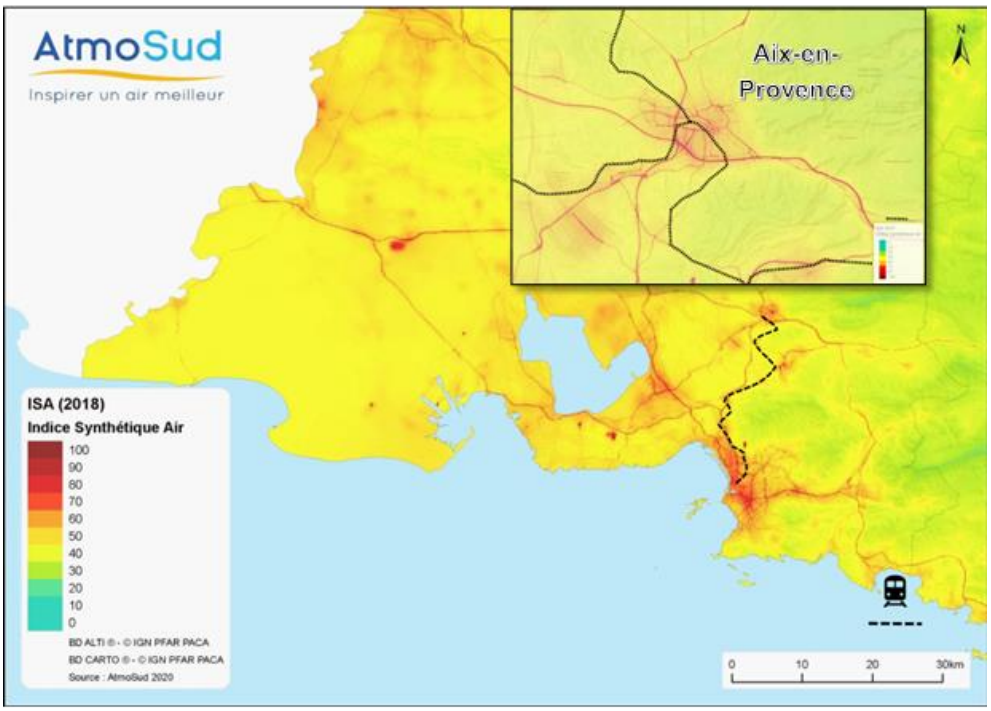


Figure 21 : Carte de l'indicateur combiné (ISA 2018) des concentrations de NO_2, PM10 et O_3

Les zones à enjeux correspondent aux axes à fort trafic et aux zones urbaines denses. **3.5 % de la population de Marseille sont encore exposés à des teneurs supérieures aux valeurs limites (polluants NO_2)**

Les secteurs sensibles de la métropole d'Aix-Marseille, visible Figure 21, sont le centre urbain de Marseille avec 30 000 personnes exposées, quartiers sud-ouest d'Aix en Provence et Martigues avec un millier de personnes exposées, et la zone industrielle de l'étang de Berre (66 communes) pour laquelle une première évaluation des risques sanitaires met en évidence cette zone à enjeu.

Sur Marseille moins de 500 personnes sont exposées à la valeur limite avec le polluant PM10. Cependant 248 000 personnes sont exposées à la ligne directrice fixée par l'OMS, soit 29% de la population.

Depuis plusieurs années, les niveaux de PM10 et de NO_2 ne respectent pas les v**aleurs réglementaires européennes dans certaines villes** françaises. Le territoire de la Métropole Aix-Marseille-Provence, avec Marseille, est ainsi concerné par deux procédures précontentieuses (pour les PM10) et contentieuses (pour le NO_2) européennes relatives au non-respect de la directive 2008/50/CE du 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe. Depuis 2010, la France est saisie et sommée par l'Union Européenne de mettre en place des plans permettant de respecter les valeurs limites réglementaires en polluants atmosphériques.

ANNEXE 2 Les sources de pollutions de l'air

► À l'échelle de la région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur

L'inventaire régional des émissions permet le suivi depuis 2007 des émissions directes de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre, par secteur d'activité (sectorisation format PCAET) et pour chaque commune de la région Sud. AtmoSud réalise une mise à jour annuelle de cet inventaire. La dernière version disponible est l'inventaire 2017 (version 6). L'année de référence dans le cadre de cette étude est l'année 2016, correspondant à l'année de référence du projet de modernisation de la ligne ferroviaire.

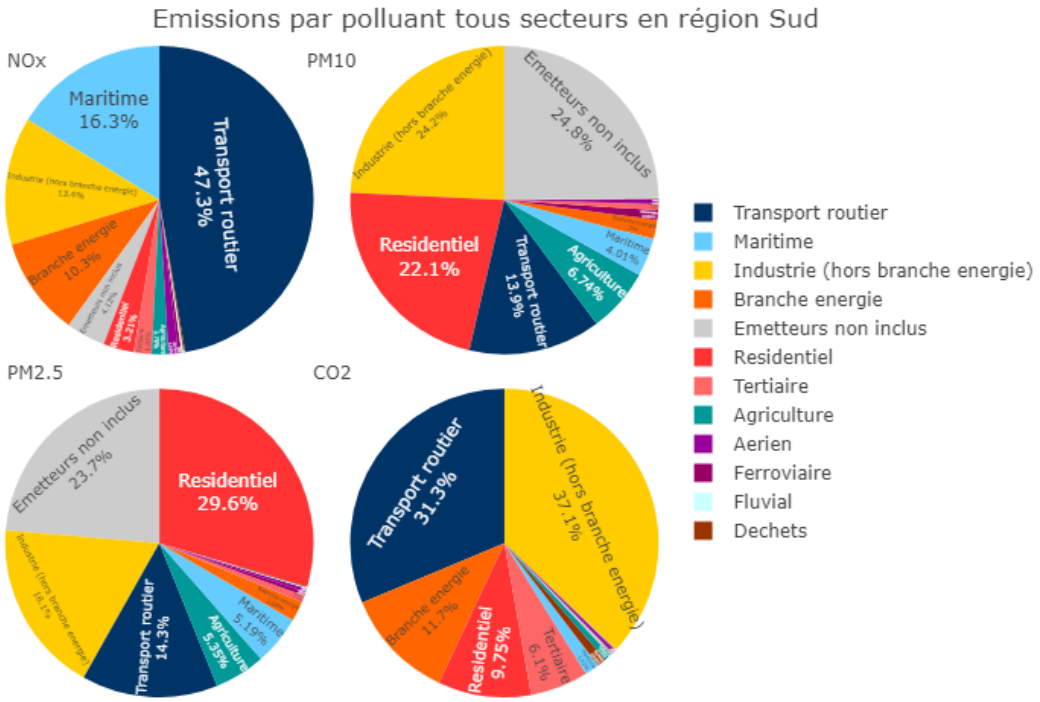


Figure 22 : Pourcentage de contribution de chaque secteur par polluant sur la région Sud, année 2016 (source : inventaire version 6)

A l'échelle de la région Sud (Figure 22) :

- Les transports (routiers et non routiers dont maritime) représentent : 66 % des émissions de NOx, 19 % des émissions de PM10, 20 % des émissions de PM2.5 et 32% des émissions de CO_2.
- L'industrie, le traitement des déchets et la production d'énergie représentent 23% des émissions de NOx, 26 % des émissions de PM10, 20 % des émissions de PM2.5 et 50 % des émissions de CO_2.
- Le résidentiel (dont le chauffage au bois) représente 22 % des émissions de PM10 et 30 % des émissions de PM2.5.

Les émetteurs non inclus regroupent les émissions non prises en compte dans les totaux sectoriels ainsi que les sources non anthropiques. Il s'agit notamment de la remise en suspension des particules fines, des feux de forêt et des sources naturelles (végétation, NOx et COVNM des champs et cultures, NOx des cheptels).

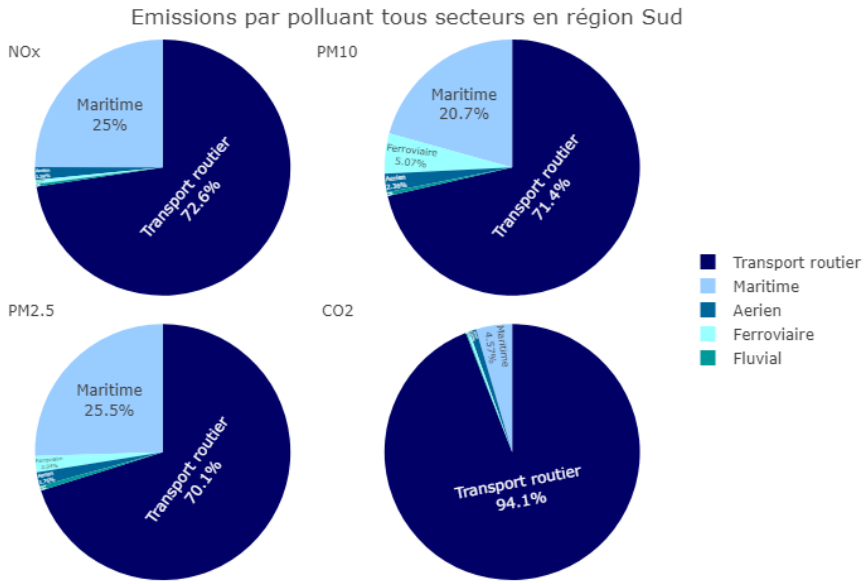


Figure 23 : Pourcentage de contribution de chaque secteur de transport par polluant sur la région Sud, année 2016 (source : inventaire version 6)

En s'interessant uniquement aux secteurs du transport sur la région Sud (Figure 23), les émissions de particules issues du secteur ferroviaire contribuent à hauteur de 5 % pour les PM10 et 2.5 % pour les PM2.5, des émissions totales de particules issues des secteurs du transport de la région. Les émissions de NOx et de CO_2 issues du secteur ferroviaire sont minoritaires à l'échelle de la région en comparaison avec les autres secteurs du transport, tel que le trafic routier (CO_2 : 94 %) et le maritime (NOx : 25 %).

► À l'échelle de la commune d'Aix-en-Provence

Sur la commune d'Aix-en-Provence (Figure 24) :

- Le transport routier reste la principale source d'émission concernant les NOx et de CO_2.
- Le résidentiel contribue à 26 % des émissions de PM2.5, 20 % des PM10 et 15 % du CO_2.
- Le ferroviaire contribue à 1 % des émissions de NOx.

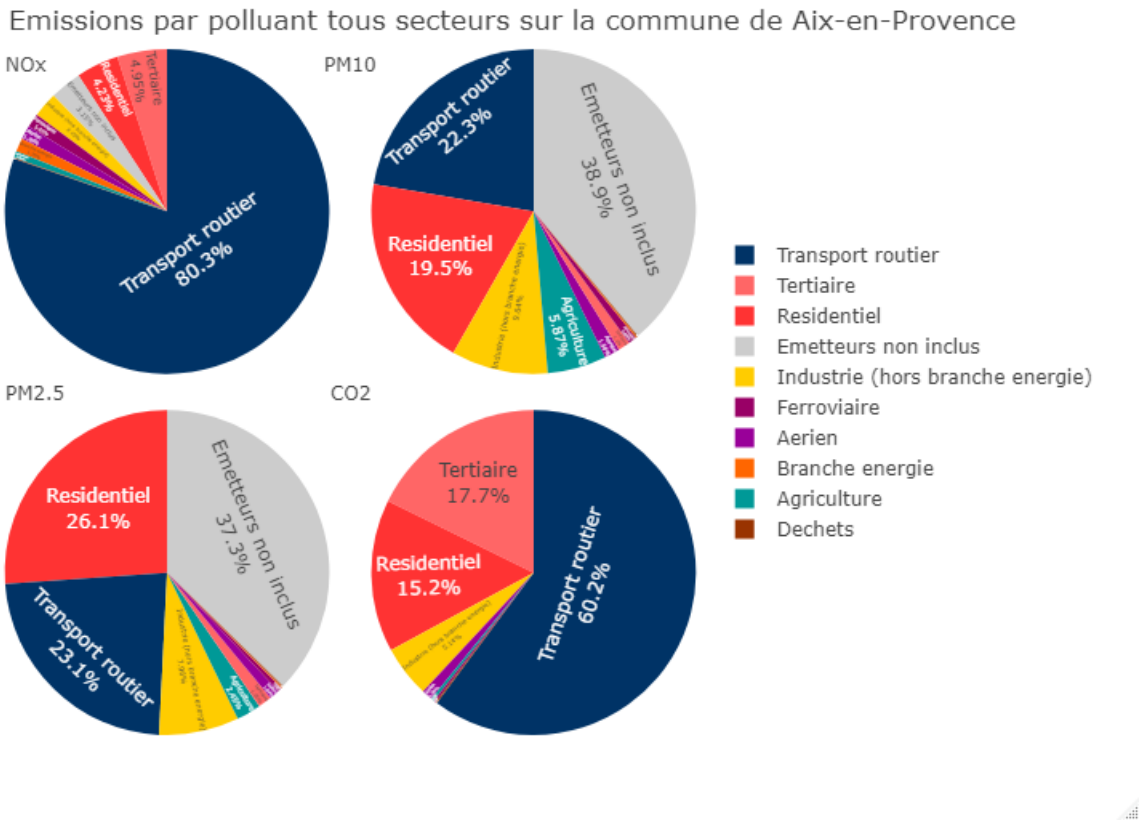
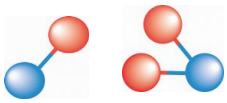


Figure 24 : Pourcentage de contribution de chaque secteur par polluant sur la commune d'Aix-en-Provence, année 2016 (source : inventaire version 6)

Les émetteurs non inclus regroupent les émissions non prises en compte dans les totaux sectoriels ainsi que les sources non anthropiques. Il s'agit notamment de la remise en suspension des particules fines, des feux de forêt et des sources naturelles (végétation, NOx et COVNM des champs et cultures, NOx des cheptels).

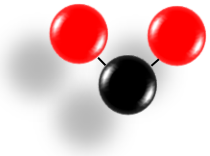
ANNEXE 3 Polluants visés par l'étude

► NOx (oxydes d'azote)



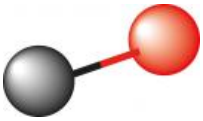
Le terme « oxydes d'azote » **désigne le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO_2)**. Ces composés sont formés par oxydation de l'azote atmosphérique (N_2) lors des combustions (essentiellement à haute température) de carburants et de combustibles fossiles. Le dioxyde d'azote (NO_2) est émis lors des phénomènes de combustion, principalement par combinaison de l'azote et de l'oxygène de l'air. **Les sources principales sont les véhicules et les installations de combustion.**

► CO_2 (Le dioxyde de carbone)



Le dioxyde de carbone (CO_2) résulte essentiellement de la combustion des énergies fossiles et du changement d'utilisation des sols (agriculture et déforestation). Il est surtout issu du secteur des transports (combustion de carburants), de l'industrie (utilisation d'énergies fossiles) et de l'habitat (utilisation d'énergie pour le chauffage, l'éclairage…).

► CO (Le monoxyde de carbone)



Le monoxyde de carbone (CO) est un gaz incolore et inodore. Sa présence résulte d'une combustion incomplète (mauvais fonctionnement de tous les appareils de combustion, mauvaise installation, absence de ventilation), et ce quel que soit le combustible utilisé (bois, butane, charbon, essence, fuel, gaz naturel, pétrole, propane).

► PM10 et PM2.5 (Les particules fines)



Les particules proviennent en majorité de la combustion à des fins énergétiques de différents matériaux (bois, charbon, pétrole), du transport routier (imbrûlés à l'échappement, usure des pièces mécaniques par frottement, des pneumatiques…), d'activités industrielles très diverses (sidérurgie, incinération, chaufferie) et du brûlage de la biomasse (incendie, déchets verts).

Certaines particules sont produites dans l'air ambiant sous l'effet de réactions chimiques entre polluants gazeux (COV…). La surveillance réglementaire porte sur des mesures de masse des particules PM10 (diamètre inférieur à 10 µm) et des particules PM2.5 (diamètre inférieur à 2.5 µm).

La matière particulaire (PM) ou aérosol est constituée de particules solides ou liquides en suspension dans l'air. Leurs effets sur la santé et l'environnement dépendent de la chimie complexe de ces aérosols et surtout de leur taille. Leur taille s'étend sur plusieurs ordres de grandeur : un facteur 100 000 sépare les nanoparticules et les particules sédimentables. La Figure 25 donne une illustration de cette granulométrie

Les catégories de tailles de particules les plus usuelles sont :

- **PM10** : d'un diamètre inférieur à 10 micromètres, elles sont dites « respirables » ou « inhalables » car elles pénètrent dans les bronches
- **PM2.5** : d'un diamètre inférieur à 2,5 micromètres, elles sont appelées « particules fines ».
- **PM1 :** d'un diamètre est inférieur à 1,0 micromètre, ces particules **submicroniques** sont aussi appelées « particules très fines ».

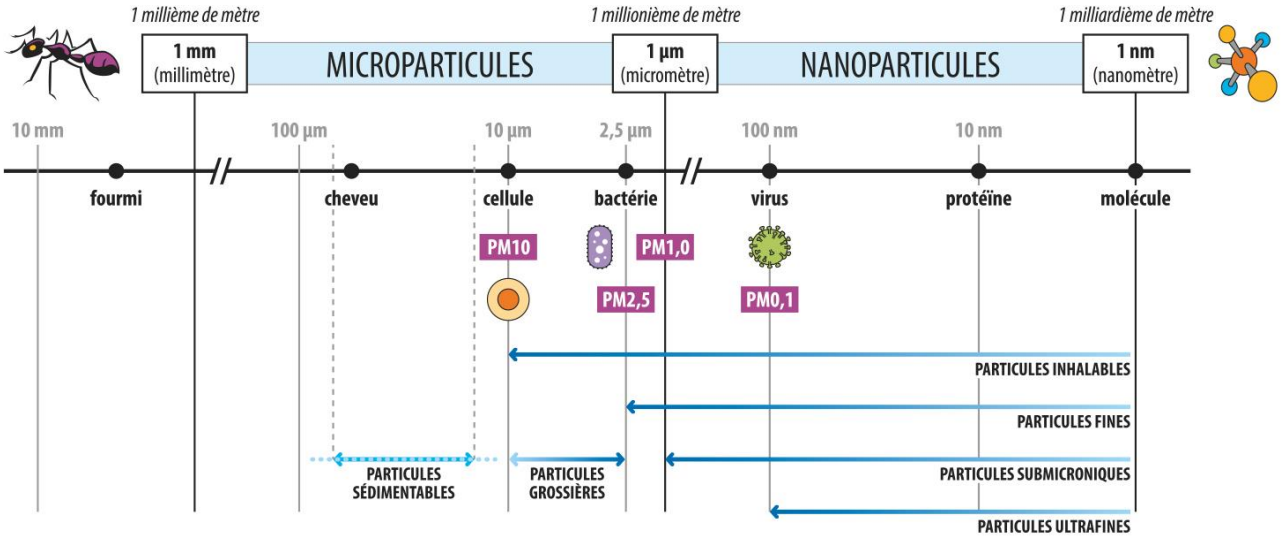


Figure 25: Les classes de taille des particules

ANNEXE 4 Effets sur la santé et sur l'environnement

Les polluants atmosphériques ont un impact sur la santé variable en fonction de leur concentration dans l'air, de la dose inhalée et de la sensibilité des individus. Ils peuvent aussi avoir des incidences sur l'environnement.

Polluants	Effets sur la santé	Effets sur l'environnement
Particules en suspension	- irritation des voies respiratoires - dans certains cas, altération des fonctions pulmonaires	- effets de salissures sur les bâtiments - altération de la photosynthèse
NO_X **Oxydes d'azote**		- pluies acides - précurseur de la formation d'ozone - effet de serre - déséquilibre les sols sur le plan nutritif
CO Monoxyde de carbone	Il agit comme un gaz asphyxiant très toxique qui, absorbé en quelques minutes par l'organisme, se fixe sur l'hémoglobine. Les effets : • Manque d'oxygénation du système nerveux, du cœur et des vaisseaux sanguins. • Nausées, vomissements, vertiges, fatigue, maux de tête. Peut provoquer asphyxie voire la mort (exposition élevée et prolongée).	Le monoxyde de carbone participe au mécanisme de production de l'ozone troposphérique et contribue également à l'effet de serre en se transformant en dioxyde de carbone (CO_2).
CO_2 Dioxyde de carbone	L'air contient aujourd'hui environ 0,04 % de CO_2. À partir d'une certaine concentration dans l'air, ce gaz s'avère dangereux voire mortel. La valeur limite d'exposition est de 3 % sur une durée de 15 minutes. Cette valeur ne doit jamais être dépassée. Au-delà, les effets sur la santé sont d'autant plus graves que la teneur en CO2 augmente. Ainsi, à 2 % de CO2 dans l'air, l'amplitude respiratoire augmente. À 4 %, la fréquence respiratoire s'accélère. À 10 %, peuvent apparaître des troubles visuels, des tremblements et des sueurs. À 15 %, c'est la perte de connaissance brutale. À 25 %, un arrêt respiratoire entraîne le décès.	Le dioxyde de carbone (CO2) représente 77% des émissions de gaz à effets de serre (GES) d'origine humaine.

ANNEXE 5 Réglementation et recommandations OMS

Réglementation

En matière de surveillance de la qualité de l'air, la réglementation se base essentiellement sur :

- La directive 2008/50/CE concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe,
- La directive 2004/107/CE concernant l'arsenic, le cadmium, le mercure, le nickel et les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'air ambiant,
- L'article R221-1 du Code de l'Environnement.

Les valeurs réglementaires sont exprimées en µg/m3. L'expression du volume doit être ramenée aux conditions de température et de pression suivantes : 293 K et 1013 hPa. La période annuelle de référence est l'année civile. Un seuil est considéré dépassé lorsque la concentration observée est strictement supérieure à la valeur du seuil.

Polluants	Type de réglementation	Valeurs règlementaires (µg/m³)	Durée d'exposition
PM10 Particules	**Seuil d'information- recommandations**	50	Jour
	Seuil d'alerte	80	Jour
	Valeurs limites	50	Jour (maximum 35 j / an)
		40	Année
	Objectif de qualité	30	Année
PM2.5 Particules	**Valeur limite**	25	Année
	Valeurs cibles	20	Année
	Objectif de qualité	10	Année
NO_2 Dioxyde d'azote	**Seuil d'information- recommandations**	200	Heure
	Seuil d'alerte	400	Heure
	Valeurs limites	200	Heure (maximum 18h / an)
		40	Année
CO Monoxyde de carbone	**Valeurs limites**	10 000	Jour (moyenne sur 8h)

Recommandations de l'Organisation Mondiale pour la Santé (OMS)

Les valeurs recommandées par l'OMS (2005) sont fondées sur des études épidémiologiques et toxicologiques publiées en Europe et en Amérique du Nord. Elles ont pour principal objectif d'être des références pour l'élaboration des règlementations internationales.

Il s'agit de niveaux d'exposition (concentration d'un polluant dans l'air ambiant pendant une durée déterminée) auxquels ou en dessous desquels il n'y a pas d'effet sur la sante. Ceci ne signifie pas qu'il y ait un effet dès que les niveaux sont dépassés mais que la probabilité qu'un effet apparaisse est augmentée.

Polluants	Effets considérés sur la santé	Valeur (µg/m³) recommandée par l'OMS	Durée moyenne d'exposition
PM 10 **Particules**	- affection des systèmes respiratoire et cardiovasculaire	50 20	24 heures 1 an
PM 2.5 **Particules**		25 10	24 heures 1 an
NO_2 **Dioxyde d'azote**	- faible altération de la fonction pulmonaire (asthmatiques)	200 40	1 heure 1 an
CO Monoxyde de carbone	-		

ANNEXE 6 Méthodologie déployée dans le cadre de cette étude

Pour répondre aux objectifs de l'étude, les émissions énergétiques (combustion-phase de roulage) et non-énergétiques (Usure du matériel roulant, roues, rails, freins, ainsi que l'usure des caténaires) sont calculées sur la ligne ferroviaire entre Aix-en-Provence et Marseille. Les émissions énergétiques (combustion-phase de manœuvre) sont également calculées en gare d'Aix-en-Provence. Ces calculs d'émission sont réalisés pour les différents scénarios. D'autre part lors de la précédente étude, un calcul de consommation des engins roulant avait été réalisé. Un recalcul a été réalisé en prenant en compte des modifications dans les données d'entrées.

Calcul des émissions

La méthodologie définit par le guide PCIT2 permet de calculer les émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre du secteur des transports ferroviaires de voyageurs et de marchandises.

La classification des émissions se fait par catégorie SNAP (Selected Nomenclature for Air Pollution) comme décrit dans le Tableau 4.

Tableau 9 : Nomenclature SNAP pour le secteur ferroviaire

Type d'émission	Groupe d'émission	SNAP (niveau 3)	Type de rejet atmosphérique	Méthode de calculs
Combustion (phase de roulage)	Energétique	080202 (autorails) 080203 (locomotives)	Polluants atmosphériques et GES	[Consommation du tronçon] x [FE]
Combustion (phase de manœuvre)	Energétique	080201	Polluants atmosphériques et GES	
Combustion (toute phase)	Energétique	080200	Polluants atmosphériques et GES	[Consommation du tronçon] x [FE]
Usure des freins, roues, rails (toutes phases)	Non énergétique	080204	Particules, cuivre	[Trains.kms sur le tronçon] x [FE]
Usure des caténaires (toutes phases)	Non énergétique	080205	Cuivre	[Trains.kms sur le tronçon] x [FE]

Méthode de calcul des émissions sur les voies entre Aix-en-Provence et Marseille

Cette partie concerne le calcul des émissions de polluant et de gaz à effet de serre (NOx, PM10, PM2.5, CO_2, CO) associées au roulage des motrices sur les voies entre Aix-en-Provence et Marseille pour la situation de référence (2016), le scénario MGA2 ainsi que le scénario avec l'alternative batterie.

- Dans le cas des émissions non énergétiques (usure des freins, roues, rails et usure des caténaires), les facteurs d'émissions sont issus du guide OMINEA du CITEPA.
- Dans le cas des émissions énergétiques (combustion-phase de roulage), les facteurs d'émissions sont issus des données présentées dans le Tableau 3.

Les émissions sont estimées en multipliant la distance parcourue, le TMJA, et le facteur d'émission :

$$E_{i,p} = FEi,p \times D_i \times TMJA_i \times 365$$

Avec i : Engin roulant
p : Polluant
FEi,p: Facteur d'émission pour le polluant p et par le type d'engin i
D_i : Distance parcourue par l'engin i
$TMJA_i$: Taux moyen journalier annuel de l'engin i

- Les émissions indirectes sont liées à la production d'électricité générées sur ou en dehors du territoire mais dont la consommation est localisée à l'intérieur du territoire. Les émissions de CO_2 liées à la production d'électricité qui sera nécessaire pour alimenter les motrices utilisant une propulsion sur batterie (Motrices BGC avec le scénario B) sont donc ici comptabilisées.

Le facteur d'émission (kCO_2/kWh) utilisé est issu de la base Carbone de l'ADEME (V18.0). Le facteur de consommation de l'année 2017 (kWh/km) est issu de la base de données d'AtmoSud suivant une extrapolation de 2000 à 2016.

Les émissions en équivalent dioxyde de carbone[5] (CO_2e) sont calculées de la façon suivante :

$$E_{i,p} = (Cm_i * D_i * TMJA_i * 365) * FE_{i,p}$$

Avec i : Engin roulant
p : Polluant
C_i : Consommation d'électricité (kWH/km)
FEi,p: Facteur d'émission pour le polluant p et par le type d'engin i (KCO_2/kWh)
D_i : Distance parcourue par l'engin i (km)
$TMJA_i$: Taux moyen journalier annuel de l'engin i

Tableau 10 : Facteur de consommation et facteur d'émission du CO_2 électriques.

	Valeur	Unité	Source
Facteur d'émissions	0.0386	kCO_2/kWh	ADEME (v18.0)
Facteur de consommation	13.3	kWh/km	AtmoSud

Méthode de calcul des émissions en gare d'Aix-en-Provence

Cette partie concerne le calcul des émissions de polluants et de gaz à effet de serre (NOx, PM10, PM2.5, CO_2, CO) associées aux phases de manœuvre des motrices en gare d'Aix-en-Provence pour la situation de référence (2016), le scénario MGA2 ainsi que le scénario avec propulsion par batterie.

Les émissions sont donc estimées en multipliant les temps de retournement aux facteurs d'émission issus du Tableau 4.

$$E_{i,p} = T_i * FE_{i,p}$$

Avec i : Engin roulant
p : Polluant
FEi,p: Facteur d'émission pour le polluant p et par le type d'engin i
T : Temps passé en gare moteur au ralenti

Pour annualiser les émissions en gare et dans le but d'estimer au mieux les émissions, il est estimé que durant le week-end le trafic est réduit de moitié dans le cas des engins BGC, FRET et qu'il représente 90% du trafic des jours ouvrés pour les engins XTER.

[5] CO2e ou équivalent dioxyde de carbone correspond à la masse de dioxyde de carbone qui aurait le même potentiel de réchauffement climatique qu'une quantité donnée d'un autre gaz à effet de serre. En France, près de 80 % de l'électricité provient du nucléaire, 12 % de l'hydraulique et 6 % de l'éolien. Ces différents modes de production libèrent différent type de gaz à effet de serre. C'est pourquoi on parle de CO2e dans le cas d'un calcul lié à la production d'électricité.

Calcul des consommations

Le calcul des consommations de gazole sur le tronçon Aix-Marseille se fait comme suit :

$$C_i = Cm_i \times D_i \times TMJA_i \times 365$$

Avec i : Engin roulant
Cm_i : Consommation moyenne de l'engin i
D_i : Distance parcourue par l'engin i
$TMJA_i$: Taux moyen journalier annuel de l'engin i

Calcul des concentrations en air ambiant

Le calcul des concentrations en air ambiant se fait à partir d'un modèle numérique qui reproduit les phénomènes physiques de dispersion de polluant. La modélisation permet d'estimer les concentrations en moyenne annuelle des polluants NO_2, PM10 et PM2.5 et de représenter spatialement la répartition des polluants en gare d'Aix-en-Provence (zone d'étude dite en gare) et le long de la voie ferrée reliant les gares d'Aix-en-Provence et de Marseille (zone d'étude dite en circulation).

Outil numérique utilisé

Le modèle utilisé dans le cadre de cette étude est ADMS-Urban (v3.1) [Atmospheric Dispersion Modelling System] développé par le CERC [Cambridge Environnemental Research Consultant]. Il permet de reproduire la dispersion de polluants émis dans l'atmosphère par différents types de sources (industrielles, routières, résidentielles, …) en fonction des conditions météorologiques.

Sa formulation de type gaussienne est adaptée aux études réalisées à des résolutions spatiales fines en permettant une grande liberté dans le positionnement des points de calculs. Il est alors possible de répartir ces points à des distances plus ou moins proches des sources d'émissions pour reproduire le plus finement possible les variations de concentrations dans les zones d'intérêts. Pour cette étude, la résolution finale de restitution des champs de concentrations est de 25 mètres sur l'ensemble du domaine.

Données d'entrée et hypothèses pour la modélisation

Pour évaluer l'impact des deux scénarios (MGA2 et alternative batterie) sur la qualité de l'air, un calcul ADMS a été réalisé pour chaque scénario avec les mêmes conditions météorologiques, à savoir celles de l'année de référence 2016. Ces conditions météorologiques sont calculs avec le modèle WRF (v3.8) [Weather Research Forecast] opéré par AtmoSud notamment dans le cadre de sa mission de prévisions quotidiennes.

Les émissions estimées en gare sont spatialisées sur des linéaires représentants les voies de stationnement des trains en gare d'Aix-en-Provence et illustrée par la figure 6.

Les émissions calculées pour les trains en circulation sont spatialisées sur les 36km du tracé entre Aix-en-Provence et Marseille. Ce tracé intègre 10 portions de voies modélisées comme des tunnels, représentées sur la figure 7.

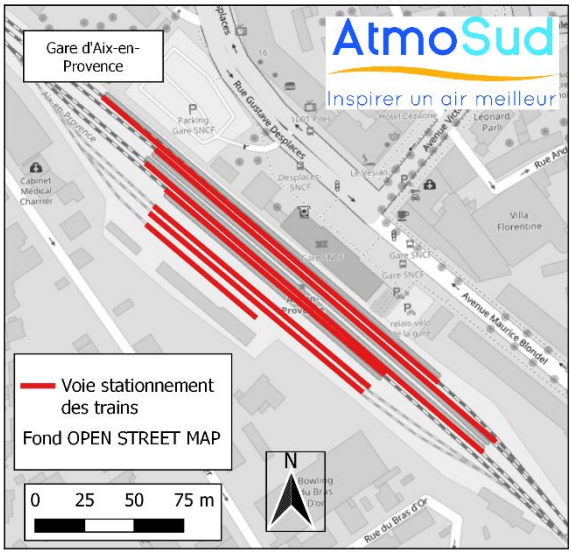


Figure 26 : source d'émission linéaire pour les trains en gare

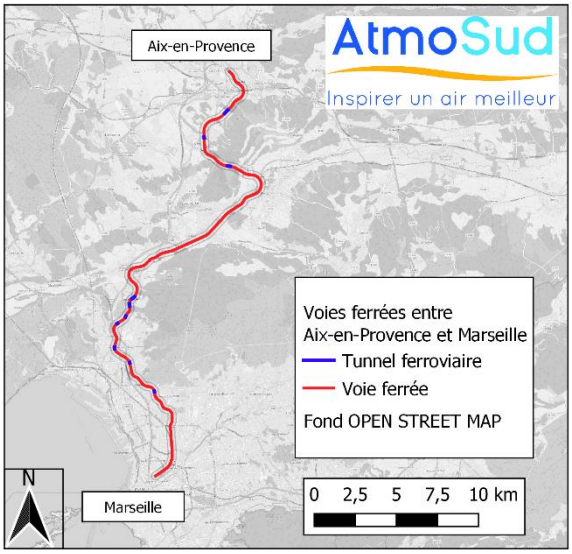


Figure 27 : source d'émission linéaire pour les trains en circulation

ANNEXE 7 Impacts des trains en circulation sur les concentrations en air ambiant : polluants particulaires

Cartographies pour les particules PM10

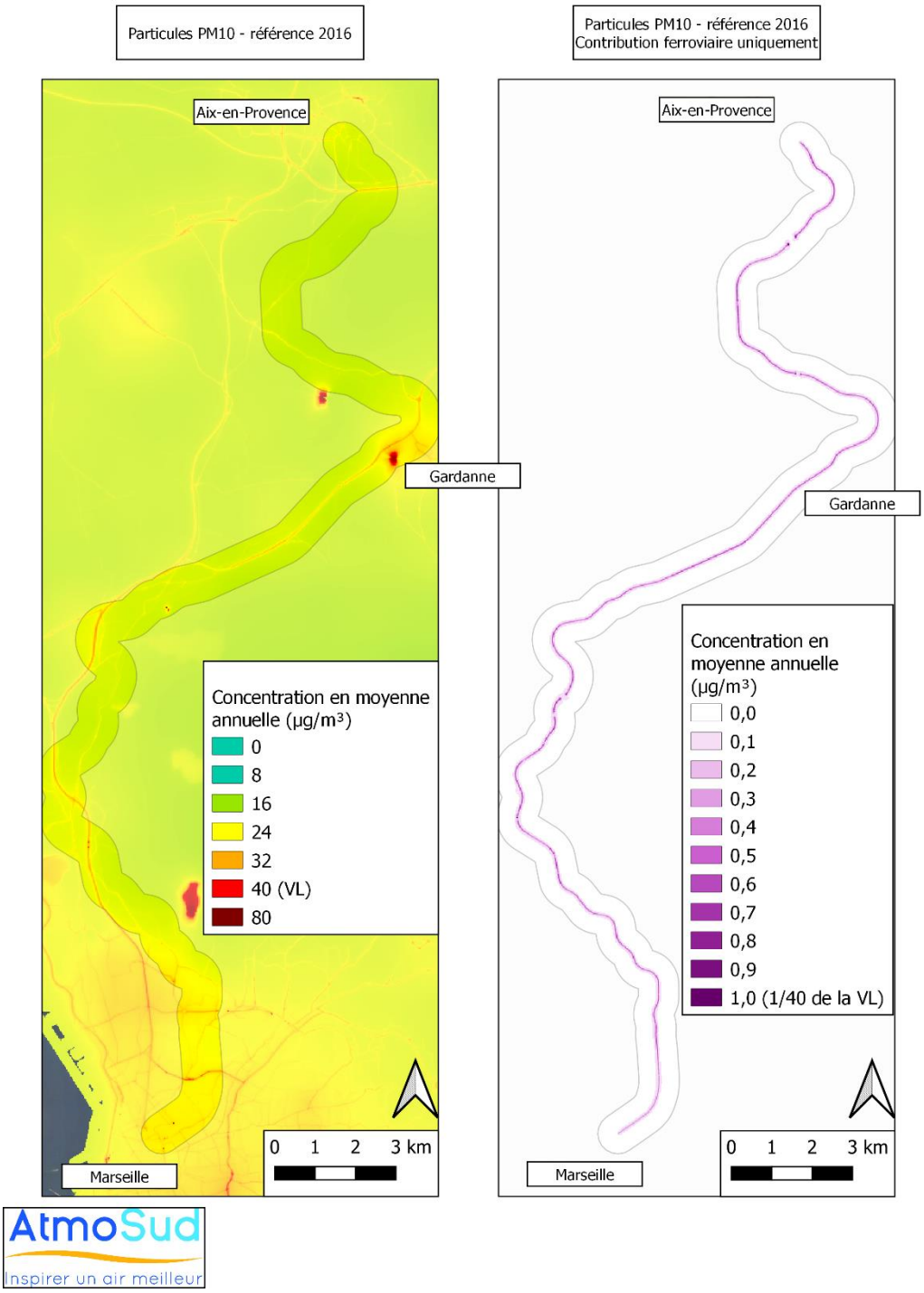


Figure 28 : Cartographies des concentrations en PM10 pour l'année de référence 2016, à gauche toutes sources – à droite contribution du ferroviaire uniquement

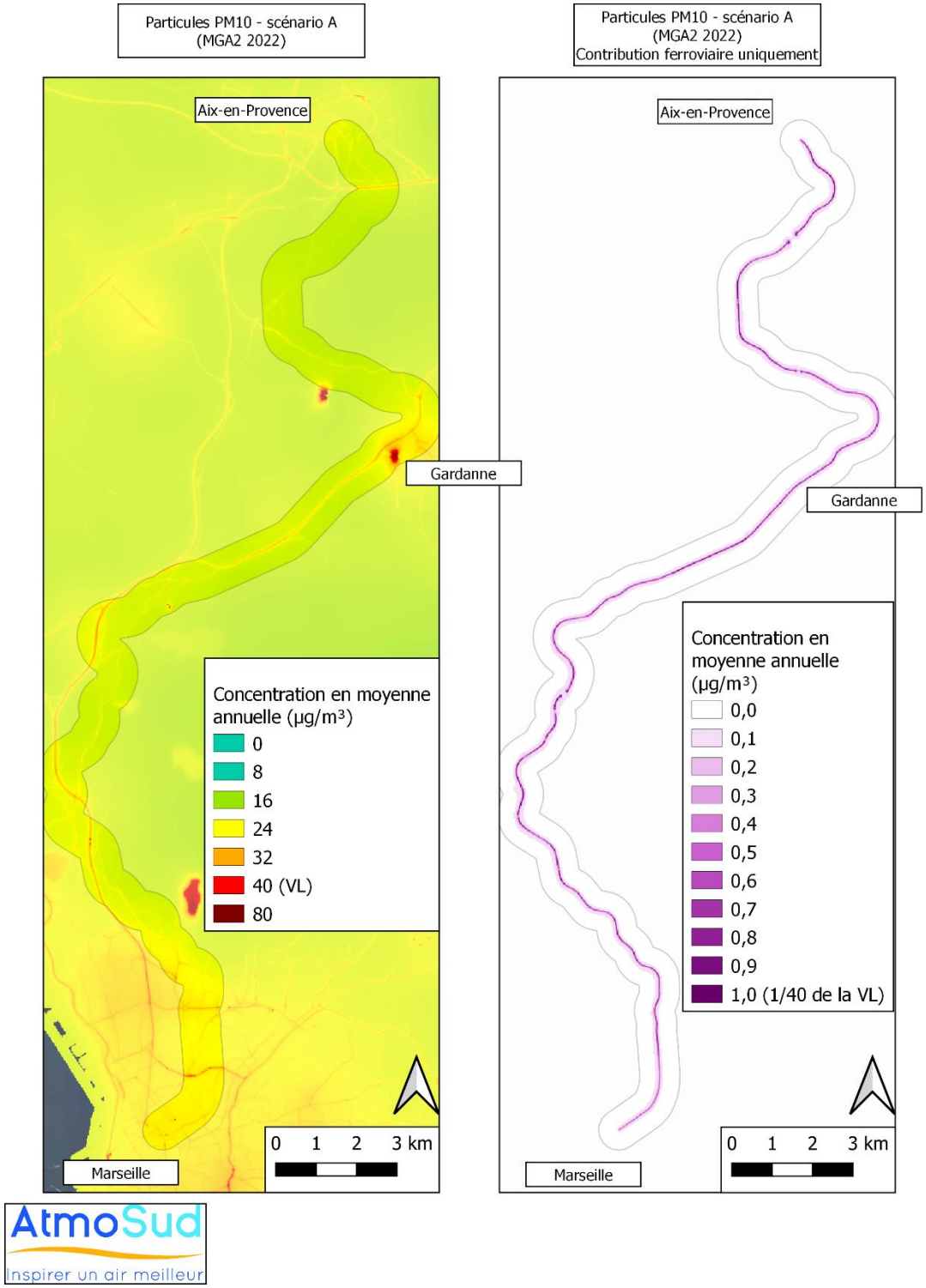


Figure 29 : Cartographies des concentrations en PM10 pour l'année 2022 avec le scénario A (MGA2), à gauche toutes sources – à droite contribution du ferroviaire uniquement

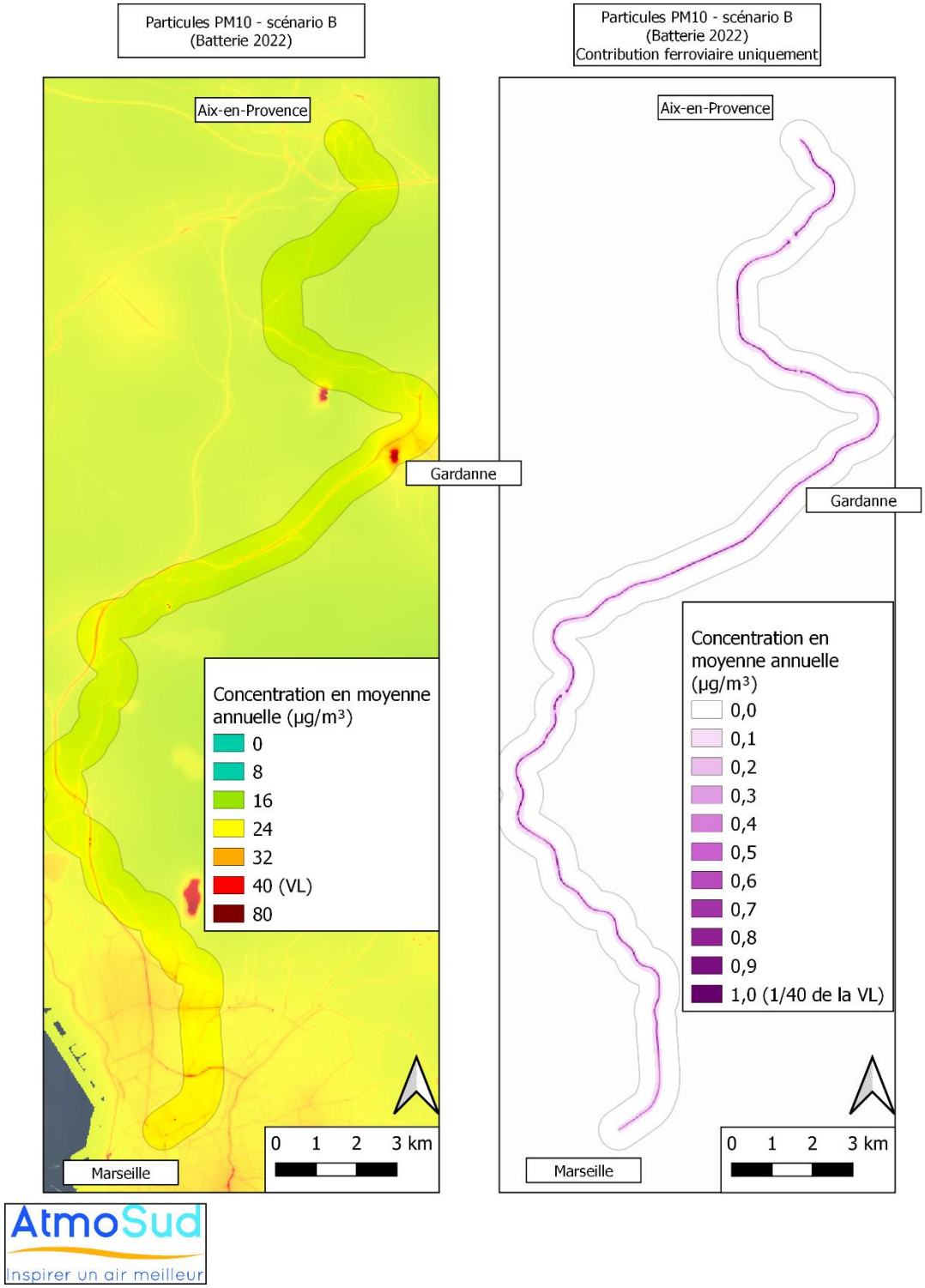


Figure 30 : Cartographies des concentrations en PM10 pour l'année 2022 avec le scénario B (Batterie), à gauche toutes sources – à droite contribution du ferroviaire uniquement

► Cartographies pour les particules PM2.5

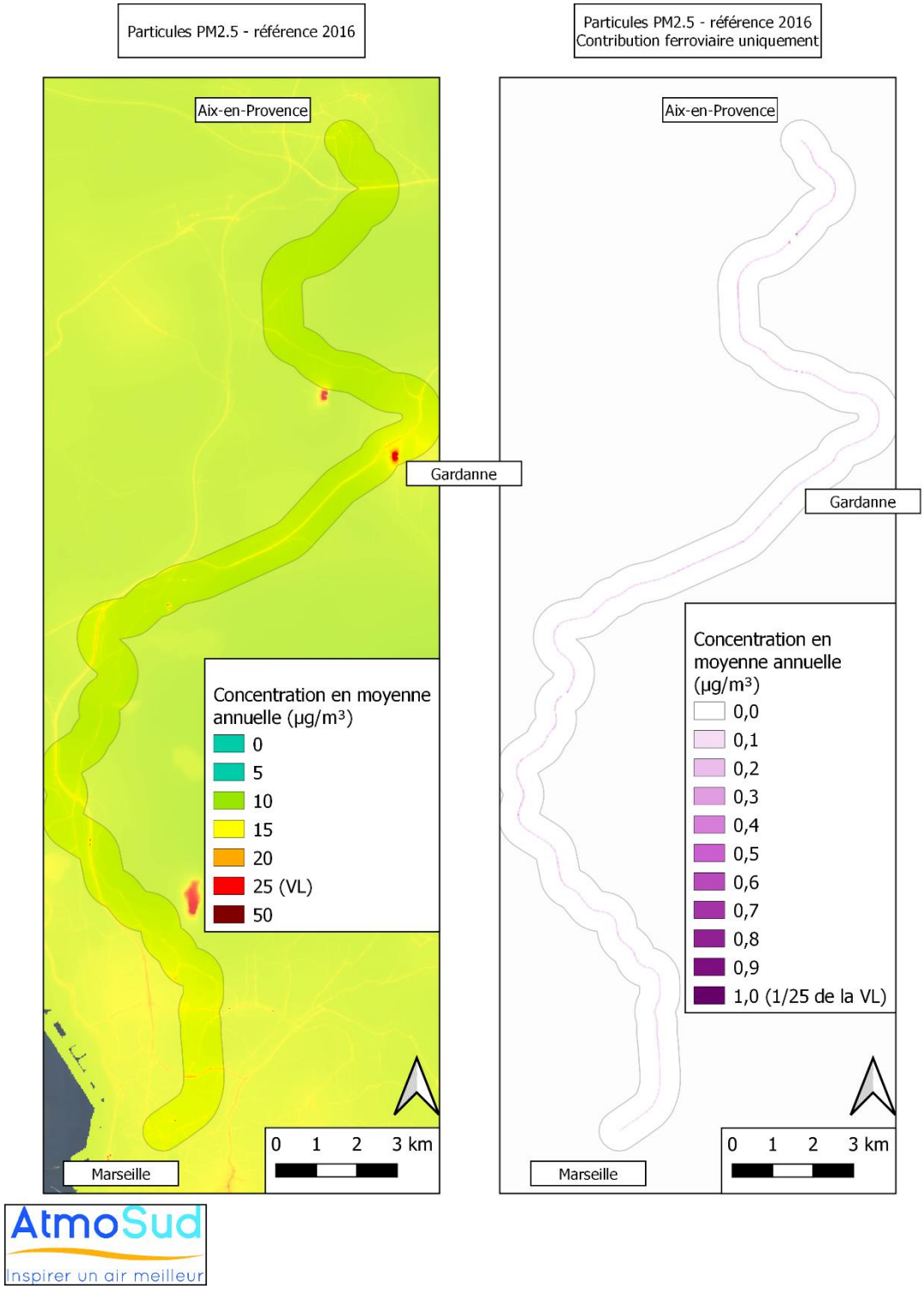


Figure 31 : Cartographies des concentrations en PM2.5 pour l'année de référence 2016, à gauche toutes sources – à droite contribution du ferroviaire uniquement

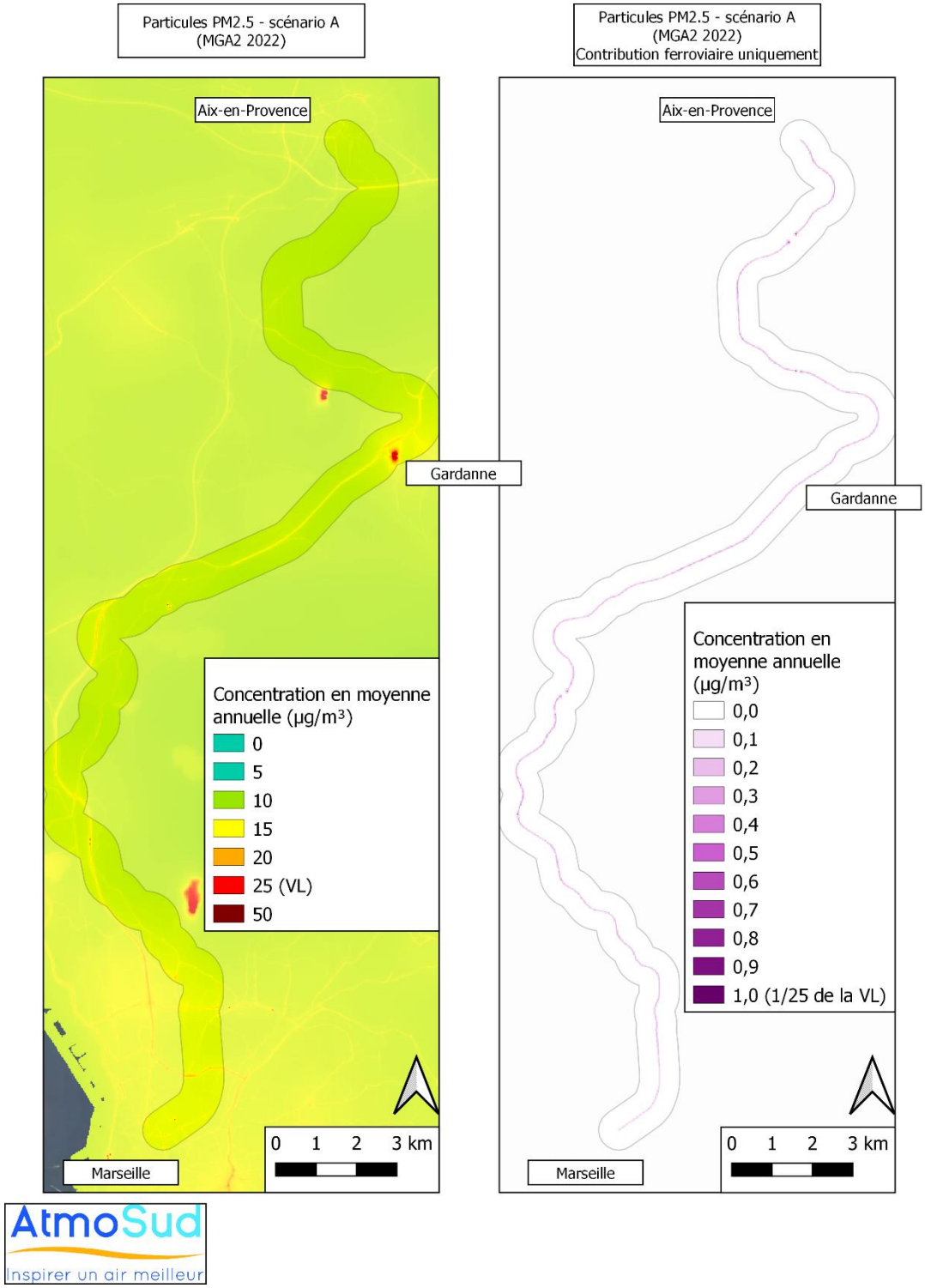


Figure 32 : Cartographies des concentrations en PM2.5 pour l'année 2022 avec le scénario A (MGA2), à gauche toutes sources – à droite contribution du ferroviaire uniquement

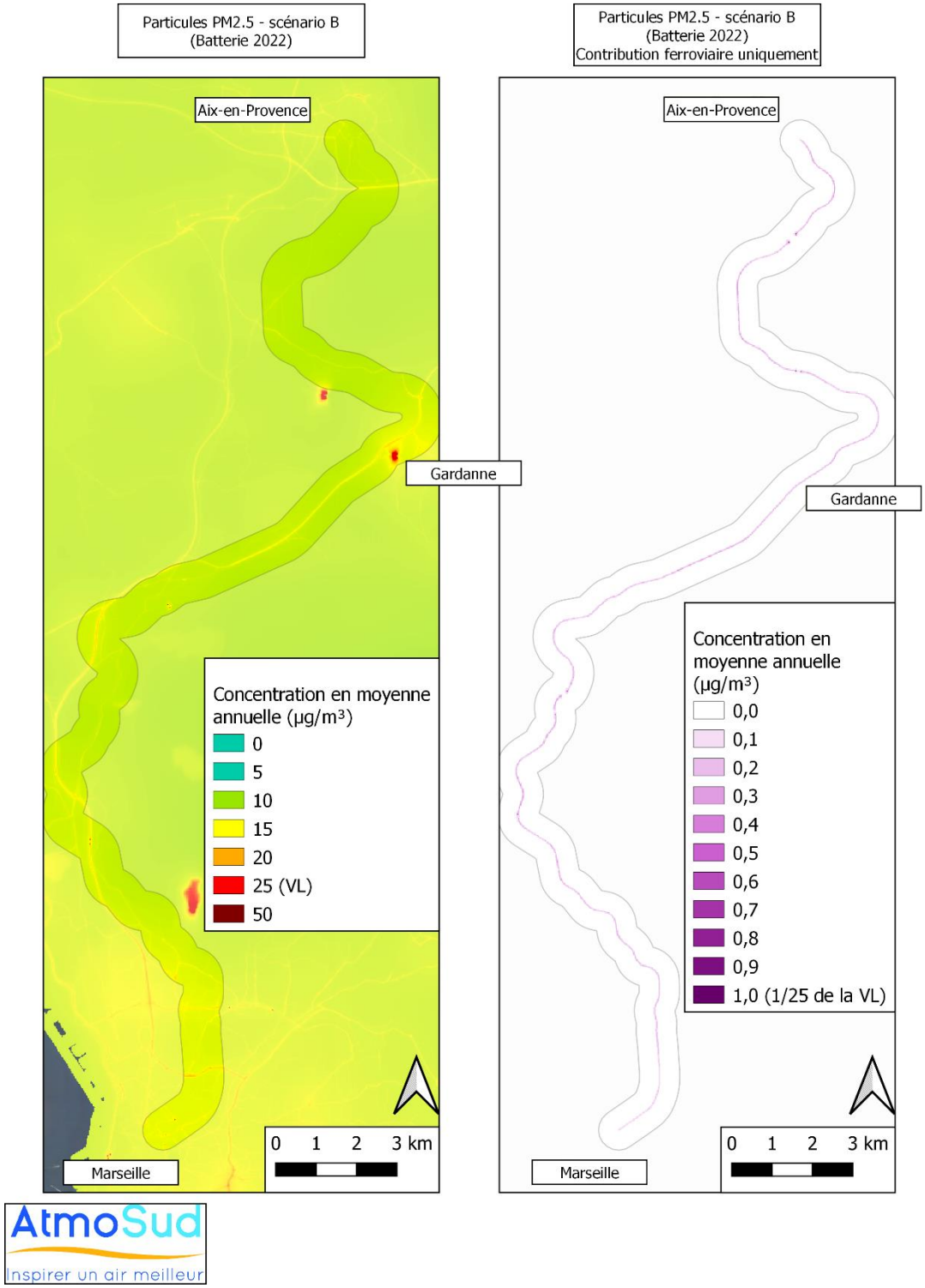


Figure 33 : Cartographies des concentrations en PM2.5 pour l'année 2022 avec le scénario B (Batterie), à gauche toutes sources – à droite contribution du ferroviaire uniquement

AtmoSud, votre expert de l'air en région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur

Un large champ d'intervention : air/climat/énergie/santé

La loi sur l'air reconnaît le droit à chaque citoyen de respirer un air qui ne nuise pas à sa santé. Dans ce cadre, AtmoSud évalue l'exposition des populations à la pollution atmosphérique et identifie les zones où il faut agir. Pour s'adapter aux nouveaux enjeux et à la demande des acteurs, son champ d'intervention s'étend à l'ensemble des thématiques de l'atmosphère : polluants, gaz à effet de serre, nuisances, pesticides, pollens... Par ses moyens techniques et d'expertise, AtmoSud est au service des décideurs et des citoyens.

Des missions d'intérêt général

La loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie du 30/12/1996 confie la surveillance de la qualité de l'air à des associations agréées :

- Connaître l'exposition de la population aux polluants atmosphériques et contribuer aux connaissances sur le changement climatique
- Sensibiliser la population à la qualité de l'air et aux comportements qui permettent de la préserver
- Accompagner les acteurs des territoires pour améliorer la qualité de l'air dans une approche intégrée air/climat/énergie/santé
- Prévoir la qualité de l'air au quotidien et sur le long terme
- Prévenir la population des épisodes de pollution
- Contribuer à l'amélioration des connaissances

Recevez nos bulletins

Abonnez-vous à l'actualité de la qualité de l'air : https://www.atmosud.org/abonnements

Conditions de diffusion

AtmoSud met à disposition les informations issues de ses différentes études et garantit la transparence de l'information sur le résultat de ces travaux. A ce titre, les rapports d'études sont librement accessibles sur notre site Internet.

Les données contenues dans ce document restent la propriété intellectuelle d'AtmoSud. Toute utilisation de données ou de documents (texte, tableau, graphe, carte…) doit obligatoirement faire référence à AtmoSud. Ce dernier n'est en aucun cas responsable des interprétations et publications diverses issues de ces travaux et pour lesquels aucun accord préalable n'aurait été donné.

AtmoSud
Inspirer un air meilleur

Siège social : 146, rue Paradis « Le Noilly Paradis » - 13294 Marseille cedex 06
Établissement de Martigues : route de la Vierge 13500 Martigues
Établissement de Nice : 37 bis, avenue Henri Matisse - 06200 Nice
Tél. 04 91 32 38 00 - Télécopie 04 91 32 38 29 - contact.air@atmosud.org

afaq ISO 9001 Qualité AFNOR CERTIFICATION

Suivez-nous sur