



SEPT.
2020

PRIMEQUAL 2018

PROJET « AIRMES »

AIR : Modélisation des Emissions et Sensibilisation

RAPPORT FINAL



En partenariat avec :



REMERCIEMENTS

Comité de suivi (ordre alphabétique) : Isabelle Coll (Université Paris-Est Créteil), Laurent Gagnepain (ADEME), Marie Pouponneau (ADEME)

Membres du consortium (ordre alphabétique) : Giovanni De Nunzio (IFP Energies nouvelles), Dylan Guttierrez (AtmoSud), Mohamed Laraki (IFP Energies nouvelles), Frédéric Mahé (Aria Technologies), Damien Piga (AtmoSud), Bruno Ribstein (Aria Technologies), Benjamin Rocher (AtmoSud), Laurent Thibault (IFP Energies nouvelles)

Nous remercions les membres du comité de suivi et les membres du consortium pour leurs contributions et leurs remarques constructives pendant toute la durée du projet.

CITATION DE CE RAPPORT

Giovanni De Nunzio, Dylan Guttierrez, Mohamed Laraki, Damien Piga, Bruno Ribstein, Laurent Thibault, 2020. Rapport final du projet AIRMES. 72 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne www.ademe.fr/mediatheque

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 1866C0013

Projet de recherche coordonné par : IFP Énergies nouvelles

Appel à projet de recherche : PRIMEQUAL 2018

Coordination technique - ADEME : GAGNEPAIN Laurent
Direction Villes et Territoires Durables / Service Transports et
Mobilité

TABLE DES MATIERES

Résumé.....	5
1. Contexte du projet.....	6
2. Méthodologie	7
2.1. Caractérisation et modélisation des profils de roulage en usage réel (T1.1).....	8
2.1.1. Apprentissage du modèle de prédiction (phase « offline »).....	8
2.1.2. Utilisation du modèle de prédiction (phase « online »).....	11
2.2. Modélisation microscopique des émissions polluantes à la source (T1.2)	12
2.3. Application des modèles développés au quartier Euromed (T1.3)	15
2.3.1. Méthodologie de calcul de l'inventaire d'émissions.....	16
2.4. Méthodologie de modélisation de la dispersion (T2.1).....	23
2.4.1. Présentation et objectifs	24
2.4.2. Présentation de PMSS	24
2.4.3. Construction de la maquette 3D	25
2.4.3.1. Domaine d'étude et topographie	26
2.4.3.2. Bâtiments.....	26
2.4.3.3. Météorologie et pollution de fond	27
2.4.4. Cartographie de la qualité de l'air.....	27
2.5. Étude de scénarios (T2.2)	29
2.5.1. Présentation et objectifs	29
2.5.2. Construction de la maquette 3D à très haute résolution	30
2.5.3. Cartographie de la qualité de l'air à très haute résolution	30
3. Bilan / Principaux résultats obtenus	31
3.1. Caractérisation et modélisation des profils de roulage en usage réel (T1.1).....	31
3.1.1. Bilan et conclusions	34
3.2. Modélisation microscopique des émissions polluantes à la source et application des modèles développés au quartier Euromed (T1.2, T1.3)	34
3.2.1. Calcul des émissions pour les véhicules particuliers (VP).....	35
3.2.2. Calcul des émissions pour les véhicules utilitaires légers (VUL).....	40
3.2.3. Calcul des émissions pour les poids lourds (PL)	41
3.2.4. Comparaison global entre les approches microscopiques et macroscopiques	44
3.2.5. Format échange sources d'émissions pour modèles de dispersion	44
3.2.6. Bilan et conclusions	45
3.3. Modélisation de la dispersion (T2.1).....	45
3.3.1. Evaluation par comparaison avec les tubes NO ₂	45
3.3.2. Validation par la station urbaine de proximité Euromed	47
3.3.3. Cartographie en NO _x	48
3.3.1.1. 1 ^{er} Zoom: feu de circulation.....	49

3.3.1.2.	2 ^{ème} Zoom : pente positive et forte accélération	51
3.3.1.3.	3 ^{ème} Zoom : petite rue et freinage	52
3.4.	Etude de scénarios (T2.2)	54
3.4.1.	1 ^{er} scénario : parc roulant actuel	54
3.4.2.	2 ^{ème} scénario : influence de la synchronisation des feux	55
3.4.3.	3 ^{ème} scénario : parc roulant essence et Euro6D-TEMP	59
3.4.4.	Bilan et conclusions des taches 2.1 et 2.2	63
3.5.	Sensibilisation des conducteurs sur l'impact de leur comportement sur la qualité de l'air (T3.1)	63
3.6.	Construction d'une base de données d'usage réel de mobilité (T3.2)	65
4.	Conclusions	66
	Références bibliographiques	68
	Index des tableaux et figures	68
	Sigles et acronymes	70

Résumé

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a classé, en 2016, la pollution de l'air comme l'une des causes les plus importantes de décès prématurés. Toutefois, les valeurs limites des concentrations de polluants fixées par la Commission Européenne restent dépassées de manière récurrente sur le territoire européen et en particulier sur le territoire français. Le secteur des transports représente toujours l'une des sources les plus importantes de polluants, malgré les nombreuses mesures mises en place par les pouvoirs publics et les avancements technologiques dans le domaine. Or, les outils actuels de monitoring de la qualité de l'air ne permettent pas d'isoler et estimer avec précision la part d'émissions en usage réel due au transport routier ainsi que leur localisation spatiale. Par conséquent, il s'avère difficile pour les villes de prendre les bonnes décisions en matière d'aménagement de l'infrastructure routière et de législation pour améliorer la qualité de l'air sans avoir à disposition des outils précis d'évaluation et de projection d'impact des mesures envisagées sur les émissions polluantes du transport routier et les concentrations de polluants. L'objectif du projet AIRMES est de construire une méthodologie de descente d'échelle spatiale (typiquement de l'ordre de 10 mètres) et temporelle (typiquement de l'ordre de 5 minutes), par rapport aux outils utilisés en routine aujourd'hui, afin d'avoir une carte de la qualité de l'air plus précise. Cet objectif est atteint grâce aux données de conduite en usage réel acquises à haute fréquence (1 Hz) par le capteur GPS du smartphone et collectées sur le territoire français par les utilisateurs de l'application *Geco air* (développée par IFPEN avec le soutien de l'ADEME). L'expérimentation du projet a été effectuée dans le quartier Euroméditerranée (Euromed) de Marseille.

Abstract

Air pollution is considered today as one of the most important premature death causes (World Health Organization, 2016). Despite the intensified policy efforts, regional demographic trends and urbanization make air pollution in many cities a major public health hazard, affecting an increasing share of urban population. For the locally generated pollution, particulate and NO_x, the transport sector is identified as one of the main causes of this problem.

In real driving conditions, vehicles pollutant emissions depend not only on the propulsion technology, but also and more importantly on the driving style, the road infrastructure (type of intersection, connectivity, etc.), and the traffic regulation measures (signalization, speed limits, etc.).

Therefore, road network and traffic management appear as key levers for the public sector and cities to reduce transport-related pollutant emissions, alongside the overall governmental policies to meet decarbonisation goals. The State-of-the-Art in terms of vehicle emissions estimation is represented by macroscopic models called Emissions Factors, such as COPERT, HBEFA and VERSIT+. Such models are valid either at the scale of a large territory but are not reliable in urban areas at high spatial resolution such as at the scale of a road segment. Indeed they depend only on the average speed and do not take into account the impact of acceleration, road slope and traffic jams, leading to significant errors (2016, O'Driscoll). The project AIRMES aims to design a new methodology to model precisely the air quality at high spatial resolution (typically 10 meters) and high temporal resolution (typically 5 minutes). To assess real-world emissions this methodology will be based on a large database of real trips made by non-professional drivers. This database is the result of a crowdsensing campaign using the *Geco air* smartphone application (developed by IFPEN with the support of ADEME). The AIRMES methodology was tested in Marseilles, France, in the Euromed neighbourhood.

1. Contexte du projet

Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), environ 18 000 décès par jour sont attribuables à une mauvaise qualité de l'air, ce qui fait monter l'estimation à environ 6,5 millions de décès par an [1]. La pollution atmosphérique représente également un fort enjeu financier : une commission d'enquête sénatoriale estime que le coût total de la pollution de l'air s'établit entre 68 et 97 milliards d'euros par an pour la France, dans une évaluation, rendue en juillet 2015, intégrant à la fois les dommages sanitaires de la pollution mais également ses conséquences sur les bâtiments, les écosystèmes et l'agriculture [2]. Le secteur des transports représente toujours l'une des sources les plus importantes de polluants, malgré les nombreuses mesures mises en place par les pouvoirs publics et les avancements technologiques dans le domaine. Les transports, tout mode confondu, sont responsables d'environ 50 % des émissions globales d'oxydes d'azote (NO_x) et environ 10 % des émissions de particules PM_{2,5}. Le transport routier seul représente une part considérable de cet apport dû aux transports, avec le 58 % des NO_x et le 73 % des PM_{2,5}. Ces émissions sont dues principalement à trois facteurs : les émissions à l'échappement, les émissions d'abrasion, les émissions d'évaporation. Si les poids lourds sont les principaux émetteurs de polluants, ce sont les véhicules particuliers, plus représentés dans les zones urbaines fortement peuplées, qui ont l'impact le plus élevé sur l'exposition des citoyens à une mauvaise qualité de l'air.

Les mesures mises en place au niveau local pour gérer l'utilisation des transports (comme une meilleure planification des transports et les mesures pour inciter le transfert modal), ainsi que le progressif renouvellement du parc automobile, ont contribué à limiter les émissions de gaz à l'échappement du transport routier dans les villes et les agglomérations urbaines. En effet, dans le monde, l'activité liée au transport routier a augmenté d'un quart au cours de la dernière décennie, mais NO_x et les émissions de particules ont augmenté de 5 % et diminué de 6 %, respectivement. Malgré ces améliorations, les niveaux de pollution dépassent encore les seuils fixés par l'OMS dans de nombreuses villes.

De même, les outils actuels de monitoring de la qualité de l'air ne permettent pas d'isoler et estimer avec précision la part d'émissions en usage réel due au transport routier ainsi que leur localisation spatiale. En effet, l'estimation d'émissions de polluants est basée sur l'utilisation d'une méthode moyenne adaptée à de larges échelles, typiquement segments de route de plusieurs kilomètres pour que le trajet puisse être considéré comme représentatif de l'ensemble des conditions de circulation, comme dans la méthodologie COPERT [3].

Par conséquent, il s'avère difficile pour les villes de prendre les bonnes décisions en matière d'aménagement de l'infrastructure routière et de législation sans avoir à disposition des outils précis d'évaluation et de projection d'impact des mesures envisagées sur les émissions polluantes du transport routier et la qualité de l'air.

Le projet AIRMES fait suite au projet *Geco air* qui a été mené par IFPEN avec le soutien de l'ADEME dans le cadre d'une convention bilatérale de partenariat. Ce projet a permis de développer une application smartphone, gratuite, destinée au grand public et permettant de connaître les émissions de polluants de sa mobilité. Cette estimation des émissions de polluant est possible grâce à l'acquisition du signal GNSS (*Global Navigation Satellite System*) à 1 Hz (vitesse, accélération et altitude) couplée à une modélisation fine du véhicule, du moteur et du système de post-traitement. Les spécificités techniques des véhicules sont connues à partir de la plaque d'immatriculation (pour plus de détail sur l'approche suivie, voir [4]).

À l'issue du projet *Geco air*, l'application éponyme a été téléchargeable gratuitement (<http://www.gecoair.fr/home/>) depuis le premier trimestre 2017 (environ 22000 téléchargements en juin 2019 - hors Chine -). Cela a permis de collecter des données d'usage réel sur le territoire français. L'ensemble de la base de données a atteint les 44 millions de kilomètres parcourus en juin 2019, qui viennent compléter les 15 millions de kilomètres déjà collectés grâce à l'application *Geco*¹. Cette base de données regroupe déjà de nombreux trajets dans le quartier d'Euromed (33 700 km au 16 juin 2019 dans la zone de référence utilisée dans le projet).

L'objectif du projet AIRMES est de concevoir et développer de nouvelles méthodologies pour la modélisation de la qualité de l'air en se basant sur les données d'usage réel des véhicules collectées grâce à l'application *Geco air*. La finalité de ces nouveaux outils est d'être capable de modéliser les émissions puis les concentrations de polluants avec une résolution spatiale (10 mètres) et temporelle

¹ Application conçue par IFPEN, antérieure à *Geco air*, centrée sur l'aide à la conduite et la réduction de la consommation de carburant

(5 minutes) fines, afin de permettre aux villes de comprendre et d'identifier les zones critiques en matière de polluants ainsi que l'impact de la réglementation et de l'infrastructure.

2. Méthodologie

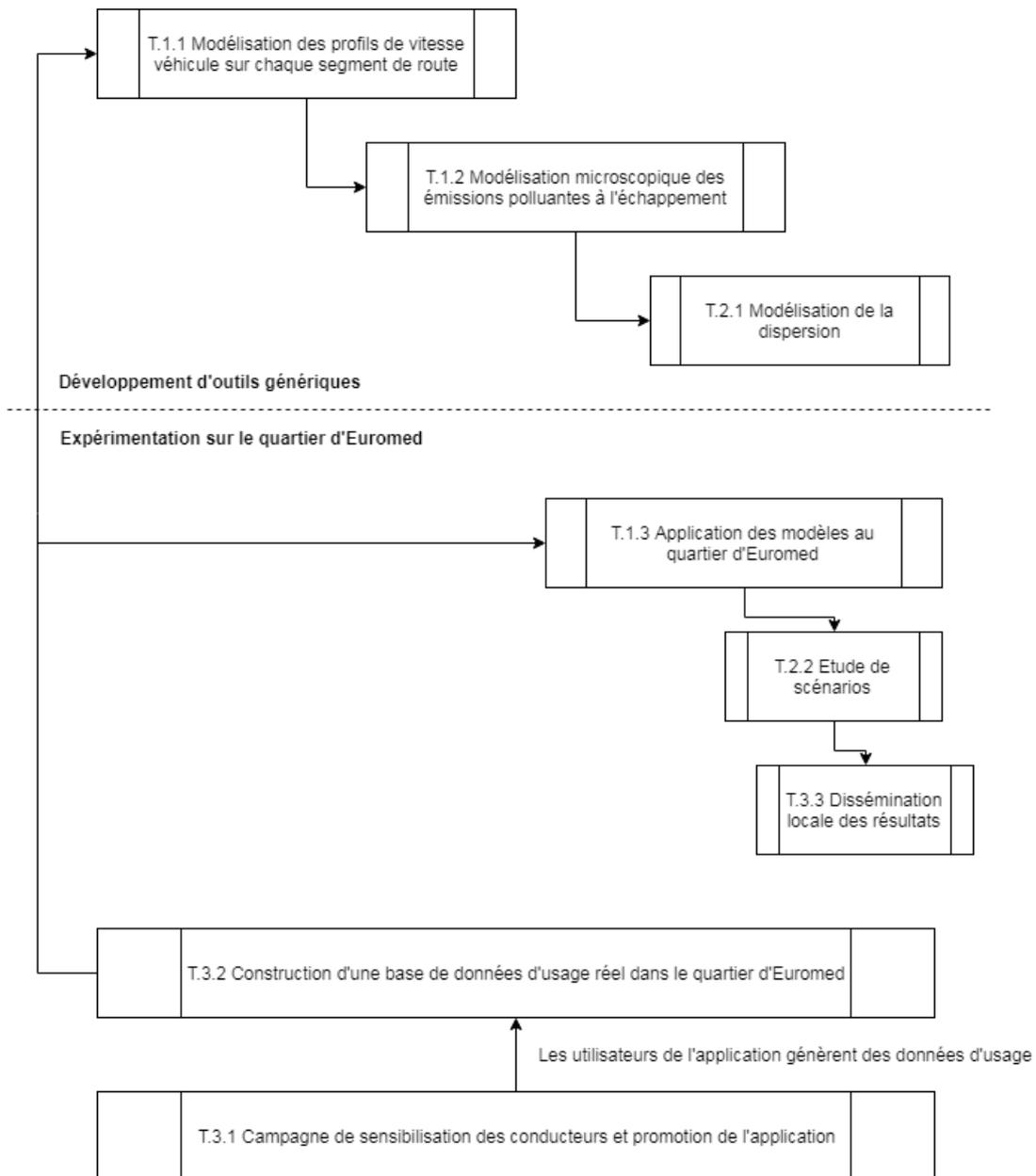


Figure 1 Structure du projet

Le projet est structuré en 4 tâches principales et 8 sous-tâches (Figure 1) :

- Tâche 1 : Modélisation des émissions des véhicules à l'échelle microscopique,
- Tâche 2 : Modélisation de la dispersion dans le quartier d'Euromed (Marseille),
- Tâche 3 : Expérimentation pilote dans la quartier d'Euromed (Marseille),
- Tâche 4 : Coordination.

Par la suite, ce rapport détaillera la méthodologie adoptée pour la réalisation des tâches du projet.

2.1. Caractérisation et modélisation des profils de roulage en usage réel (T1.1)

En conduite réelle dans un environnement urbain, les accélérations sont plus fortes et plus fréquentes que dans les conditions d'homologation des véhicules. En usage réel, les conditions de trafic, le style de conduite et la signalisation routière, ont un impact d'ordre un sur les accélérations des véhicules et donc sur leurs émissions. L'objectif de cette tâche est de modéliser les profils de vitesse des véhicules en usage réel sur chaque brin de route en exploitant les mesures GNSS des smartphones en usage réel. Les profils de vitesse et d'accélération ainsi reconstruits permettront d'alimenter des modèles de polluants à l'échelle microscopique et de tenir compte de l'impact des phases d'accélération, ainsi que des conditions de circulation.

Toutefois, malgré la taille conséquente de la base de données *Geco air* et le nombre croissant de données d'usage dans le quartier d'Euromed (grâce aux activités de promotion de la tâche 3), les données de conduite mesurées par le capteur GPS des smartphones ne recouvrent pas la totalité du réseau routier. Par ailleurs, un objectif important du projet AIRMES est de fournir des outils facilement utilisables pour permettre de reproduire leur déploiement sur de nouveaux territoires. Dans ce contexte, un travail important a été mené pour proposer une approche indépendante de l'application *Geco air*. Cela implique de ne pas avoir besoin de collecter de nouvelles données pour procéder à l'analyse des émissions. Il est donc nécessaire de prédire des profils de vitesse réalistes à partir d'informations macroscopiques du brin routier considéré (vitesse moyenne, pente, signalisation, trafic, feux tricolores, etc.), et cela même en absence de mesures GNSS.

En effet, les données GPS type FCD (« floating car data ») qui contiennent les informations de vitesse, position et altitude peuvent être couplées/corrélées aux données macroscopiques fournies par un SIG contenant les caractéristiques topologiques et les conditions de trafic d'un réseau routier, afin d'entraîner un modèle d'apprentissage et de prédiction de profils de vitesse.

Dans la phase initiale d'apprentissage de la méthode, appelée « offline », après une première phase de découpage du réseau routier en segments élémentaires, selon le référentiel SIG considéré, les données FCD instantanées (dynamiques et collectées à 1 Hz) sont découpées et assignées au segment routier sur lequel elles ont été enregistrées. Cela permettra de corréliser les caractéristiques de topologie et/ou de trafic (ex. segment avec un feu en aval et avec des conditions de trafic fluide) avec les comportements de conduite enregistrés en usage réel. Dans la phase d'utilisation du modèle de prédiction de la vitesse, dite « online », il est suffisant de fournir en entrée du modèle les données SIG relatives aux caractéristiques topologiques et conditions de trafic d'un segment routier, localisé même en dehors de la zone d'apprentissage, pour prédire le(s) profil(s) de vitesse typique(s) sur ce segment.

L'approche choisie consiste donc à exploiter la base de données *Geco air* pour améliorer les connaissances et développer de nouveaux outils permettant d'estimer les émissions en usage réel, sans toutefois nécessiter de collecter des données sur le territoire ciblé.

2.1.1. Apprentissage du modèle de prédiction (phase « offline »)

Le modèle de prédiction de la vitesse est composé de 5 étapes principales. La base de données *Geco air* est utilisée pour l'apprentissage du modèle. Une corrélation entre les données FCD enregistrées sur les différents segments d'un réseau routier et les caractéristiques SIG de ces segments est établie. La méthodologie utilisée dans cette étape est illustrée en Figure 2.

A. Road network segmentation

La décomposition d'un réseau routier selon les descripteurs d'un SIG (Here Maps, Google Maps, OpenStreetMap, etc.) est utilisée. Un segment de route (ou « link ») est défini comme une liaison élémentaire entre deux nœuds du réseau sur laquelle il n'y a pas de variation d'attributs liés aux caractéristiques du segment (longueur du segment une fois défini, nombre de voies, signalisation, limites de vitesse, etc.). Les attributs qui peuvent varier à l'intérieur d'un segment sont la courbure, la pente, les conditions de trafic. Tous ces attributs sont fournis par les SIG sur chaque segment du réseau.

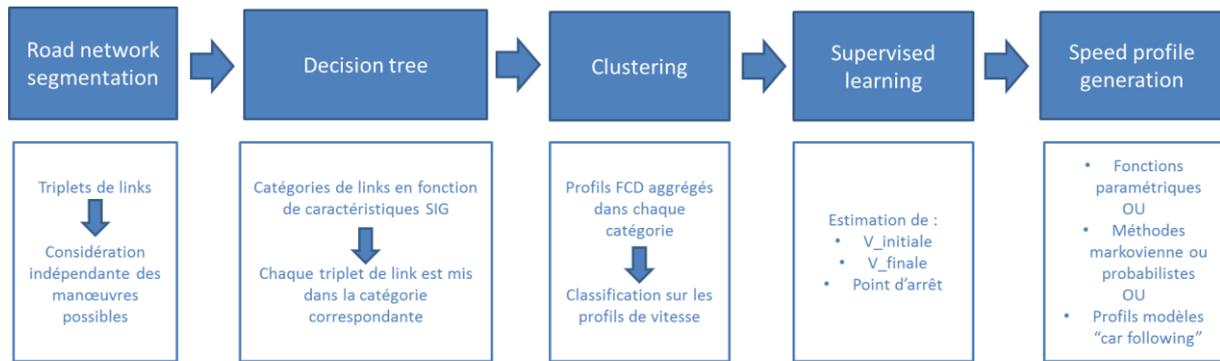


Figure 2 Schéma de la phase d'apprentissage et génération/prédiction de profil de la partie « offline » de la méthode

Il est évident que sur un même segment de route, les profils de vitesse enregistrés peuvent être très différents et présenter une dispersion (statistique) très élevée en fonction du style de conduite, de l'état de la signalisation, des manœuvres et des origines/destinations de chaque conducteur. Afin de limiter cette dispersion dans une phase préliminaire de traitement et organisation des données, des triplets de links (provenance -> link considéré -> destination) sont utilisés comme unité géographique élémentaire sur laquelle seront agrégées les données FCD. Par conséquent, uniquement les données FCD sur un link qui proviennent du même link précédent et qui vont dans le même link suivant vont être agrégées sur le triplet considéré.

Grâce à cette décomposition, des caractéristiques macroscopiques additionnelles pour chaque triplet de links peuvent être obtenues : angle de manœuvre, différence de classe d'importance (ou classe fonctionnelle) entre les links du triplet, nombre de triplets ayant le même link central (nombre de connexions).

B. Decision tree

Dans la deuxième étape de la méthode, l'objectif est de définir des catégories de profils de vitesse. Une approche possible consisterait à combiner des caractéristiques (ou descripteurs) microscopiques (propres aux profils FCD) et macroscopiques (propres aux segments, comme la présence d'un feu de circulation) pour ensuite définir les catégories au moyen de méthodes de clustering. Le problème avec ce type d'approches est l'incapacité d'associer un triplet de links à une catégorie en utilisant uniquement ses caractéristiques macroscopiques (car le clustering utilise un mix de caractéristiques micro/macro). Cela serait également réducteur pour une prédiction d'un profil de vitesse sur un segment routier en dehors de la zone d'apprentissage et sur lequel les données FCD sont indisponibles (pas de descripteurs microscopiques).

Donc, un arbre de décision utilisant uniquement des descripteurs macroscopiques a été mis en place afin de séparer les triplets de links en fonction de leurs caractéristiques. Il est important de souligner que deux triplets de links ayant le même link central pourraient se retrouver dans des catégories différentes. Les descripteurs macroscopiques utilisés pour la définition de l'arbre de décision sont des attributs de l'infrastructure routière (présence de la signalisation, type de signalisation, niveau de congestion, etc.). Si l'on considérait toutes les combinaisons possibles de ces descripteurs macroscopiques, on obtiendrait un nombre très élevé de catégories et, par conséquent, un nombre très réduit de triplets associés à chaque catégorie. Pour cette raison, l'arbre de décision a été défini en utilisant un ensemble réduit de combinaisons de descripteurs macroscopiques afin d'en limiter la complexité et d'en accroître la représentativité des cas de vie réels (voir Figure 3). Par exemple, l'expérience suggère qu'en cas de forte congestion la vitesse est très faible et ni la signalisation ni la courbure de la route n'ont un impact significatif sur le profil de vitesse ; donc l'arbre de décision n'ajoute pas davantage de catégories dans cette zone-là.

En conclusion de cette étape, chaque triplet de links du réseau routier d'apprentissage est assigné à une catégorie de l'arbre de décision (catégorie = feuille de l'arbre) selon les descripteurs macroscopiques du triplet.

C. Clustering

Chacune des catégories définies dans l'étape précédente présente encore une très forte dispersion sur les profils de vitesse FCD enregistrés sur les triplets à cause de la variabilité induite par des phénomènes aléatoires (style de conduite, alternance vert/rouge des feux, etc.). Une méthode de clustering est donc utilisée avec des descripteurs microscopiques pour séparer les profils de vitesse appartenant à une même catégorie.

Les descripteurs microscopiques sont choisis pour chaque catégorie de façon indépendante afin de correctement capter la différence entre les profils typique de la catégorie considérée.

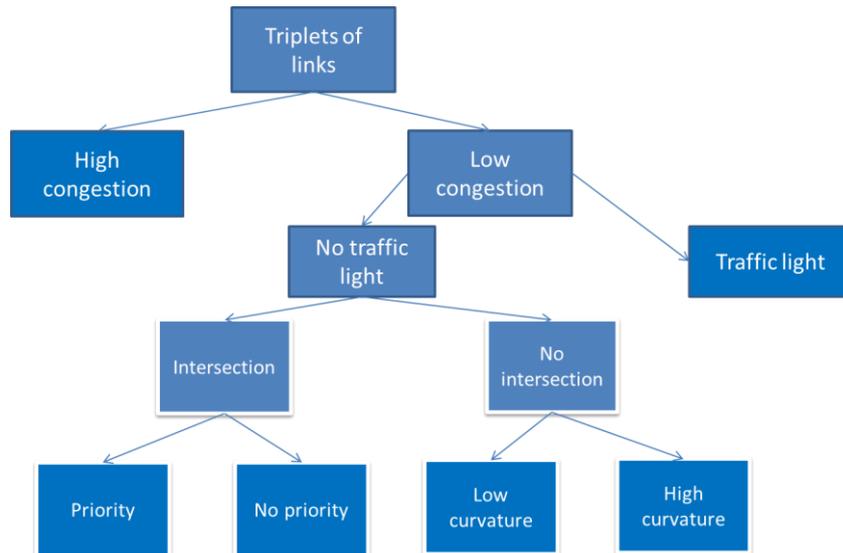


Figure 3 Structure de l'arbre de décision

A ce stade, selon la répartition des profils FCD dans les différents clusters, il est possible d'estimer une proportion de données entre clusters et associer cela à une probabilité qu'un profil de vitesse d'un cluster se vérifie (ex. 40 % de probabilité de s'arrêter à un feu rouge).

D. Supervised learning

Chacune des classes obtenues avec l'étape de clustering a son propre profil de vitesse représentatif. Afin de correctement estimer et reconstruire ce profil de vitesse typique, il est nécessaire d'en estimer certains paramètres qui seront utilisés pour calibrer la fonction mathématique décrivant l'évolution du profil de vitesse sur le brin considéré. L'apprentissage de ces paramètres est fait de façon supervisée (grâce aux données FCD enregistrées) afin de les corrélérer directement à des descripteurs macroscopiques. L'outil d'apprentissage supervisé utilisé est un réseau de neurones.

E. Speed profile generation

Deux méthodes ont été exploitées pour la construction des profils de vitesse à partir des paramètres estimés dans l'étape précédente :

- Méthode déterministe : cette méthode consiste à utiliser des fonctions polynomiales. Ces fonction ont été inspirées de l'observation des profils réels FCD de chaque cluster. Il s'agit essentiellement de profils reconstruits avec des fonctions linéaires ou paraboliques.
- Méthode stochastique : cette méthode se base sur l'utilisation de densités de probabilité (DSP) pour la construction du profil de vitesse. L'idée est d'estimer récursivement l'accélération au pas suivant à partir de certaines variables calculées au pas précédent selon l'équation :

$$a_{k+1} \sim P(a_{k+1} | a_k, v_k, \delta_k, p_k)$$

L'ensemble de ces variables sont définis dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1 Liste des variables utilisées dans les DSP

Variable	Description
a_k	Accélération au pas k
v_k	Vitesse au pas k
δ_k	Différence entre la vitesse au pas k et la vitesse à la fin du brin
p_k	Position relative normalisée, au pas k entre $[0,1]$, où 1 représente la fin du brin

Chaque variable est mise à jour au pas k , l'accélération est ensuite calculée au pas suivant $k + 1$ selon la DSP et cette procédure est répétée jusqu'à la fin du segment routier. Ces densités de probabilité sont construites pour chaque classe en exploitant 2millions de profils de vitesse Geco-air sur Paris et Lyon.

Les paramètres identifiés dans l'étape précédente sont « tirés » de façon aléatoire selon leur distribution gaussienne afin de générer plusieurs profils représentatifs. Ces profils générés respectent évidemment les contraintes de longueur et vitesse max/min du link considéré pour lequel la prédiction est faite.

La cohérence physique des profils reconstruits est toujours vérifiée en tenant compte des accélérations et décélérations maximales réalisables par les différents types de véhicules considérés (voitures particulières, véhicules utilitaires légers, poids-lourds).

Pour résumer, le Tableau 2 montre les descripteurs macroscopiques provenant des SIG qui ont été utilisés dans l'apprentissage du modèle, ceux qui n'ont pas encore été pris en compte, et ceux qui ne peuvent pas être pris en compte sans avoir aussi à disposition des mesures GNSS.

Tableau 2 Résumé des entrées du modèle et extensions éventuelles

Descripteurs macroscopiques en entrée du modèle	Descripteurs macroscopiques éventuellement utilisables	Descripteurs macroscopiques qui ont besoin aussi de données GNSS
<ul style="list-style-type: none"> • Pente • Courbure • Panneaux de signalisation (Stop, Priorité, etc.) • Feux tricolores • Ronds-points • Vitesse moyenne du trafic • Intersections et priorités • Nombre de voies 	<ul style="list-style-type: none"> • Ralentisseurs • Passages piéton • Arrêts de bus • Sites temporaires de travaux 	<ul style="list-style-type: none"> • Parkings en double-file fréquents

2.1.2. Utilisation du modèle de prédiction (phase « online »)

En ce qui concerne la partie dite « online » de la méthode, la prédiction du profil de vitesse est effectuée sur un segment routier en dehors de la zone d'apprentissage et sur lequel les données FCD ne sont pas forcément disponibles. Pour ce faire, les étapes à suivre sont décrites comme suit :

1. Choix du segment sur lequel on veut prédire les profils de vitesse et sélection de l'ensemble des triplets de segments (ou manœuvres) ayant le segment considéré comme élément central.
2. Calcul de la catégorie correspondante à chaque triplet à l'aide de la méthodologie décrite dans l'étape B de la méthode « offline ».
3. Pour chaque cluster de chaque catégorie considérée, les réseaux de neurones sont utilisés pour estimer les paramètres des profils de vitesse, comme décrit dans l'étape D de la méthode « offline ».
4. Avec les paramètres estimés, des profils de vitesse sont reconstruits en considérant, outre que le type de véhicule, toutes les manœuvres et les classes (cluster) possibles selon une probabilité. Afin d'augmenter la représentativité statistique des profils reconstruits, un nombre arbitraire et élevé de profils peut être généré.

2.2. Modélisation microscopique des émissions polluantes à la source (T1.2)

L'estimation des émissions polluantes est réalisée au moyen d'algorithmes basés sur des modèles physiques de la dynamique du véhicule, de la formation des polluants et de leur post-traitement. Ces modèles prennent notamment en compte le type de motorisation (Essence/Diesel), le système d'injection (Directe/Indirecte), le type de post-traitement (Catalyseur, SCR, NOxTrap) et le niveau de norme euro du moteur. Les algorithmes utilisés sont capables de réaliser une estimation uniquement à partir de la vitesse véhicule et de la pente, les autres signaux étant reconstruits à partir de modèles.

Le modèle véhicule prend en compte la dynamique du véhicule et peut faire intervenir notamment les moyens de transmission, les dimensions des roues, et la masse du véhicule. Pour construire ce modèle, on peut appliquer le principe fondamental de la dynamique au véhicule selon son axe longitudinal. Le modèle de transmission estime le rapport de réduction entre le régime de rotation du moteur thermique et la vitesse du véhicule.

Il est paramétré en fonction des caractéristiques générales du véhicule, du moteur et de la boîte de vitesse : masse du véhicule, puissance maximale et régime de puissance maximale du moteur, vitesse maximale, type de transmission et nombre de rapport, etc. Il permet, à chaque instant, de convertir l'information de vitesse et l'estimation de puissance requise à la roue en estimation de régime et de couple du moteur thermique. Le modèle moteur thermique permet d'estimer les grandeurs physiques sur le point de fonctionnement courant.

Il est paramétré en fonction des caractéristiques générales du véhicule et du moteur : cylindrée, type de carburant, couple et puissance maximale, suralimentation, consommation normée du véhicule, etc. Il permet, à partir de l'information de régime et de couple du moteur, d'estimer les débits et températures des fluides (carburants, gaz admission, gaz échappement, et recirculation des gaz brûlés). Enfin, le modèle de post-traitement estime l'efficacité de conversion du système de dépollution sur chaque polluant.

Il comprend des sous-modèles pour chaque technologie de dépollution (TWC, GPF en essence, DOC, DPF, LNT, SCR en diesel) qui sont associés en fonction de l'architecture du système de dépollution du véhicule. Ils sont paramétrés en fonction des caractéristiques générales du véhicule : niveau de norme, cylindrée, etc.

Le modèle permet d'estimer les émissions de polluants en sortie post-traitement à partir des estimations de température, débit, et émissions polluantes en sortie moteur.

Le modèle microscopique d'émissions a été validé sur un grand nombre de véhicules par comparaison avec des données expérimentales ayant été acquises soit au banc à rouleau soit en roulage sur route ou piste au moyen d'un procédé de type PEMS, comme illustré sur le Tableau 3 ci-dessous :

Tableau 3 Résumé des essais pour la validation du modèle microscopique d'émissions

Fuel Type	AFT device	Emission standard	Engine test bed	Roller Test Bed	PEMS	SEMS	Total
Gasoline	TWC	€ 3	1	-	-	-	1
		€ 4	2	-	-	-	2
		€ 5	7	9	1	1	18
		€6b	2	1	30	4	37
		€6c	1	-	14	-	15
		€6dt	-	-	30	-	30
	TWC +	€ 3	-	-	-	-	0

	GPF	€ 4	-	-	-	-	0	
		€ 5	-	-	-	-	0	
		€6b	-	-	7	-	7	
		€6c	-	-	-	-	0	
		€6dt	-	-	22	-	22	
Diesel	DOC + DPF	€ 3	3	-	-	-	3	
		€ 4	2	-	-	-	2	
		€ 5	8	3	6	2	19	
		€6b	-	1	3	-	4	
		€6c	-	-	-	-	0	
		€6dt	-	-	2	-	2	
	DOC + DPF + SCR	€ 3	-	-	-	-	0	
		€ 4	-	-	-	-	0	
		€ 5	-	-	-	-	0	
		€6b	3	-	3	-	6	
		€6c	1	-	3	-	4	
		€6dt	-	-	46	1	47	
	NSC + DPF	€ 3	-	-	-	-	0	
		€ 4	-	-	-	-	0	
		€ 5	-	-	-	-	0	
		€6b	-	1	31	2	34	
		€6c	-	-	12	-	12	
		€6dt	-	-	-	-	0	
	Total			27	15	210	10	265

La précision des modèles dépend fortement des conditions de conduites et du véhicule considéré et il est délicat de donner un chiffre global. Toutefois, les modèles microscopiques permettent une amélioration significative par rapport à l'état de l'art (EF : Facteurs d'Emissions) en prenant en compte l'impact des accélérations et de la pente, comme illustré ci-dessous :

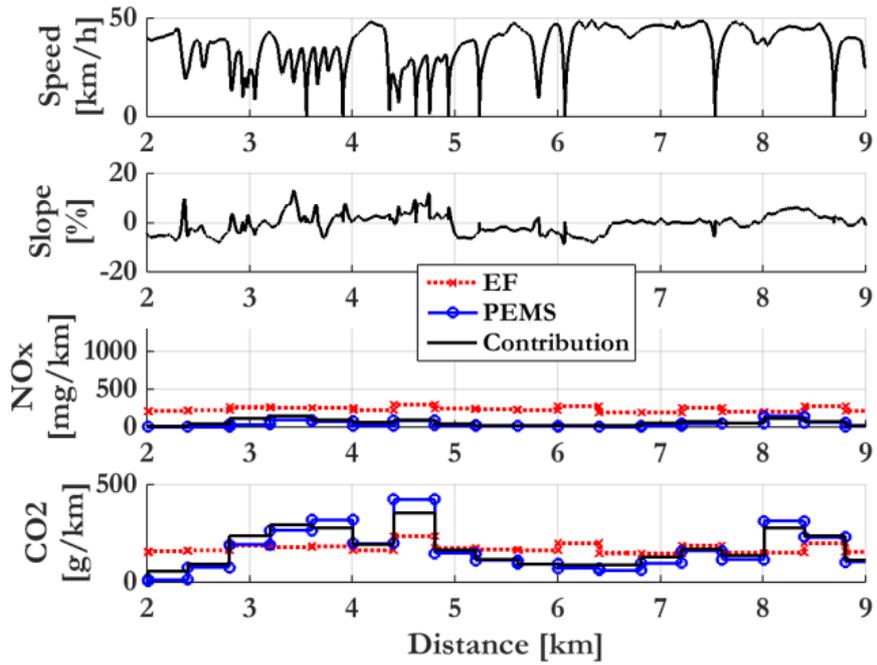


Figure 4 Essais de validation du modèle microscopique et comparaison avec la référence PEMS et les facteurs d'émissions (cas urbain)

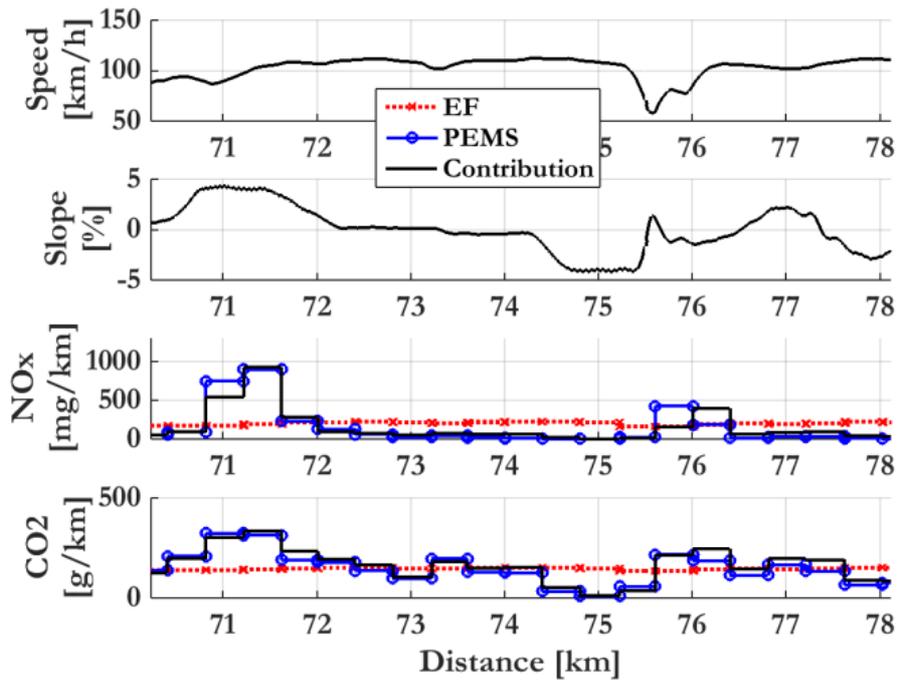


Figure 5 Essais de validation du modèle microscopique et comparaison avec la référence PEMS et les facteurs d'émissions (cas autoroutier)

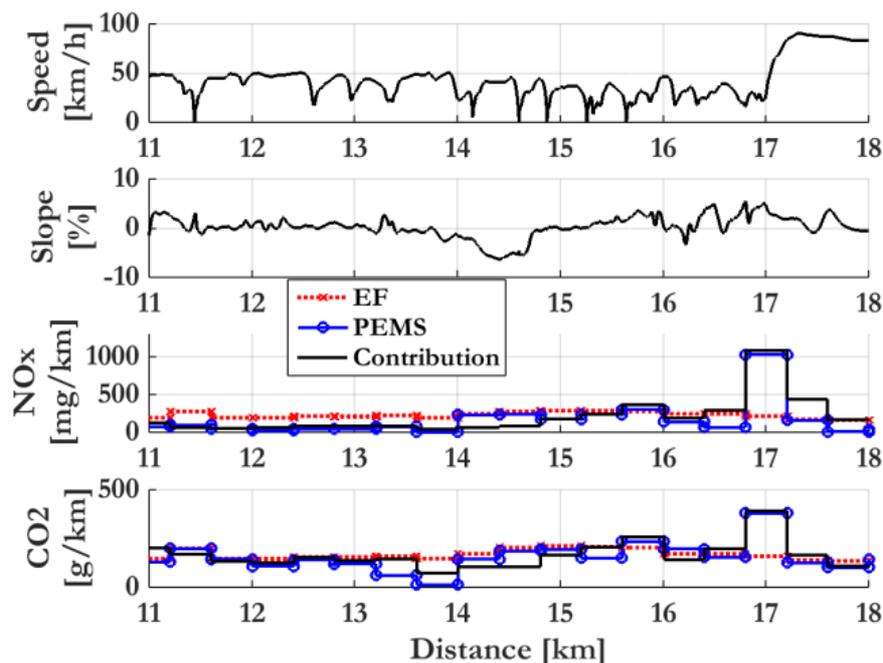


Figure 6 Essais de validation du modèle microscopique et comparaison avec la référence PEMS et les facteurs d'émissions (cas mixte)

La méthodologie AIRMES a été appliquée aux émissions de NO_x, NO₂, particules à l'échappement et hors échappement (émissions dues à l'usure des pneus et des plaquettes des freins) et CO₂, mais les méthodologies développées sont compatibles avec d'autres polluants. Les modèles ont été paramétrés et simulés sur l'ensemble parc automobile roulant fourni par AtmoSud (T1.3). Concernant la prise en compte des bus, deux roues et poids-lourds, les données d'émissions issues de l'inventaire de référence mis en œuvre par AtmoSud ont été utilisées. L'objectif final de cette tâche est de calculer les émissions polluantes des véhicules sur chaque segment de route à l'échelle microscopique. Cela est possible grâce aux profils de vitesse prédits (T1.1) sur chaque segment de route, même en absence de profils mesurés par l'application *Geco air*, qui seront ensuite traités par les modèles microscopiques d'émissions (T1.2).

Il est important d'observer que plusieurs profils peuvent être prédits sur chaque segment de route afin d'augmenter la représentativité vis-à-vis des vraies conditions de conduite. Un réseau routier est composé de plusieurs segments routiers, et les émissions sont calculées pour toutes les technologies de véhicules composant le parc roulant. Par ailleurs, afin de garantir la fine résolution temporelle, ces calculs sur l'ensemble du réseau et pour l'ensemble des véhicules, sont à refaire avec une résolution temporelle fixée à 5 minutes. Ce pas temporel correspond au pas minimal de mise à jour de certaines données SIG. Cela demande donc une vraie optimisation du cœur de calcul des émissions afin de ne pas avoir des temps de calcul réhidibitoires. Si l'on considère le pas temporel, tous les segments du réseau routier Euromed, les différentes manœuvres ainsi que chaque type de véhicule du parc auto, on estime avoir environ un million de calculs d'émissions à effectuer.

2.3. Application des modèles développés au quartier Euromed (T1.3)

L'objectif de cette tâche est de valider les développements réalisés dans les tâches T1.1 et T1.2 au moyen d'une comparaison entre les émissions estimées par les outils AIRMES et les émissions de l'inventaire régional fourni par AtmoSud. Les émissions de polluants sur chaque brin routier, calculées avec COPERT, seront extraites par type de véhicules de l'inventaire d'émissions et des GES en PACA (2016 ou 2017). AtmoSud fournira également les données de trafic disponibles sur la zone, ainsi qu'un module d'estimation des vitesses de circulation à partir des trafics annuels (TMJ/TMJA), des profils de trafic et de la capacité horaire estimée pour chaque brin. La comparaison des deux approches permettra d'enrichir l'analyse des données en sortie.

Afin d'établir cette analyse, nous en décrivons ici la méthodologie et les éléments de la comparaison :

- **Référence** : n'ayant pas à disposition une vraie mesure (PEMS) d'émissions polluantes dans le quartier d'expérimentation, les émissions calculées par le modèle microscopique (T1.2) en utilisant en entrée les vrais profils de vitesse mesurés par l'application *Geco air* sur les différents brins du réseau routier seront utilisées comme référence
- **Modèle** : le « modèle » représente la contribution du projet AIRMES, donc représente les émissions calculées par le modèle microscopique (T1.2) en utilisant en entrée les profils prédits (T1.1) sur les différents brins du réseau routier
- **MOCAT outil basé sur les équations COPERT** : il s'agit de l'état de l'art, utilisé dans le cadre de l'inventaire des émissions fournies par AtmoSud sur les différents brins du réseau routier. Pour rappel, COPERT est un modèle d'émissions macroscopique qui ne permet pas de prendre en compte les accélérations, ni les spécificités induites par la pente dans les sens uniques sur les des VP et des VUL.

2.3.1. Méthodologie de calcul de l'inventaire d'émissions

Afin d'avoir une meilleure compréhension de ce qui est représenté par l'état de l'art (COPERT), c'est-à-dire l'inventaire d'émissions fourni par AtmoSud, par la suite la méthode de calcul de cet inventaire est détaillée.

Etape 1 : Réalisation d'un réseau sur lequel est affecté le trafic (Trafic Moyen Journalier Annuel)

Les trafics sont issus de différentes sources de données locales (liste non exhaustive):

- Modèles de trafic :
 - Modèle EMME réalisé en 2014 dans le cadre de la L2 sur Marseille qui intègre les résultats d'un modèle FretUrb pour estimer le trafic de poids lourds dans le centre-ville de Marseille.
 - Modèle des axes routiers du GPMM et à l'interface avec la ville (Grand Port Maritime de Marseille).
- Comptages routiers provenant des différents gestionnaires de réseau de la zone l'étude : Métropole Aix Marseille Provence, ville de Marseille, DIRMED sur Autoroute non concédé et Conseil Départemental des Bouches-du-Rhône.

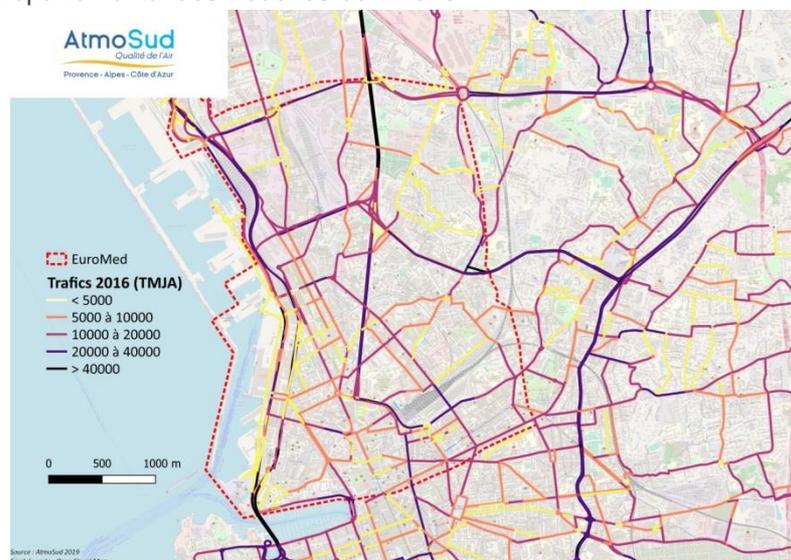


Figure 7 Trafics moyen journalier annuel en 2016

Le trafic est ensuite réparti par grand type de véhicule : Véhicules Particuliers, Véhicules Utilitaires Légers, Poids lourds, Bus, Car et 2 Roues. À chaque brin est affecté :

- **La part de poids lourds** sur la zone d'étude est issue de :
 - modèles de trafic (spécifiques poids lourds ou tous véhicules)
 - comptages et/ou statistiques (Conseils Départementaux, métropoles, DIRMED, SCOTA, etc.).

- **Pour les VUL, Bus et Car**, des valeurs par défaut sont utilisés issu des données des parcs roulants nationaux.
- **Pour les 2 roues**, le trafic sur l'agglomération est estimé sur la base de l'enquête ménage du CERTU réalisé sur Marseille et MAMP. Ce trafic total est ventilé par type d'axe sur le réseau de l'agglomération au prorata du trafic de chaque axe.

Etape 2 : Constitution d'un parc roulant

Le CITEPA fournit annuellement 4 parcs (urbain, périurbain, autoroute et moyen) nationaux. AtmoSud utilise dans le cadre de cette étude les données des parcs statique et roulant : MTES-DGEC/CITEPA version Janvier 2018 pour estimer le parc roulant à Marseille.

Il est à noter que sur les départements du Var et des Alpes Maritimes, AtmoSud réalise un ajustement de ces parcs en raison d'une répartition du parc statique Essence / Gazole des VP sensiblement différente à celui du parc statique national. Les comparaisons réalisées sur les Bouches-du-Rhône, que ce soient entre les parcs statiques ou lors de la campagne de une mesure des émissions des véhicules en conditions réelles de circulation menée à Marseille en novembre 2019 par rincident Air, n'ont pas montré de disparité sur la carburation des VP entre Marseille/13 et le parc statique national.

$$\text{Parc roulant} = \text{Parc statique}_{t,ca,e,cy} (\text{nombre de véhicules}) \times \text{Distance parcourue}_{t,ca,e,cy} \times \text{Ratio de répartition des trafic par type d'axe}$$

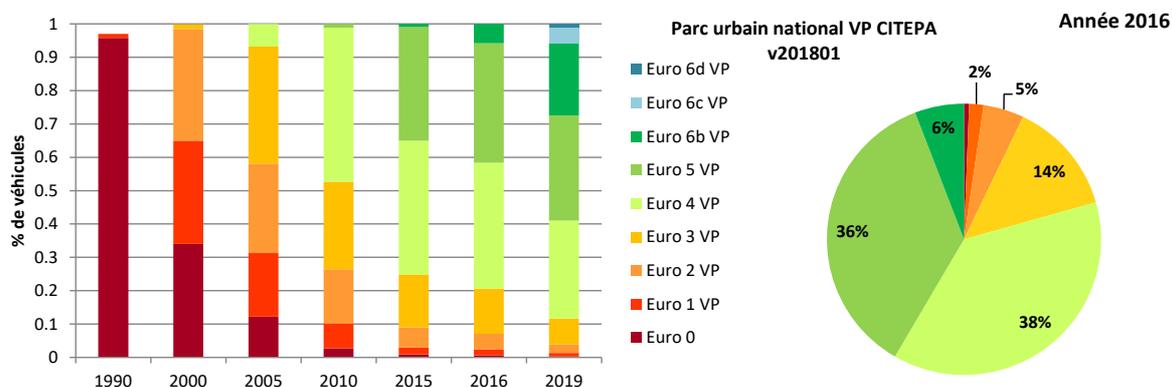
Avec :

- t* : Type de véhicule (VP, VUL, 2R, BUS, CAR, PL)
- ca* : Carburant (Essence, Gazole, Elec, GPL etc.)
- e* : Norme EURO
- cy* : Cylindrée

Les brins sont ensuite catégorisés par type de route (urbaine, périurbaine, autoroute) permettant d'affecter le parc roulant correspondant. Dans le cadre de ce projet en dehors de l'autoroute urbaine, la totalité du réseau est affecté à un type de route urbain.

Ainsi, le parc roulant en zone urbaine sur la commune de Marseille est montré en Figure 8, Figure 9, Figure 10 et Figure 11.

Toutefois, sur les départements du Var et des Alpes Maritimes, AtmoSud réalise un correctif car la répartition Essence / Gazole des VP est sensiblement différente du parc statique national.



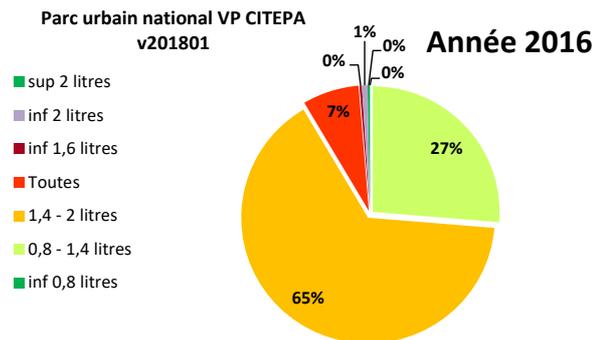
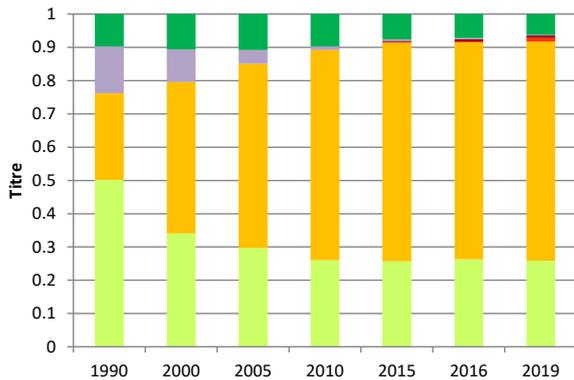
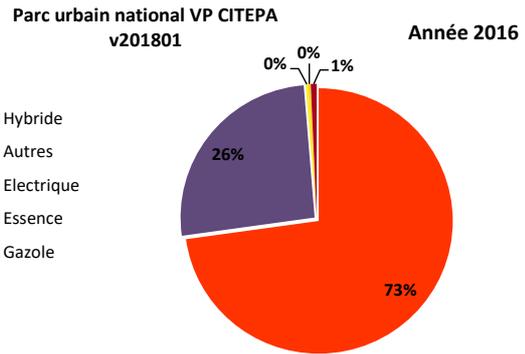
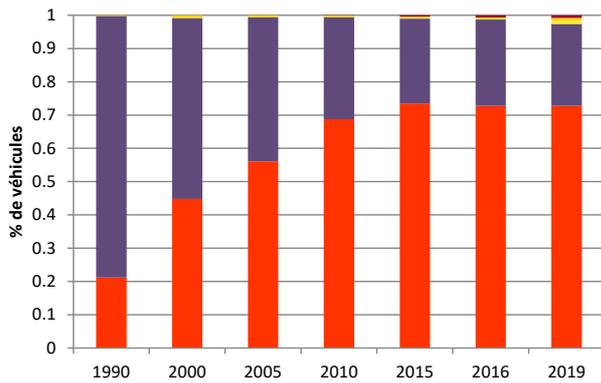
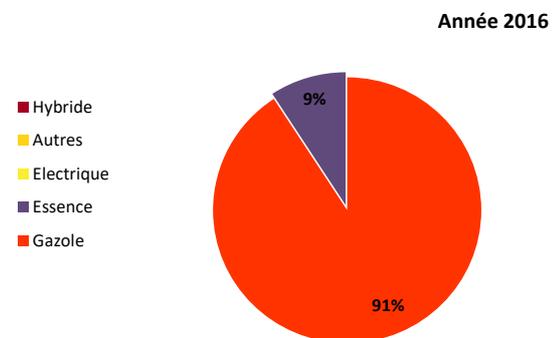
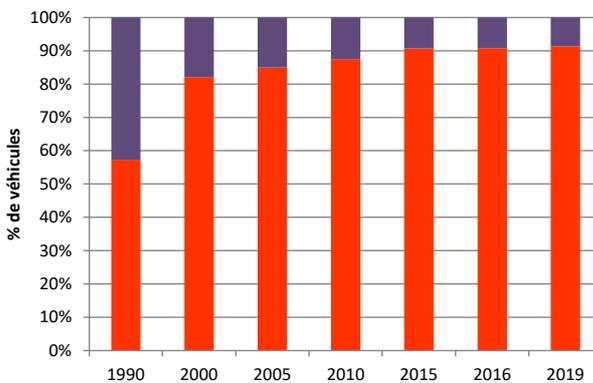
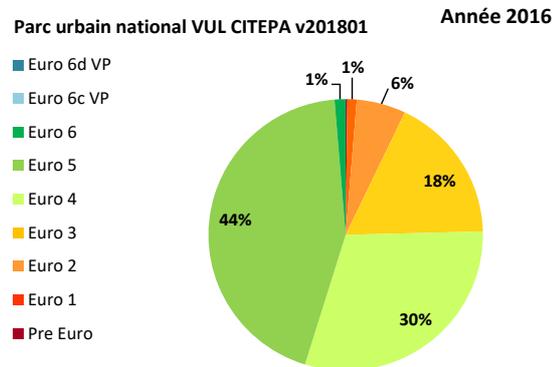
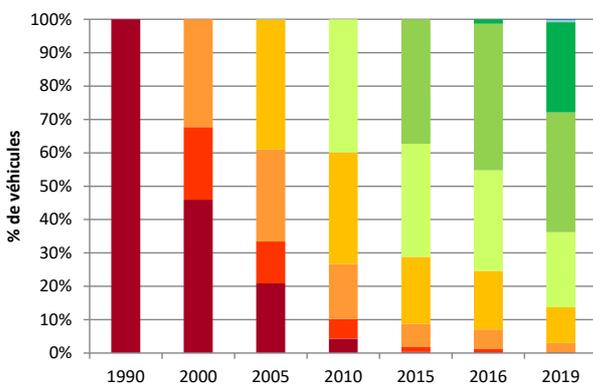


Figure 8 Parc roulant urbain des véhicules particuliers 2016 utilisé sur la commune de Marseille par norme EURO, carburant et cylindré



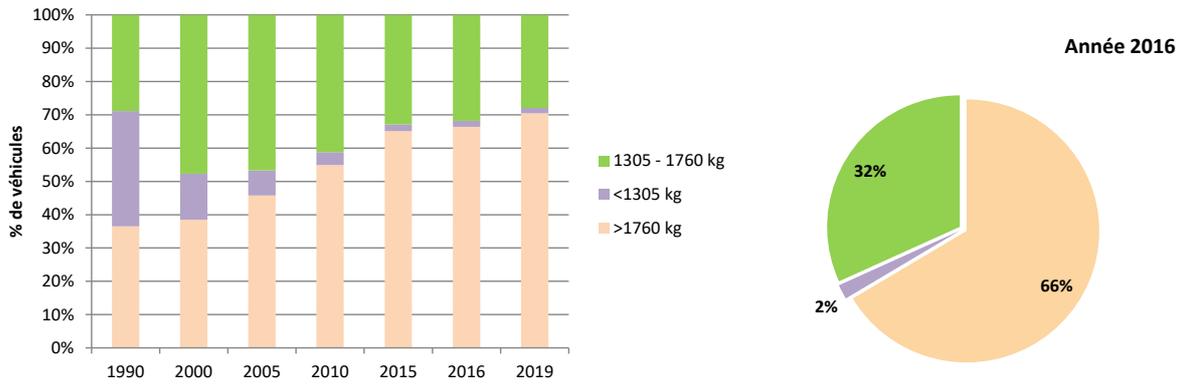


Figure 9 Parc roulant urbain des véhicules utilitaires particuliers 2016 utilisé sur la commune de Marseille par norme EURO, carburant et masse

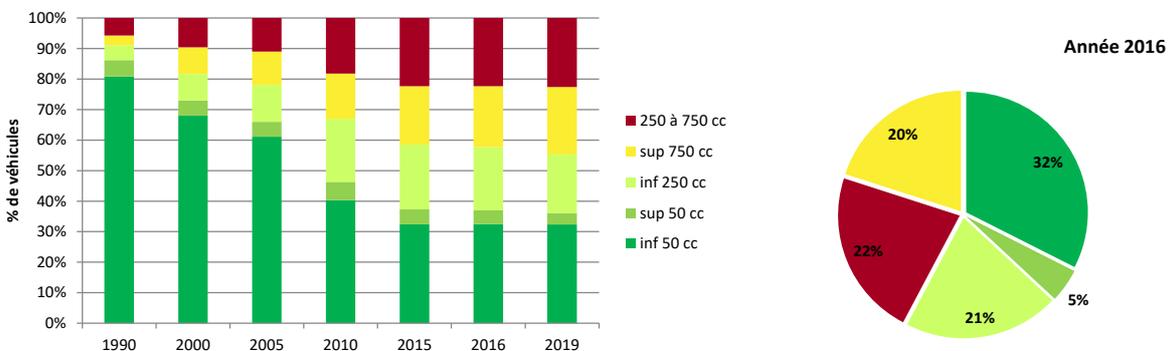
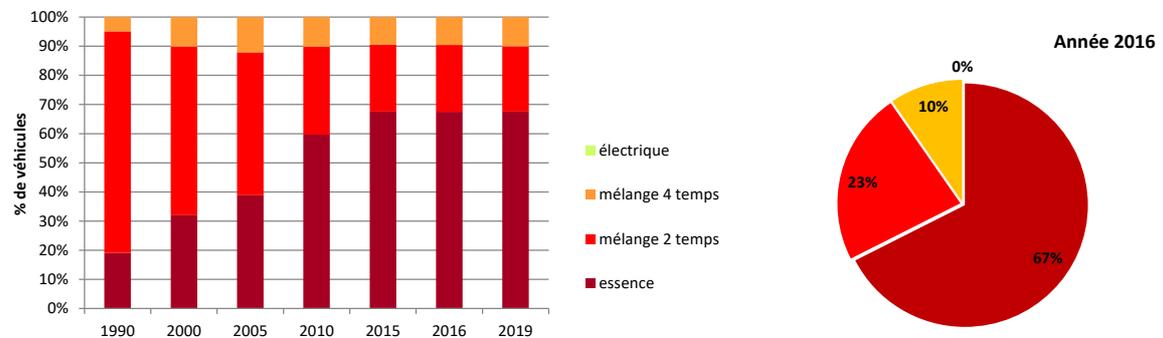
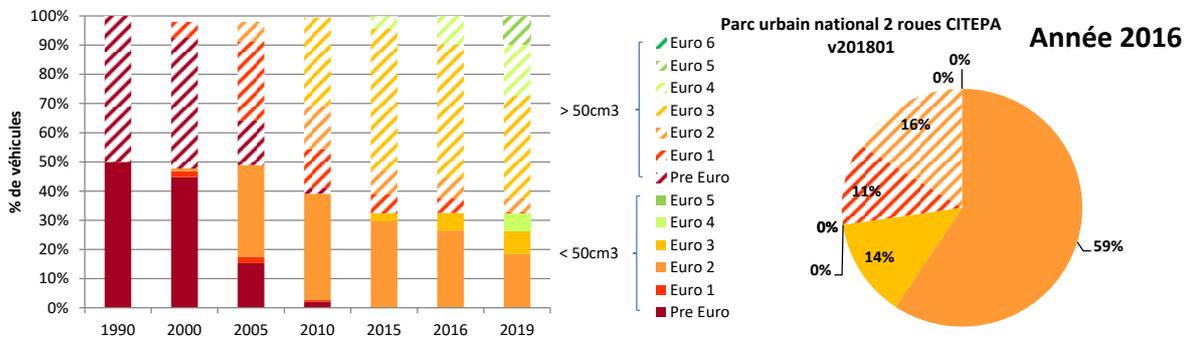


Figure 10 Parc roulant urbain des 2 roues 2016 utilisé sur la commune de Marseille par norme EURO, carburant et cylindre

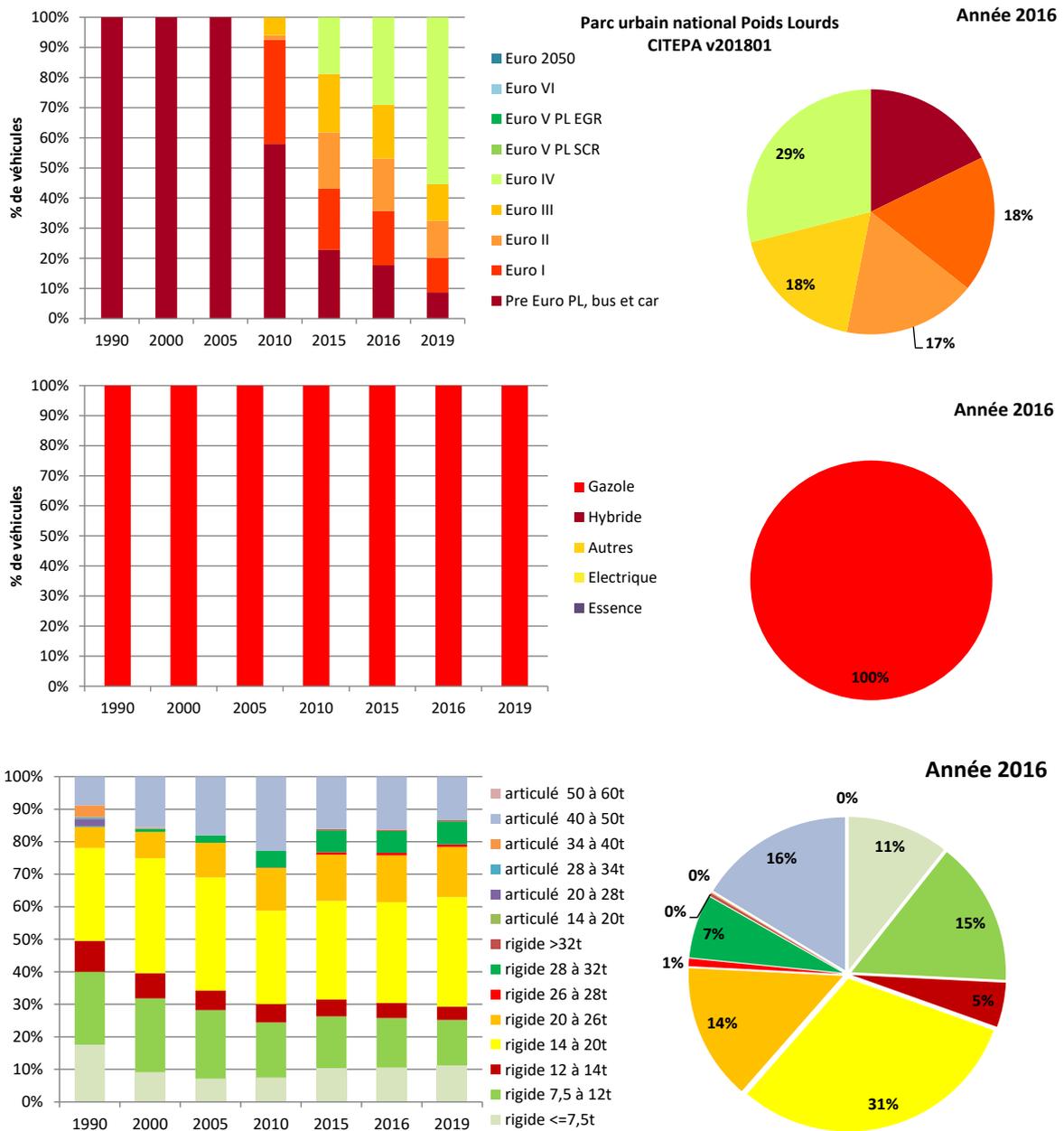


Figure 11 Parc roulant urbain des poids lourds 2016 utilisé sur la commune de Marseille par norme EURO, carburation et masse

Etape 3 : Affectation d'un profil de vitesse

Le profil de vitesse, défini par type de véhicule (VL et PL), dépend notamment de :

- la vitesse maximale réglementaire
- le type de route (urbaine, périurbaine, autoroute)
- pente/sinuosité
- niveau de congestion

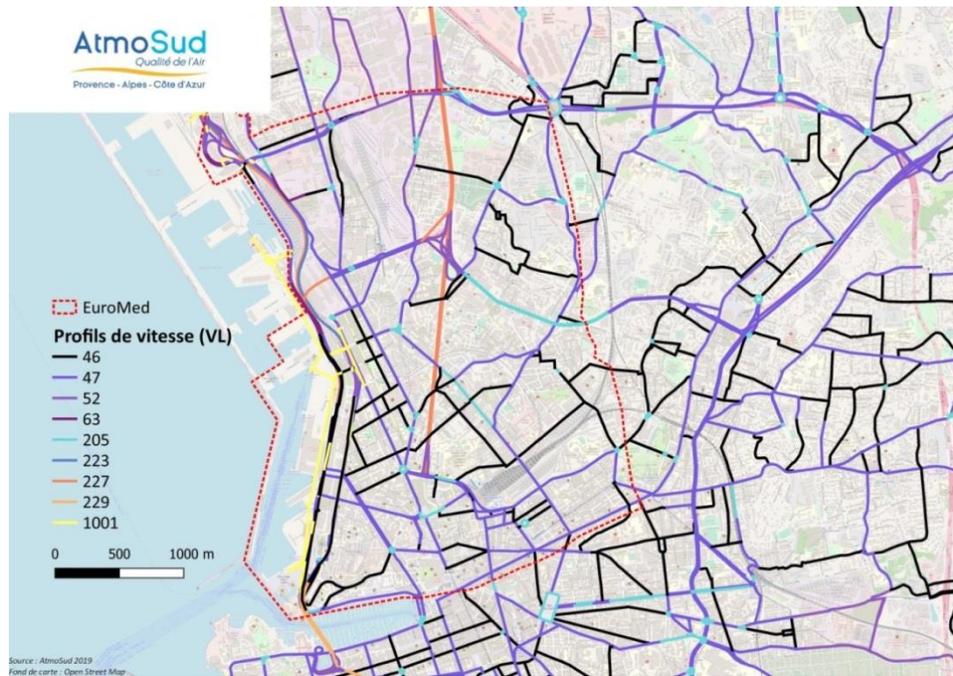


Figure 12 Répartition des brins par profil de vitesse (VL - 2016 - EuroMed)

Les profils de vitesse utilisés pour les véhicules légers et les poids lourds sur la zone EuroMed sont les suivants :

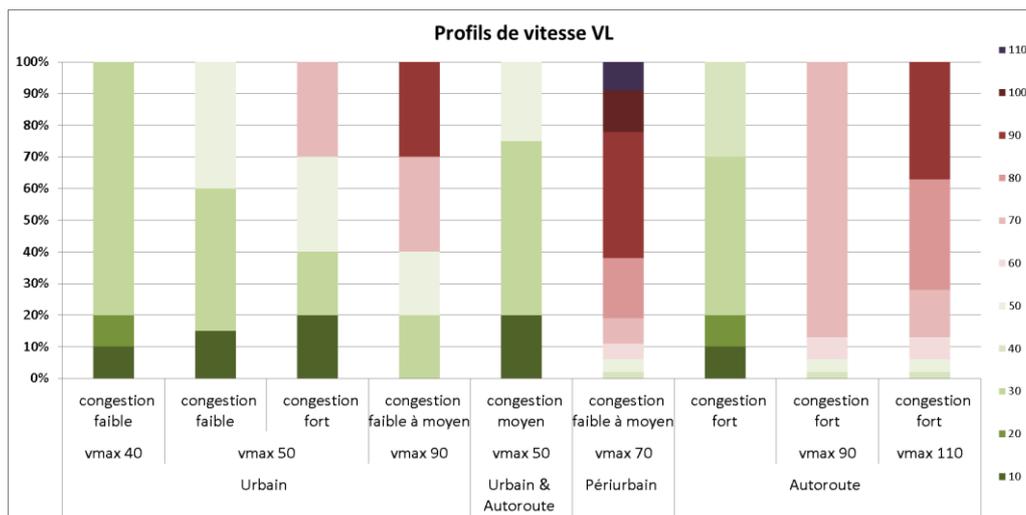


Figure 13 Profils de vitesse (VL - 2016 - EuroMed)

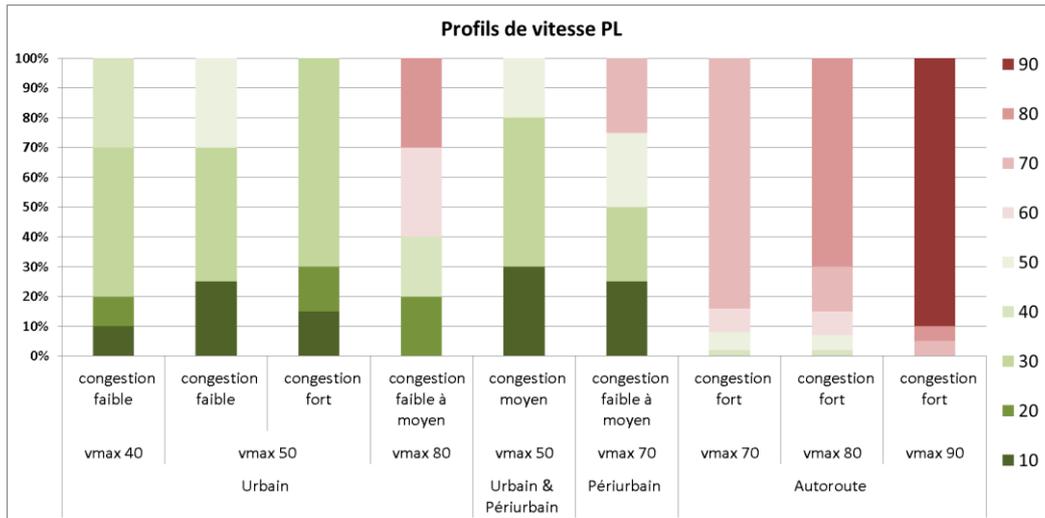


Figure 14 Profils de vitesse (PL - 2016 - EuroMed)

Etape 4 : Calcul des émissions et spatialisation

AtmoSud utilise des facteurs d'émissions COPERT V et OMINEA régulièrement mis à jour.

Les émissions E sont calculées, sur chaque brin du réseau concerné, selon la formule simplifiée suivante :

$$E_{t,ca,e,te} = D_{t,ca,e,te} \times FE_{t,ca,e,te}$$

Avec :

$$D = TMJA \times Longueur(km) \times 365$$

t : Type de véhicule (VP, VUL, 2R, BUS, CAR, PL)

ca : Carburant (Essence, Gazole, Elec, GPL etc.)

e : Norme EURO

te : Type d'émission (à chaud/froid, usure, etc.)

FE : Facteur d'émissions

Pour une grande partie des polluants calculés, le facteur d'émission dépend de la vitesse de circulation, parfois de la température extérieure. Pour les poids lourds des paramètres de charges sont également définies sur la base de données moyennes.

En sortie de calculs, les émissions sont donc disponibles par :

- Type de véhicule
- Carburant
- Norme EURO
- Crit'air
- Type d'émission

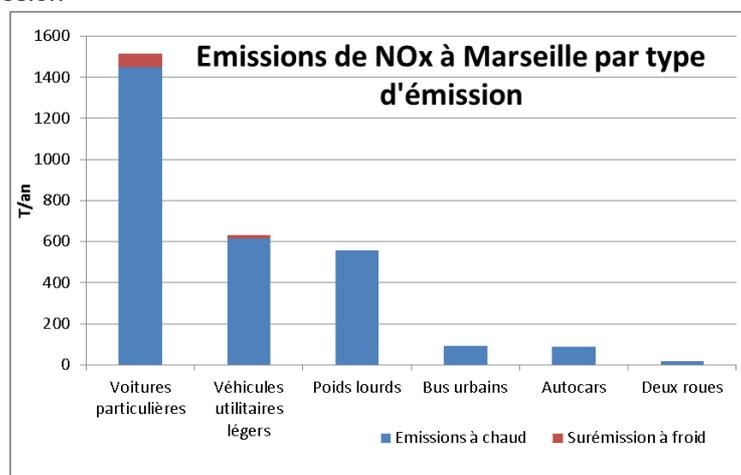


Figure 15 Émissions de NO_x sur la commune de Marseille (2016)

Perspectives d'amélioration

AtmoSud met à jour tous les ans, les données de comptages trafics en collectant les comptages disponibles auprès des différents gestionnaires de réseau. Dans le cadre de projet d'évaluation, des modèles de trafic sont également intégrés à la matrice des réseaux routiers de la région afin de mieux qualifier le trafic du territoire.

Plusieurs perspectives d'amélioration sont envisagées sur la zone et sur la région :

- Sur la zone de la Métropole Aix Marseille Provence, l'intégration des données de modalisation M13 afin d'affiner les données trafics à fines échelles. Un travail d'intégration des données de comptages est nécessaire pour une meilleure estimation des trafics PL et 2 roues notamment.
- Mise en place fin 2020 de l'outil de Plateforme régionale d'inventaires spatialisés mutualisée (PRISME) sur le secteur routier. Cet outil est dans le cadre de SynAirGIE, un groupement d'intérêt économique (GIE) des AASQA. Cet outil permet la mise en place de développement partagé par toutes les AASQA et permettant de répondre à l'ensemble des besoins d'évaluation, de l'inventaire régionaux, aux évaluations de scénarisations locales ou à l'amélioration des modèles de dispersion régionaux et à l'échelle de la rue.



Une plus-value importante se base sur une simulation horaire de chaque axe de la congestion attendu en fonction de profil de trafic horaire pour définir un profil de vitesse adapté aux spécificités de chaque brin (vitesse réglementaire, trafic horaire, capacité de l'axe). Des profils de vitesse sont ainsi calculés pour chaque axe et chaque type de véhicules pour affiner au mieux les émissions locales à partir des équations COPERT.

Cet outil permettra également d'évaluer facilement sur la base de données horaire de trafic et de vitesse les émissions d'un axe et d'en déduire des profils d'émission spécifique par type d'axe et par catégorie de véhicules.

- AtmoSud recherche également à récupérer des données de trafic temps réel via des API afin de pouvoir ajuster les émissions dans les modèles de prévision horaires de qualité de l'air à l'échelle de la rue.
- Les retombées envisagées du projet AIRMES pour l'outil PRISME routier. Plusieurs pistes de partenariats sont envisagées pour améliorer les outils d'évaluation des émissions routières des AASQA sur la base des expertises de l'IFPEN :
 - La mise en place pour les axes urbains à sens unique, de calcul d'émission tenant compte de l'impact de la pente pour les VP et les VUL. Cette fonctionnalité devrait être relativement simple à implémenter.
 - La prise en compte des surémissions induite par les phénomènes d'accélération des véhicules (VP, VUL, PL). Cette partie est plus complexe et nécessite une adaptation géographique des réseaux utilisés pour les calculs. Il faudrait pour cela identifier toutes les intersections concernées, réaliser des découpages pertinents des axes et associer des surémissions pertinentes liées aux accélérations. Un travail de développement spécifique serait nécessaire.

2.4. Méthodologie de modélisation de la dispersion (T2.1)

L'objectif de cette tâche est d'exploiter les estimations d'émissions effectuées par les outils AIRMES dans la tâche T1.3 afin d'estimer la qualité de l'air sur le quartier Euromed et d'identifier les points d'intérêt en matière d'émissions polluantes et de qualité de l'air. La validation des résultats sera faite par comparaison à une modélisation de la qualité de l'air en faisant uniquement usage de l'inventaire régional fourni par AtmoSud et aux différentes mesures de la qualité de l'air qui sont disponibles sur le territoire. Cette validation permettra aussi de démontrer la plus-value de l'approche développée ici.

Voici la méthodologie et les éléments de comparaison :

- **Les émissions** : c'est la contribution du projet AIRMES que de permettre une cartographie à haute résolution spatiale (allant jusqu'à 10 mètres) et temporelle (5 minutes) des émissions liées au trafic. Issue d'une approche microscopique des émissions des véhicules, les outils développés (T1.3) rendent compte du style de conduite (accélération) et de la pente.

- **La référence** : Régulièrement mis à jour, l'inventaire régional des émissions fourni par AtmoSud constitue la référence pour le quartier d'Euromed.
- **Le modèle** : Le modèle 3D PMSS (ou PARALLELE MICRO SWIFT-SPRAY) est utilisé pour simuler le transport et la diffusion des polluants atmosphériques. Le modèle permet de cartographier l'évolution temporelle des concentrations au quartier Euromed avec une haute résolution spatiale et temporelle. Le modèle bénéficie d'une prise en compte explicite des bâtiments et des réactions chimiques entre le NO_x et l'Ozone.

2.4.1. Présentation et objectifs

Les émissions issues du trafic routier représentent une contribution majoritaire à l'exposition de la population urbaine à la pollution de l'air. Les outils actuels de gestion de la qualité de l'air utilisent actuellement une modélisation des émissions du trafic routier qui est représentative statistiquement de l'ensemble des conditions possibles de circulation en zone urbaine. Cette méthodologie dite macroscopique, est adaptée à de larges échelles spatiales et à un style de conduite normé. Les tâches 1.1 à 1.3 ont permis la conception et le développement d'une méthodologie microscopique de calcul des émissions du trafic routier pour le quartier d'Euromed. Pour rappel :

- La tâche 1.1 a permis une caractérisation et une modélisation des profils de conduite en usage réel, où les conditions de trafic, le style de conduite et la signalisation routière ont un impact d'ordre un sur les accélérations.
- La tâche 1.2 a permis une modélisation des émissions polluantes à l'échelle du véhicule, et en fonction de leur motorisation (Essence ou Diesel et norme Euro), leur système d'injection (directe, indirecte) et leur post-traitement (catalyseur, SCR, NoxTrap).
- La tâche 1.3 a servi de cas d'application, avec un passage à l'échelle du quartier d'Euromed des profils de conduite et des émissions en accord avec le trafic (Trafic Moyen Journalier Annuel – TMJA) et le parc roulant (CITEPA corrigé par AtmoSud).

La tâche 2.1 porte sur la modélisation de la qualité de l'air sur le domaine d'Euromed. L'objectif est d'exploiter les estimations d'émissions effectuées lors des tâches 1.1 à 1.3, afin d'identifier les points d'intérêt en matière d'émissions polluantes et de qualité de l'air. L'évaluation des résultats est faite par comparaison à une modélisation de la qualité de l'air en faisant usage de la méthodologie macroscopique COPERT et aux différentes mesures de la qualité de l'air fournies par AtmoSud et disponibles sur le territoire (station automatique et campagne de tubes passifs).

2.4.2. Présentation de PMSS

Deux mécanismes sont prépondérants dans la dispersion des polluants atmosphériques :

- le transport du polluant par le vent (influence des obstacles et des conditions météorologiques);
- la diffusion du polluant par la turbulence : diffusion (autour de l'axe de propagation) par la turbulence qui reflète les fluctuations du panache par rapport au vent moyen (structure thermique et dynamique de l'atmosphère).

Pour les simuler et compte-tenu de la présence de bâtiments, le modèle 3D PMSS est utilisé (PMSS pour Parallel Micro Swift-Spray). PMSS tient compte des variations du vent et de la turbulence atmosphérique aussi bien dans l'espace que dans le temps (conditions non stationnaires). Il est en mesure de reconstruire des champs 3D de concentration, de dépôts sec et humide et de dose à partir de sources ponctuelles, linéaires, surfaciques ou volumiques (cheminées, trafic routier, rejets accidentels, sources diffuses...). PMSS a été validé sur de nombreuses campagnes de mesures réalisées notamment par le US Department of Defense (Defense and Threat Response Agency) ainsi que sur des mesures en soufflerie atmosphérique. PMSS repose sur la mise en œuvre conjointe de :

- Parallel Micro Swift (PSWIFT), modèle de calcul de champs de vent et de température 3D, prenant notamment en compte l'influence du relief, de l'occupation des sols et des bâtiments, et respectant les règles de base de la mécanique des fluides telle que la conservation de la masse ;
- Parallel Micro Spray (PSPRAY), modèle lagrangien tridimensionnel de type Monte-Carlo permettant de calculer la dispersion de polluant à partir du champ de vent tridimensionnel calculé par PSWIFT, en utilisant un grand nombre de pseudo-particules (le polluant est simulé par des "particules virtuelles"). Les pseudo-particules représentent une partie de la masse émise de polluants. Ce modèle à particules virtuelles permet des simulations plus réalistes que des modèles gaussiens en conditions complexes, tout en bénéficiant d'un temps de calcul réduit par rapport aux modèles 3D de type CFD (80% de la solution en 10% du temps de calcul). PSPRAY permet notamment une bonne prise en compte des vents calmes, des inversions de température, des écoulements cisailés dus à la présence d'obstacles ainsi que des sites à fortes discontinuités de type « terre-mer » ou « ville-campagne ».

La Figure ci-dessous présente la méthodologie mise en œuvre pour aboutir aux cartographies de la qualité de l'air.

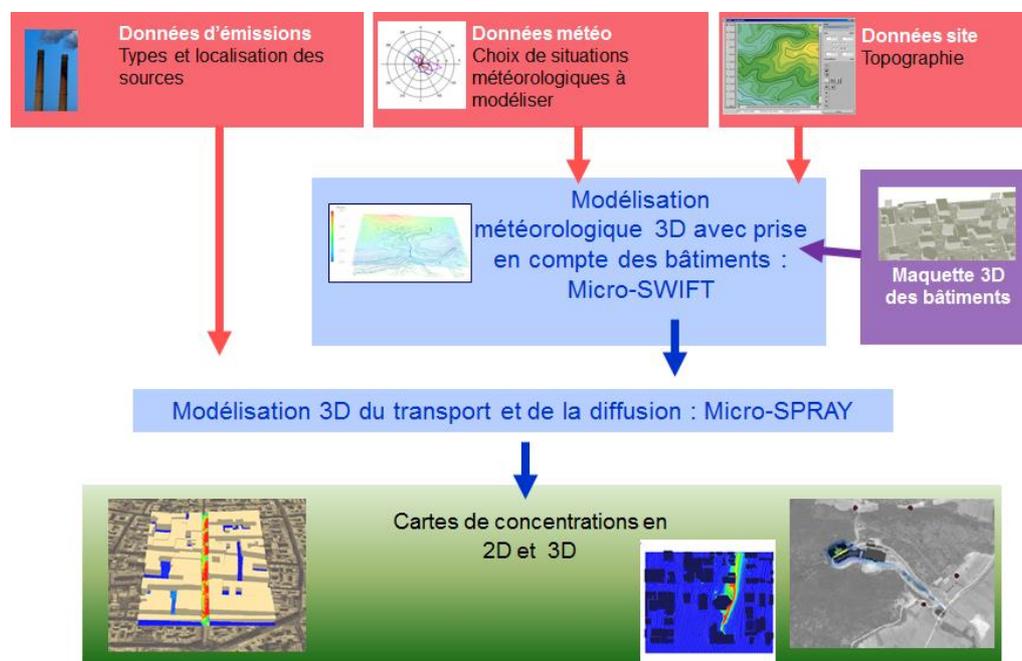


Figure 16 : Méthodologie de mise en œuvre de PMSS

2.4.3. Construction de la maquette 3D

La construction de la maquette 3D a pour objectif :

- D'optimiser la paramétrisation du modèle de micro-météorologie SWIFT pour intégrer sans encombre le relief et les données bâtiments du territoire ;
- De vérifier que le calcul peut se faire sur un domaine unique mono-tuile (c'est-à-dire sans découper le domaine en plusieurs tuiles de calcul) avec des temps de calcul acceptables. Il s'est avéré qu'un tuilage était nécessaire.
- De définir la taille des mailles à utiliser pour modéliser les écoulements dans les rues de manière fine.

La modélisation à haute résolution de la qualité de l'air nécessite une description fine du relief et des bâtiments, ces données ont été fournies par AtmoSud.

2.4.3.1. Domaine d'étude et topographie

Le projet porte sur la modélisation de la qualité de l'air autour du projet de nouveau quartier Euromed. Le domaine modélisé – d'environ 4,0 km de large sur 4,5 km de haut – est présenté sur la figure ci-dessous. Compte-tenu des caractéristiques des rues, une résolution de 4 m est choisie sur l'ensemble du domaine modélisé par PMSS pour modéliser efficacement la dispersion des polluants dans le tissu urbain.

La topographie est issue d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) au pas de 25 mètres fourni par AtmoSud et présenté sur la figure ci-dessous. Une extrapolation à 4 m a été réalisée pour les besoins de la modélisation à haute résolution.

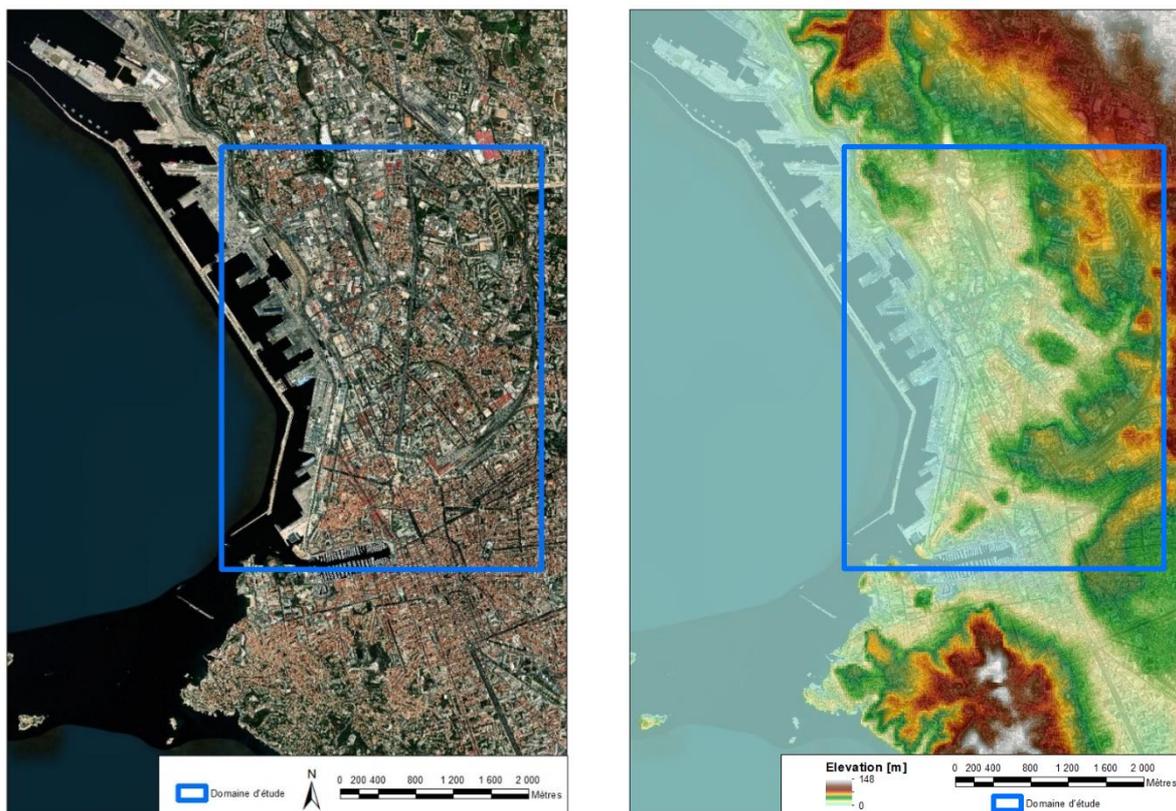


Figure 17 : Domaine d'étude (à gauche) et topographie du domaine d'étude (à droite)

2.4.3.2. Bâtiments

Le fichier de description 3D des bâtiments, au format shapefile, a été fourni par AtmoSud. La figure ci-dessous montre le bâti et également les grandes sources ponctuelles (GSP) dans le domaine d'étude. Les caractéristiques des GSP ont été fournies par AtmoSud.

Le fichier de description des axes routiers sur le domaine a également été fourni par AtmoSud (au format shapefile). Les tâches 1.1 à 1.3 ont conduit à une description des émissions due au trafic sur une journée entière, avec une mise à jour des émissions toutes les 5 minutes sur l'ensemble d'un réseau routier décrivant le quartier d'Euromed. La description du réseau routier a été modifiée lors des tâches 1.1 à 1.3. Il se compose de segments de routes, long en moyenne de 42m, et dont leur longueur peut varier de quelques mètres à quelques centaines de mètres. La figure ci-dessous montre les émissions de NO_x en moyenne journalière et calculées selon la méthodologie développée dans le cadre du projet.

2.4.3.3. Météorologie et pollution de fond

A défaut de station météorologique dans la zone d'intérêt, les sorties d'un modèle météorologique ont été utilisées. AtmoSud modélise quotidiennement la météorologie de l'ensemble de l'agglomération marseillaise avec le modèle communautaire *Weather Research and Forecasting Model* (WRF). Une succession de 3 simulations à plus en plus fine échelle est effectuée quotidiennement pour la prévision des 3 jours à venir. Ces simulations sont notamment utilisées dans le cadre de l'outil opérationnel SIMPAC qui permet, en cas accidentel, la modélisation opérationnelle de panaches de polluants.

Le modèle PMSS est alimenté en données météorologiques par la simulation WRF à plus fine échelle, et les profils verticaux des 16 points de grille entourant le domaine d'intérêt. La Figure 18 montre les quatre points de grille WRF à proximité du domaine d'étude

La station du réseau fixe d'AtmoSud « 5 avenues » mesure au pas horaire la qualité de l'air de fond de ce secteur de l'agglomération marseillaise. Installée de manière temporaire, la station « Place Verneuil » mesure au pas horaire la qualité de l'air urbaine de proximité du trafic routier. Les données d'observation de ces 2 stations ont été transmises par AtmoSud. La figure suivante illustre également le positionnement des 2 stations vis-à-vis du domaine d'étude.



Figure 18 : *Domaine d'étude, grille de modélisation WRF, stations 5 avenues (en rose) et Place Verneuil (en vert)*

2.4.4. Cartographie de la qualité de l'air

Pour calculer les cartographies de la qualité de l'air sur une journée de référence, la méthodologie suivante est appliquée en partant de la maquette numérique 3D présentée dans la section précédente :

- La journée à simuler a été choisie en discussion avec AtmoSud parmi les journées :
 - Sans pluie ;

- Sans pointe de SO₂ traçant une activité maritime à proximité (et donc pouvant impacter les concentrations mesurées pour les autres polluants);
- Données disponibles pour les 2 stations de mesure de la qualité de l'air.

Le **jeudi 20 juin 2019** a été choisi, notamment car les concentrations en NO₂ à la station urbaine de fond « 5 avenues » sont proches de la moyenne annuelle 2019 : 25.2 µg/m³ en moyenne jour pour 26 µg/m³ en moyenne annuelle.

- L'ensemble des résultats horaires sont fournis en TU (donc un décalage de 2 heures par rapport à l'heure locale pour la date choisie).
- Les sources de polluants directement modélisées sont de 2 types.
 - **Les émissions du trafic routier** ont été fournies par l'IFPEN par type de véhicule (VP, VUL, 2D, PL, moto). Pour l'ensemble du réseau routier, le débit des émissions des polluants considérés (notamment PM₁₀, NO₂ et NO_x) évolue temporellement suivant la méthodologie de calcul :
 - **AIRMES** : mise à jour des émissions toutes les 5 minutes
 - **COPERT** : mise à jour des émissions toutes les 60 minutes
 - **Les émissions des GSP**, avec les paramètres thermodynamiques des cheminées (hauteur, température et vitesse d'éjection des rejets en sortie de cheminée), ont été fournies par AtmoSud.

La Figure 19 montre les émissions moyennes du trafic routier et l'emplacement des GSP sur le domaine modélisé.

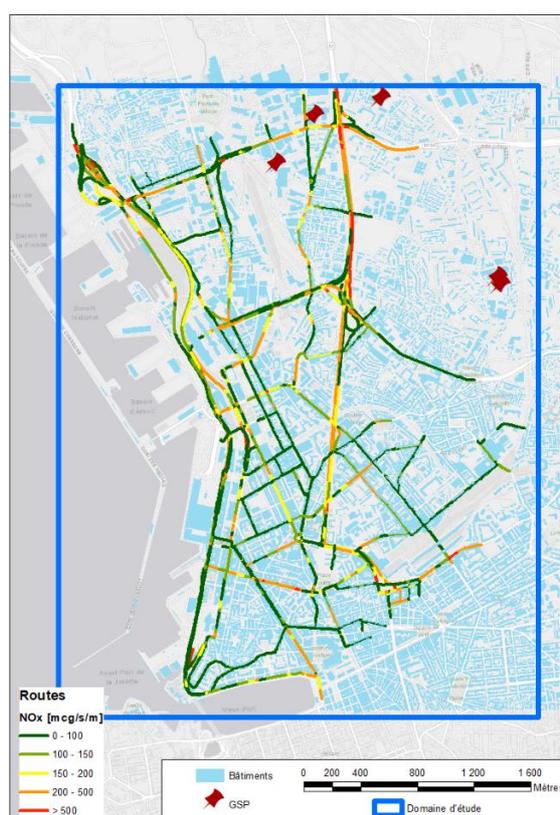


Figure 19 Domaine modélisé : bâti, axes routiers et GSP (en rouge) sur le domaine d'étude (en bleu)

- Les autres sources de polluants sont prises en compte en intégrant les concentrations de fond mesurées à la station urbaine de fond « 5 avenues », cette station étant supposée être hors de l'influence directe des différentes sources explicitement modélisées dans notre modélisation. Les données d'observation de cette station ont été transmises par AtmoSud. La Figure 18 montre le positionnement de la station de fond vis-à-vis du domaine d'étude.

- La station urbaine de proximité « Place Verneuil » mesure au pas horaire les concentrations en NO₂ et en NO_x. Le rapport des concentrations observées est appliqué à la concentration en NO_x modélisée par PMSS pour obtenir une estimation des concentrations en NO₂. La figure ci-dessous montre l'évolution horaire du rapport des concentrations observées pour la journée du **jeudi 20 juin 2019**.

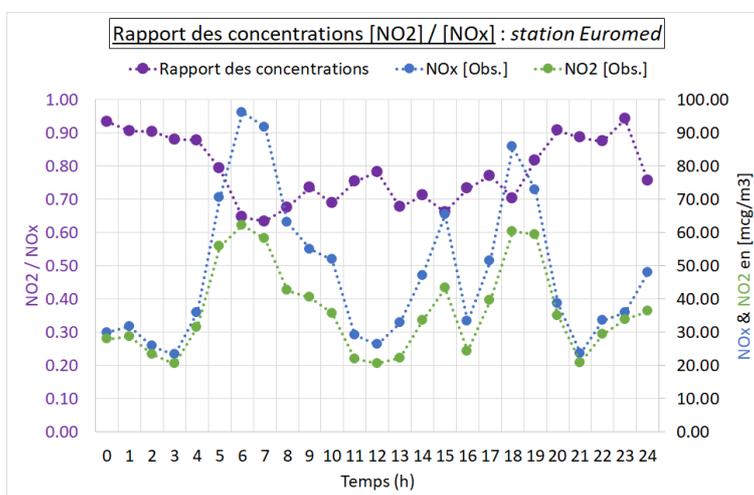


Figure 20 : Concentrations en NO_x et en NO₂ (et leur rapport) observées à la station de proximité « Place Verneuil » le 20 juin 2019

2.5. Étude de scénarios (T2.2)

L'objectif de cette tâche est d'analyser les zones critiques en matière d'émissions polluantes sur le quartier d'Euromed à l'aide des outils développés dans le projet. La modélisation de la dispersion détaillée dans la tâche T2.1 permet d'estimer la qualité de l'air sur le quartier Euromed. Le modèle de dispersion en tandem d'une estimation des émissions tous les deux à haute résolution spatiale et temporelle permet de cartographier les points noirs du domaine pour la qualité de l'air.

2.5.1. Présentation et objectifs

Les outils actuels de gestion de la qualité de l'air font souvent appel à une modélisation des émissions du trafic routier qui est représentative de l'ensemble des conditions possibles de circulation. L'utilisation de cette méthodologie, dite macroscopique, ne permet pas la modélisation de conduite en usage réel.

- Les tâches 1.1 à 1.3 ont permis la conception et le développement d'une méthodologie microscopique de calcul des émissions due au trafic. Le cas d'application a été la description des émissions sur une journée entière, avec une mise à jour des émissions toutes les 5 minutes sur l'ensemble d'un réseau routier décrivant le quartier d'Euromed.
- La tâche 2.1 a mis en évidence que la pente, le style de conduite (accélération et freinage) et la signalisation routière ont un impact d'ordre un sur la quantité de polluants émise.

Les dimensions du domaine d'étude sont de 4,0 km par 4,5 km pour la tâche 2.1. Pour éviter des temps de calcul rédhibitoire, la mise à jour des émissions trafic est faite toutes les 5 minutes sur l'ensemble des segments de routes du domaine, long en moyenne de 42 m. La prise en compte de la pente et de la signalisation routière sur les émissions traduit cette résolution spatiale et temporelle. En descendant en résolution spatiale à 5 m et en résolution temporelle à 5 s, l'objectif de la présente tâche est de mettre plus encore en lumière les apports à la modélisation de la pollution urbaine qu'ont le style de conduite (accélération et freinage) et la signalisation routière.

2.5.2. Construction de la maquette 3D à très haute résolution

La maquette 3D construite pour la tâche 2.1 est modifiée pour l'objectif ici fixé en définissant un sous-domaine à très haute résolution imbriqué dans le domaine précédent :

- Le projet porte sur la modélisation de la qualité de l'air autour d'un sous-domaine, centré sur la place de la Joliette. Le sous-domaine – d'environ 400 m x 800 m– est décrit avec une très haute résolution (1 m) pour prendre en compte des variations d'émissions à très haute résolution spatiale. Il est présenté sur la figure ci-dessous.
- La description spatiale du réseau routier a été raffinée afin que la longueur des segments de routes soit d'environ 5 m au centre du domaine modélisé.
- La description temporelle des émissions issues du trafic routier a été également raffinée avec un pas de temps de 5 s sur l'ensemble d'un réseau routier décrivant le domaine d'étude.
- La signalisation routière est prise en compte dans les émissions, et notamment dans le calcul des profils de vitesse. Autour d'un feu de circulation, certains profils contiennent des arrêts des véhicules, d'autres sont sans arrêt, permettant ainsi de prendre en compte l'alternance feu au rouge, feu au vert. Une succession de 3 feux sur une voie de circulation est explicitement décrite dans l'estimation des émissions. Ceci signifie qu'il y a une alternance dans le temps des profils de vitesse : tous s'arrêtent à un feu au rouge, puis aucun ne freine pour un feu au vert. La mise à jour des émissions se fait toutes les 5 secondes. Les émissions ont été modélisées pour **10 cycles d'alternance des feux de circulation** entre le rouge et le vert, soit une durée totale de 13 minutes et 20 secondes.
- Sur la voie où les feux de circulation sont explicitement décrits, une modulation de la densité du trafic est également prise en compte dans l'estimation des émissions : pas de véhicule en aval d'un feu au rouge et plus de véhicule en amont d'un feu au rouge par comparaison avec la densité pour le feu au vert. La densité moyenne du trafic égale la valeur TMJA à 18 heures (GMT). L'utilisation d'un modèle de trafic sort du cadre du projet AIRMES même si la méthode utilisée pour représenter la dynamique du trafic routier reste rudimentaire, elle donne une idée qualitative de l'impact d'une mise à l'échelle des émissions à une très haute résolution spatiale et temporelle (5 m, 5 s).

2.5.3. Cartographie de la qualité de l'air à très haute résolution

Pour calculer les cartographies de la qualité de l'air, la méthodologie suivante a été appliquée en partant de la maquette numérique présentée dans la section précédente :

- Comme dans la section précédente, la météorologie de la journée du **jeudi 20 juin 2019** a été modélisée. De la simulation WRF à plus fine échelle réalisée par l'outil opérationnel SIMPAC, le modèle PMSS intègre les profils verticaux des 16 points de grille entourant le domaine d'intérêt. La Figure 18 montre les quatre points de grille WRF à proximité du sous-domaine ici à l'étude.
- Les sources de polluants directement modélisées sont les émissions du trafic routier fournies par l'IFPEN en intégrant les différentes catégories de véhicule. Pour l'ensemble du réseau routier, le débit des émissions des polluants considérés (notamment PM₁₀, NO₂ et NO_x) évolue temporellement suivant la méthodologie de calcul :
 - AIRMES : mise à jour des émissions toutes les 5 secondes (avec une discrétisation spatiale et un débit de trafic variable)
 - COPERT : mise à jour des émissions toutes les 60 minutes

La Figure 21 montre les émissions moyennes issues du trafic routier sur le domaine d'étude et le domaine imbriqué à haute résolution

- Les autres sources de polluants sont prises en compte en intégrant les concentrations de fond mesurées à la station urbaine de fond 5 avenues, cette station étant supposée être hors de l'influence directe des différentes sources explicitement modélisées dans notre modélisation. Les données d'observation de cette station ont été transmises par AtmoSud. La Figure 18 montre le positionnement de la station de fond vis-à-vis du domaine d'étude.

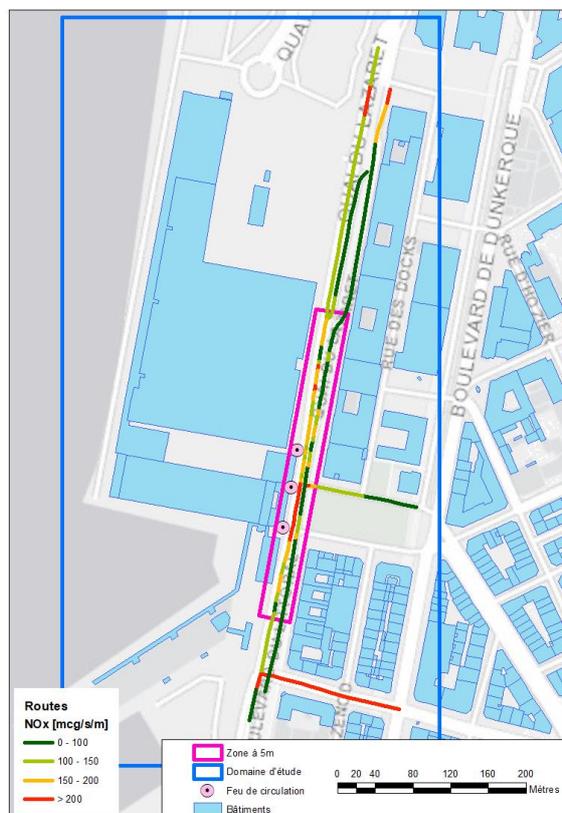


Figure 21 : Domaine à très haute résolution : bâti et émissions du trafic routier sur le domaine d'étude

3. Bilan / Principaux résultats obtenus

Comme mentionné au début de ce rapport, l'objectif du projet AIRMES est de concevoir et développer de nouvelles méthodologies pour la modélisation de la qualité de l'air en se basant sur les données d'usage réel des voitures particulières collectées grâce à l'application *Geco air*. La finalité de ces nouveaux outils est d'être capable de modéliser les émissions à l'échappement puis les concentrations de polluants avec une résolution spatiale (10 mètres) et temporelle (5 minutes) fines, afin de permettre aux villes de comprendre et identifier les zones critiques en matière de polluants ainsi que l'impact de la réglementation et de l'infrastructure.

Cette section a pour but de résumer les principaux résultats obtenus pour atteindre cet objectif.

3.1. Caractérisation et modélisation des profils de roulage en usage réel (T1.1)

Les résultats de la tâche 1.1 concernant la prédiction des profils de vitesse sont analysés ici d'un point de vue principalement qualitatif avec des considérations quantitatives sur les erreurs à la vitesse moyenne et aux vitesses initiales/finales des profils prédits par rapport aux profils réels mesurés sur les mêmes segments routiers. La validation principale de la représentativité des profils prédits sera conduite dans les tâches 1.2 et 1.3 en termes de précision sur les émissions de polluants prédites par rapport à la référence (telle qu'elle a été définie dans la Section 2.3).

Les résultats seront d'abord présentés avec la **construction déterministe** des profils de vitesse. Un premier exemple de prédiction des profils de vitesse sur un segment de route avec un feu tricolore en

aval est montré en Figure 22. Ce segment n'appartient pas à la zone d'apprentissage et permettra donc d'évaluer la « transposabilité » du modèle à d'autres zones géographiques.

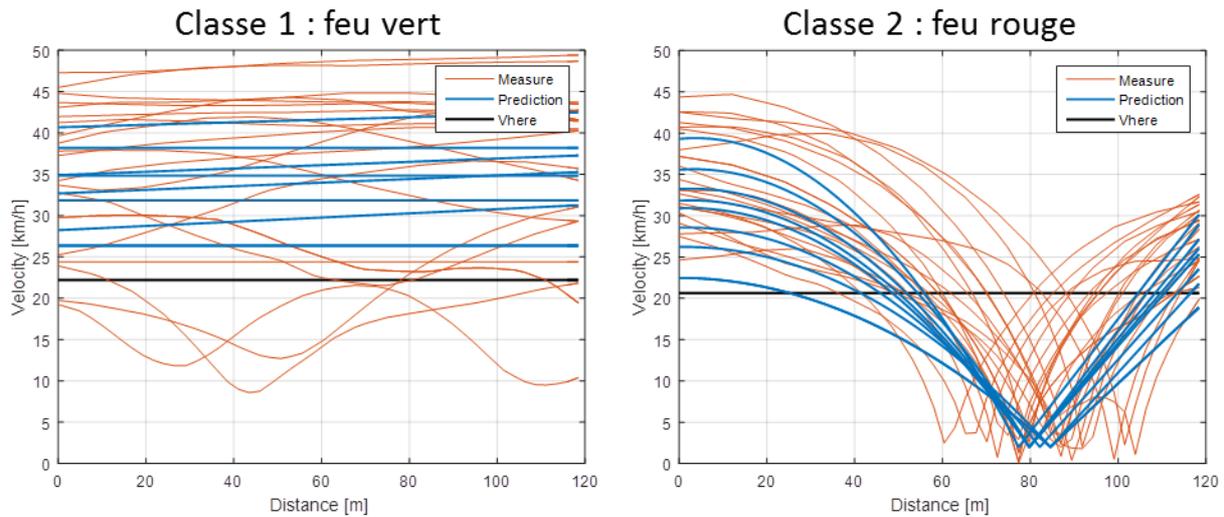


Figure 22 Exemple de prédiction des profils de vitesse sur un segment avec un feu tricolore en aval

Les profils de vitesse en rouge ont été enregistrés avec l'application *Geco air* et sont montrés ici à titre comparatif pour une évaluation qualitative de la prédiction. Ces profils mesurés n'ont pas été utilisés dans la phase d'apprentissage du modèle de prédiction décrit en Section 2.1. Les profils prédits en bleu répliquent assez bien les comportements de conduite réels pour chacune des classes définies dans le modèle de prédiction. La vitesse moyenne du trafic fournie sur le segment par le SIG HERE Maps est montrée en noir dans la figure. Elle est calculée comme la moyenne des vitesses moyennes données par le SIG aux différentes heures de passage des profils mesurés.

Il est clair que les profils prédits préservent des caractéristiques dynamiques d'accélération et variabilité propres aux comportements en usage réel. D'un point de vue quantitatif, l'erreur à la vitesse moyenne de la prédiction par rapport à la mesure est de 3 % pour la classe 1 et 11 % pour la classe 2. L'erreur à la vitesse initiale sur le segment est de 5 % pour la classe 1 et 6 % pour la classe 2. L'erreur à la vitesse finale sur le segment est de 2 % pour la classe 1 et 8 % pour la classe 2.

Un second exemple de prédiction des profils de vitesse sur un segment de route avec une intersection en aval où l'on a la priorité (donc pas d'arrêt) est montré en Figure 23. D'un point de vue qualitatif, les profils prédits reproduisent assez bien les comportements réels, même sans avoir appris sur les profils rouges montrés dans la figure. En revanche, la vitesse moyenne du trafic donnée par le SIG sous-estime largement la vraie moyenne. D'un point de vue quantitatif, l'erreur à la vitesse moyenne de la prédiction par rapport à la mesure est de 3 % pour la classe 1, 4 % pour la classe 2 et 9 % pour la classe 3. L'erreur à la vitesse initiale sur le segment est de 7 % pour la classe 1, 4 % pour la classe 2, et 7 % pour la classe 3. L'erreur à la vitesse finale sur le segment est de 4 % pour la classe 1, 1 % pour la classe 2 et 3 % pour la classe 3.

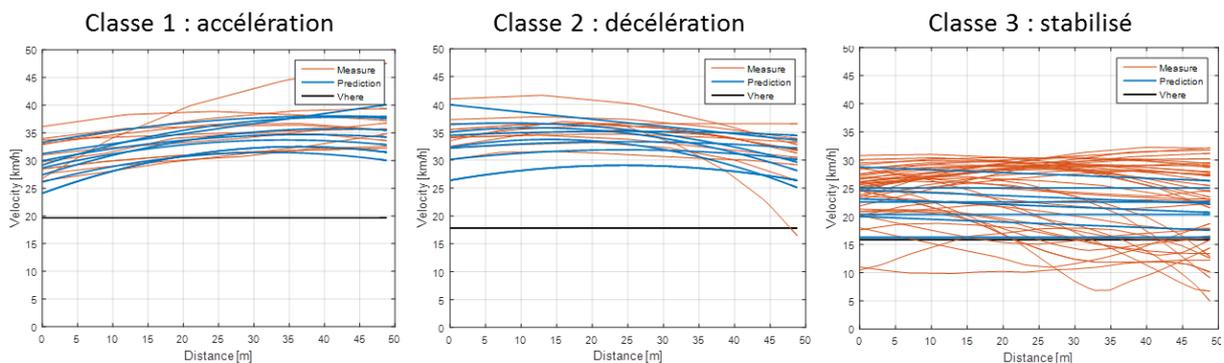


Figure 23 Exemple de prédiction des profils de vitesse sur un segment de route prioritaire à une intersection

Comme illustré dans les exemples précédents, la méthode déterministe arrive à bien reproduire les comportements réels dans les cas sans arrêts. Toutefois, dans les cas avec arrêt (congestion, présence de signalisation...), les profils de vitesse déterministes constituent une simplification des profils mesurés.

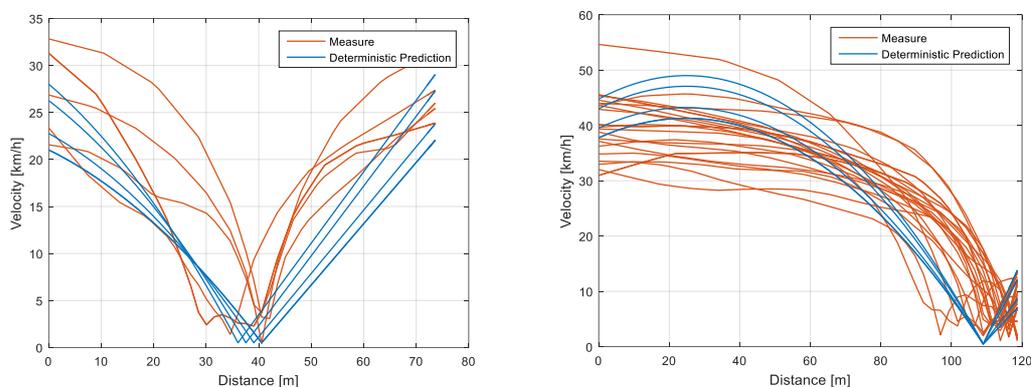


Figure 24 Exemples de prédiction des profils de vitesse avec l'approche déterministe sur des segments de route avec arrêt

Les profils en bleu construits avec l'approche déterministe n'arrivent pas à reproduire les mêmes variations et niveaux d'accélération que les profils de vitesse mesurés en rouge. Cela est dû aux fonctions polynomiales plutôt lisses. A titre comparatif, dans ces mêmes cas d'études, les profils sont aussi construits avec l'approche stochastique.

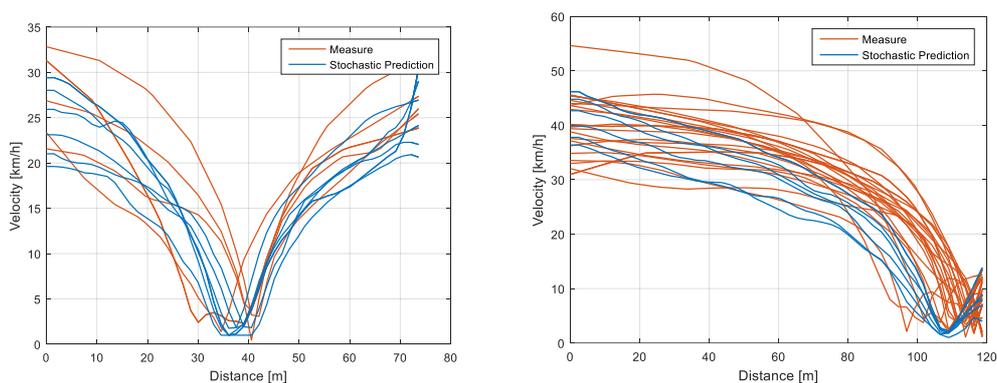


Figure 25 Exemples de prédiction des profils de vitesse avec l'approche stochastique sur des segments de route avec arrêt

Les profils de vitesse en bleu construits avec l'approche stochastique arrivent à bien reproduire la complexité et la variabilité des profils de vitesse mesurés en rouge. Sur ces exemples, l'erreur moyenne absolue entre les profils construits et les profils mesurés est réduite de 35% par rapport à l'approche déterministe. Pour mieux évaluer l'apport de l'approche stochastique, la comparaison est effectuée sur plusieurs segments de route, avec présence d'arrêts. Sur chaque cas avec arrêt, les vrais paramètres de profils de vitesse (vitesse initiale, finale, et point d'arrêt) sont considérés comme entrée des méthodes de construction des profils de vitesse. Cela permet de comparer les deux méthodes en s'affranchissant des erreurs liées à l'estimation des paramètres de vitesse.

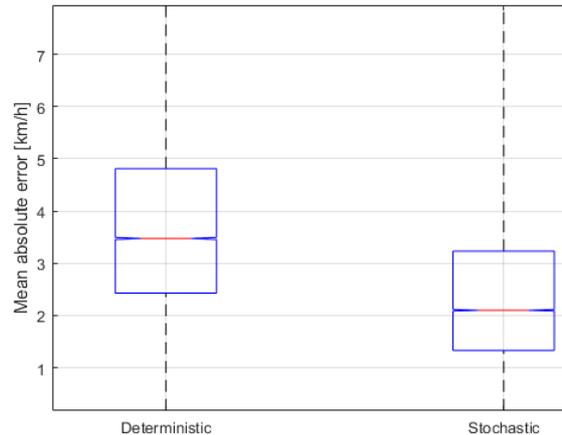


Figure 26 Comparaison entre les erreurs des deux méthodes de construction de profils de vitesse dans des cas avec arrêts

La Figure 26 résume la distribution des erreurs moyennes absolues entre les profils mesurés et les profils construits par chaque méthode. La médiane de l'erreur est respectivement de l'ordre de 2.1 km/h et 3.6 km/h pour les approches stochastiques et déterministes. Cela constitue donc une réduction de l'erreur de l'ordre de 40% avec l'approche stochastique. La distribution de l'erreur est aussi plus centrée autour de la médiane avec l'approche stochastique avec une réduction de 35% du 75% centile. Cela veut dire que dans des cas avec arrêts, l'approche stochastique apporte une meilleure précision et une meilleure représentativité des profils de vitesse. C'est aussi le cas des longs segments (longueur supérieure à 200 mètres) où les fonctions polynomiales n'arrivent pas à reproduire les différentes variations et comportements de conduite au milieu du segment routier. Dans ces cas, l'approche stochastique sera utilisée pour construire les profils de vitesse.

3.1.1. Bilan et conclusions

Au vu des résultats obtenus à l'issue de la tâche 1.1, les conclusions suivantes peuvent être résumées :

- Il est possible de prédire de façon réaliste et représentative les profils de vitesses des véhicules sur n'importe quel segment routier, à partir des informations d'un SIG même sans mesures GNSS disponible sur le segment en question
- Pour un même segment de route, plusieurs profils peuvent être générés/prédits afin d'augmenter la représentativité des conditions de conduite réelles et la précision de l'estimation des émissions
- Pour chaque type de véhicule (VP, VUL et PL), des densités de probabilités sont générées afin de construire des profils de vitesse représentatifs à l'échelle d'un brin routier. En moyenne, 10% d'erreur relative sur les profils de vitesse est obtenue sur Euromed avec cette approche stochastique.

3.2. Modélisation microscopique des émissions polluantes à la source et application des modèles développés au quartier Euromed (T1.2, T1.3)

Les émissions polluantes sont calculées en considérant toutes les sources possibles. La Figure 27 illustre la contribution annuelle des émissions NO_x et PM_{10} par catégorie de véhicule. Pour le polluant NO_x , les véhicules particuliers (VP) contribuent à plus de 50% des émissions totales, 22% pour les véhicules utilitaires légers (VUL) et 19% pour les poids lourds (PL). Pour le polluant PM_{10} , les VP, VUL et PL représentent respectivement 67%, 18% et 11% des émissions annuelles.

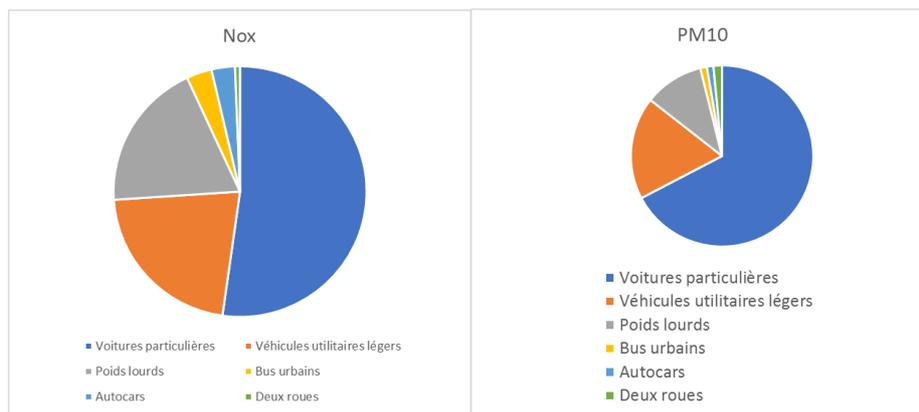


Figure 27 Contribution annuelle des émissions NO_x et PM₁₀ par catégorie de véhicule

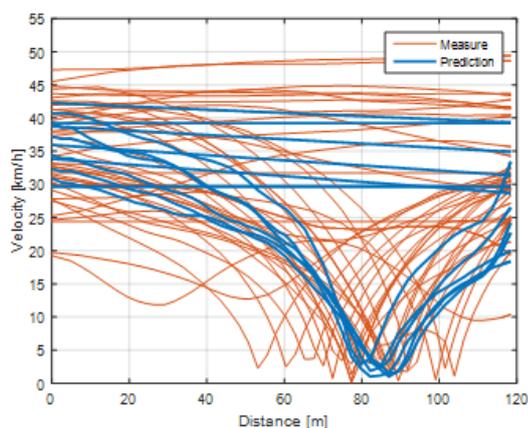
Pour le NO_x et le PM₁₀, les VP, VUL et PL représentent plus de 93% de la somme annuelle. Ainsi, les émissions polluantes seront calculées avec l'approche microscopique pour ces trois catégories de véhicules. La part restante est modélisée par l'état de l'art Atmosud (COPERT).

3.2.1. Calcul des émissions pour les véhicules particuliers (VP)

Comme mentionné dans la section 3.1, la validation de la représentativité et de la précision des profils prédits en termes d'émissions polluantes par rapport à la « référence » et « COPERT » est conduite dans les tâches 1.2 et 1.3. Dans cette section 3 consacrée aux résultats, ces deux tâches ont été unies car le modèle microscopique d'émissions a été utilisé directement sur le réseau routier du terrain d'expérimentation du projet AIRMES.

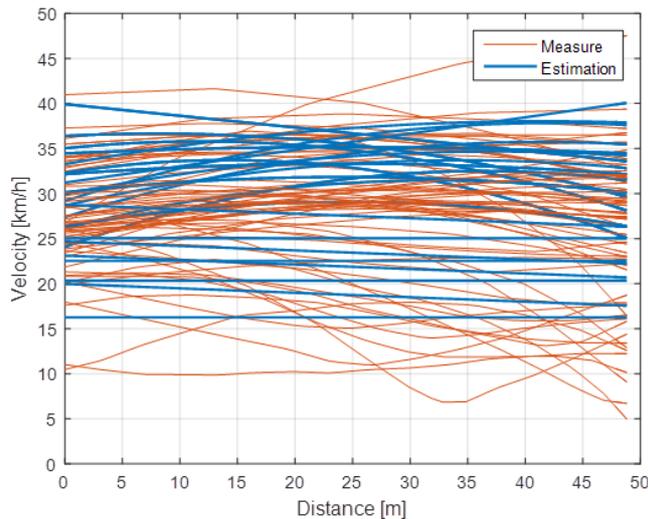
a) Emissions de NO_x

Afin de conserver une symétrie avec les résultats de prédiction des profils de vitesse montrés dans la Section 3.1, les résultats en termes d'émissions de NO_x sont montrés ici pour les mêmes profils de vitesses et les mêmes segments. Dans les cas avec arrêts, les profils de vitesse sont construits avec l'approche stochastique. Les émissions de NO_x associées aux profils prédits (en bleu), où l'on agrégé toutes les classes, sont comparées aux émissions COPERT de l'inventaire fournie par AtmoSud par rapport à la référence (comme défini en Section 2.3). Les outils AIRMES (modèle de prédiction des profils de vitesse et le modèle microscopique de calcul des émissions) permettent de faire une erreur de l'ordre de 2 % par rapport à la référence, tandis que COPERT fait une erreur de 23 %.



Emissions de NO _x	Erreur [mg/km]	Erreur relative
Modèle vs Référence	9	2%
COPERT vs Référence	126	23%

Figure 28 Comparaison de l'estimation des émissions de NO_x sur un segment avec un feu tricolore en aval par rapport à la référence et à l'état de l'art COPERT



Emissions de NOx	Erreur [mg/km]	Erreur relative
Modèle vs Référence	13	2%
COPERT vs Référence	299	56%

Figure 29 Comparaison de l'estimation des émissions de NO_x sur un segment de route prioritaire à une intersection par rapport à la référence et à l'état de l'art COPERT

De façon analogue, les profils prédits dans chacune des classes de Figure 23 ont été agrégés, comme montré en Figure 29, ensuite les émissions de NO_x associées aux profils prédits (en bleu) sont comparées aux émissions COPERT de l'inventaire fournie par AtmoSud par rapport à la référence (comme défini en Section 2.3). Les outils AIRMES (modèle de prédiction des profils de vitesse et le modèle microscopique de calcul des émissions) permettent de faire une erreur de l'ordre de 2 % par rapport à la référence, tandis que COPERT fait une erreur de 56 %.

Afin d'estimer correctement les émissions sur un segment de route, il faut évidemment faire une hypothèse sur la contribution de chacune des classes de profils prédits (classes montrées en Figure 22 et Figure 23). La contribution est dictée par la probabilité statistique que le comportement de conduite décrit par la classe s'avère. Cette probabilité est également apprise dans le modèle de prédiction à partir des observations faites sur la base de données *Geco air*. La formule générale pour le calcul des émissions de NO_x, par exemple, pour chaque segment est comme suit :

$$NOx = \sum_{i=1}^{\#class} p_i * mean(NOx(class_i)), \quad \sum_{i=1}^{\#class} p_i = 1$$

Une formule analogue est utilisée également pour les autres polluants.

La comparaison peut être faite également à une échelle plus globale sur le quartier, sans se restreindre à des cas isolés et particuliers. Pour ce faire et se comparer toujours à la référence, les segments de route avec un nombre significatif de profils de vitesse mesurés (>30) ont été considérés et leurs niveaux d'émissions sont illustrés sur une carte en Figure 30.

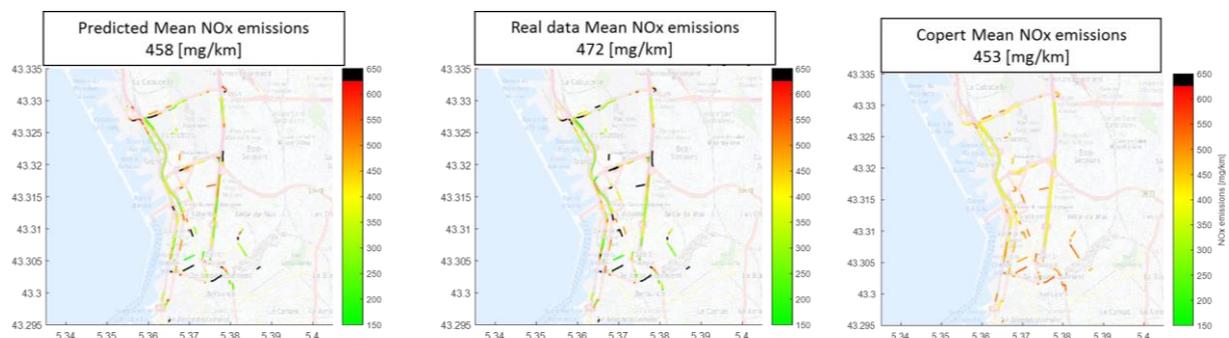


Figure 30 Carte des émissions de NO_x sur le quartier Euromed et comparaison de l'estimation par rapport à la référence et à l'état de l'art COPERT. Seuls les segments de route avec suffisamment de données mesurées sont affichés.

D'un point de vue qualitatif, il est possible de constater que les modèles AIRMES reproduisent bien la vraie variabilité des émissions de NO_x, tandis que COPERT a tendance à rester près de la moyenne globale en empêchant de faire ressortir clairement les zones critiques en termes d'émissions. Par ailleurs, une étude de sensibilité a été menée afin d'évaluer l'importance de générer/prédire plusieurs profils par classe au lieu de générer un seul profil moyen. Intuitivement le fait de générer plusieurs profils permet de retrouver la distribution de probabilité sous-jacente et correspondante aux conditions de conduite réelles. En effet, cela a été démontré aussi par l'analyse de sensibilité qui affiche une erreur moyenne absolue sur les émissions de NO_x de l'ensemble des segments de route de 142 mg/km pour la génération d'un seul profil, contre une erreur moyenne absolue de 98 mg/km pour la génération de profils multiples. Pour comparaison, les profils moyens de la méthode COPERT montre une erreur moyenne absolue de 231 mg/km.

La comparaison entre les outils AIRMES et l'état de l'art COPERT peut être étendue à l'ensemble des segments de route du terrain d'expérimentation pour une heure donnée, donc même sur les segments où les données *Geco air* ne sont pas disponibles. Cela permet de montrer encore plus clairement le gain en termes de précision et résolution spatiale apporté par les outils AIRMES (Figure 31).

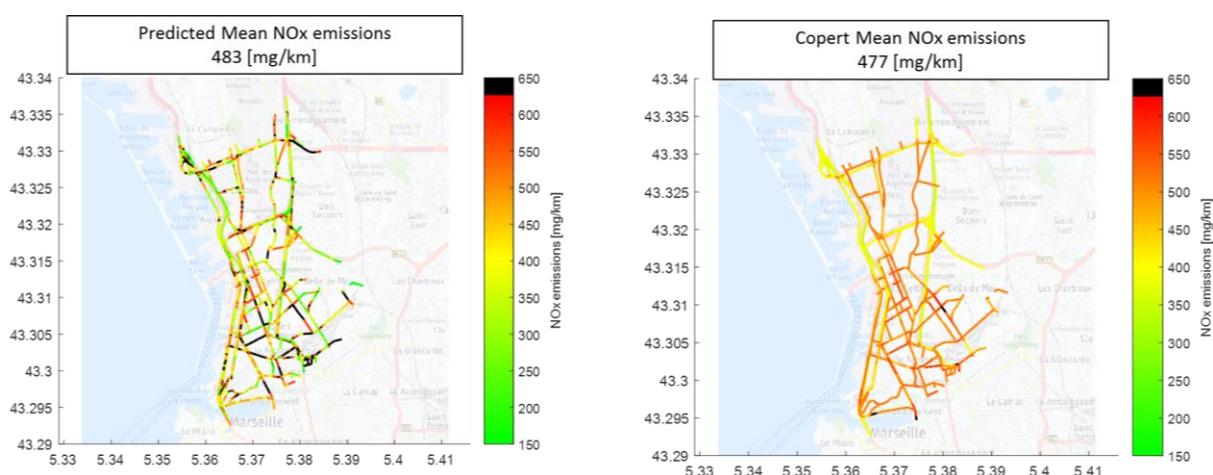


Figure 31 Carte des émissions de NO_x sur le quartier Euromed et comparaison de l'estimation par rapport à l'état de l'art COPERT (04/04/2019 à 17h)

Le modèle microscopique arrive à ressortir globalement une échelle spatiale très fine. Cela est aussi le cas de l'échelle temporelle comme le montre la Figure 32. Cette figure représente la répartition des différences d'émissions NO_x des VP en mg/km entre une heure de pointe et une heure creuse. Le modèle COPERT donne une seule valeur d'émissions quel que soit l'instant de la journée. Cela n'est pas le cas du modèle microscopique où l'on voit une certaine dépendance temporelle. Cette dépendance est due à la prise en compte explicite d'une vitesse trafic dépendante du temps comme entrée du modèle de prédiction des profils de vitesse. Il y a plus de 10% des brins routiers qui ont des différences relatives supérieures à 20% entre une heure de pointe et une heure creuse. La moyenne est autour de 12% de différence.

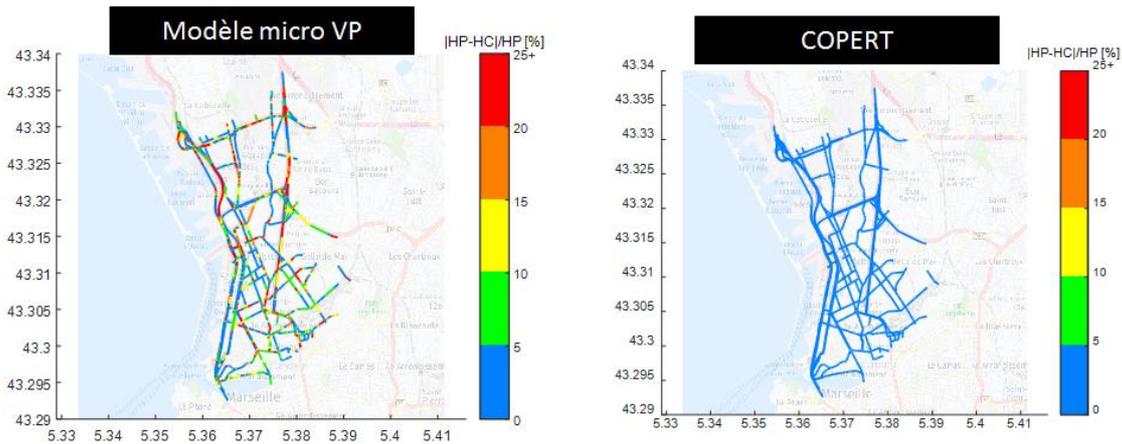


Figure 32 Cartes de différence relative des émissions NO_x entre une heure de pointe (HP) et une heure creuse (HC) sur Euromed pour les VP

b) Emissions de CO₂

Une analyse analogue est effectuée pour les autres polluants considérés dans le projet AIRMES. Pour simplicité, l'analyse pour le CO₂ et les particules ne montrera pas les cas particuliers avec les profils de vitesse mesurés et prédits (comme en Figure 22 et Figure 23), car les résultats et les conclusions sont analogues. Les résultats dans cette section seront montrés uniquement en termes de carte d'émissions.

La comparaison est faite à une échelle globale sur le quartier, sans se restreindre à des cas isolés et particuliers. Pour ce faire et se comparer toujours à la référence, les segments de route avec un nombre significatif de profils de vitesse mesurés (>30) ont été considérés et leurs niveaux d'émissions sont illustrés sur une carte en Figure 33. On constate que la référence, COPERT ainsi que les émissions prédites par le modèle ont quasiment la même moyenne globale des émissions de CO₂. Comme pour les NO_x, la prédiction a aussi tendance à mieux prendre en compte l'impact de la topologie/infrastructure.

La comparaison entre les outils AIRMES et l'état de l'art COPERT peut être étendue à l'ensemble des segments de route du terrain d'expérimentation pour une heure donnée, donc même sur les segments où les données *Geco air* ne sont pas disponibles. Cela permet de montrer encore plus clairement le gain en termes de précision et résolution spatiale apporté par les outils AIRMES (Figure 34).

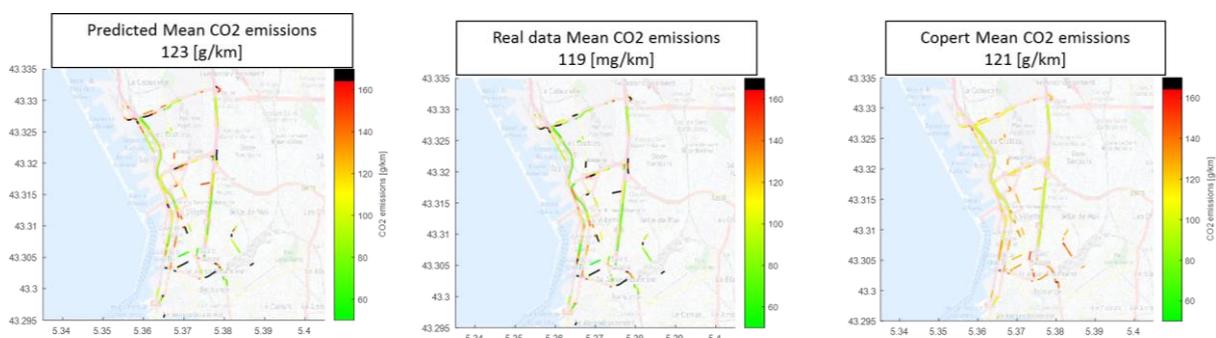


Figure 33 Carte des émissions de CO₂ sur le quartier Euromed et comparaison de l'estimation par rapport à la référence et à l'état de l'art COPERT. Seuls les segments de route avec suffisamment de données mesurées sont affichés.

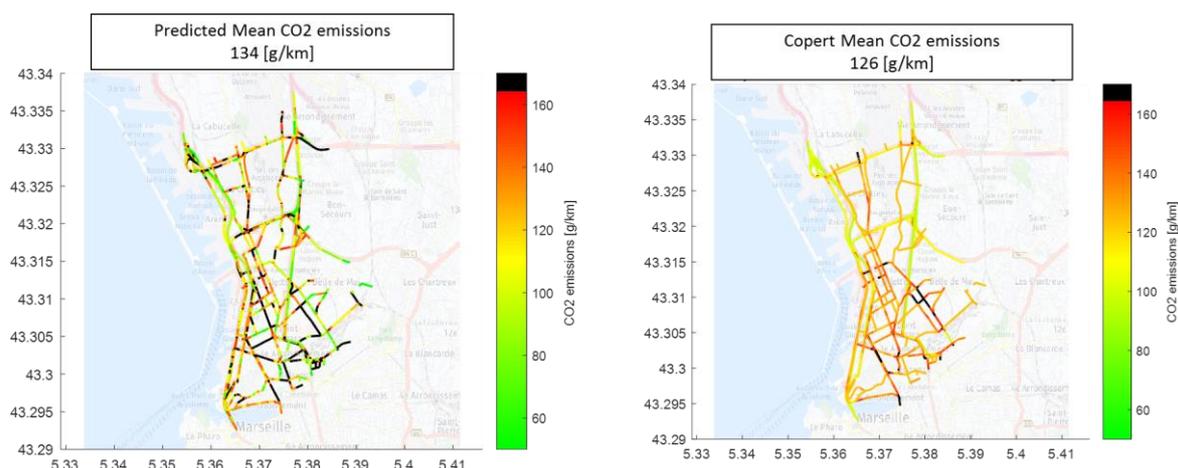


Figure 34 Carte des émissions de CO₂ sur le quartier Euromed et comparaison de l'estimation par rapport à l'état de l'art COPERT (04/04/2019 à 17h)

c) Emissions de particules

En ce qui concerne les émissions de particules, il faut distinguer entre PM à l'échappement et PM hors-échappement (dues à l'usure des plaquettes des freins et des pneus). Les modèles microscopiques d'émissions utilisés dans le projet AIRMES sont capables d'estimer les deux. Par contre, à partir de la norme EURO5 pour les Diesel, donc après l'introduction de filtres à particules très efficaces, les émissions de particules à l'échappement sont fortement réduites et montrent des comportements très « filtrés », peu impactés par les accélérations et l'aménagement de l'infrastructure routière, semblables aux estimations faites par l'état de l'art COPERT. Ce n'est pas le cas pour les particules hors-échappement, qui, quant à elles, restent très dépendantes du style de conduite. C'est pour cette raison que, dans la suite de cette section, nous avons jugé plus intéressant montrer les résultats de comparaison en terme de particules hors-échappement.

La comparaison pour les émissions de particules est faite à une échelle globale sur le quartier, sans se restreindre à des cas isolés et particuliers. Pour ce faire et se comparer toujours à la référence, les segments de route avec un nombre significatif de profils de vitesse mesurés (>30) ont été considérés et leurs niveaux d'émissions sont illustrés sur une carte en Figure 35.

La comparaison entre les outils AIRMES et l'état de l'art COPERT peut être étendue à l'ensemble des segments de route du terrain d'expérimentation pour une heure donnée, donc même sur les segments où les données *Geco air* ne sont pas disponibles. Cela permet de montrer encore plus clairement le gain en termes de précision et résolution spatiale apporté par les outils AIRMES (Figure 36).

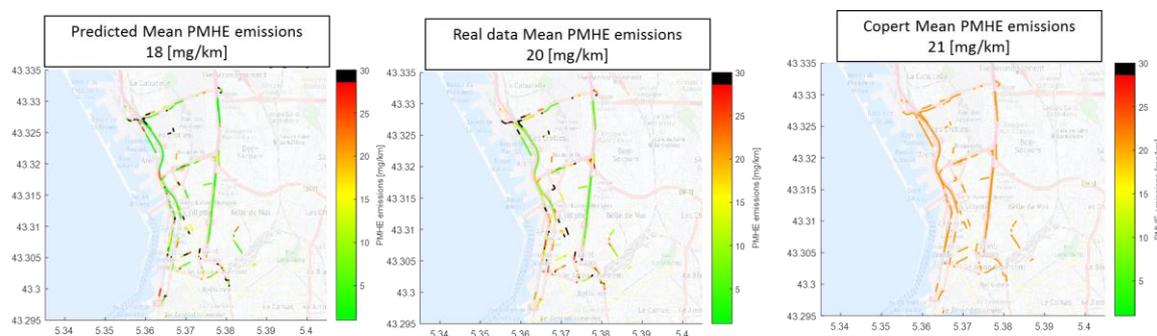


Figure 35 Carte des émissions de PM hors-échappement sur le quartier Euromed et comparaison de l'estimation par rapport à la référence et à l'état de l'art COPERT. Seuls les segments de route avec suffisamment de données mesurées sont affichés.

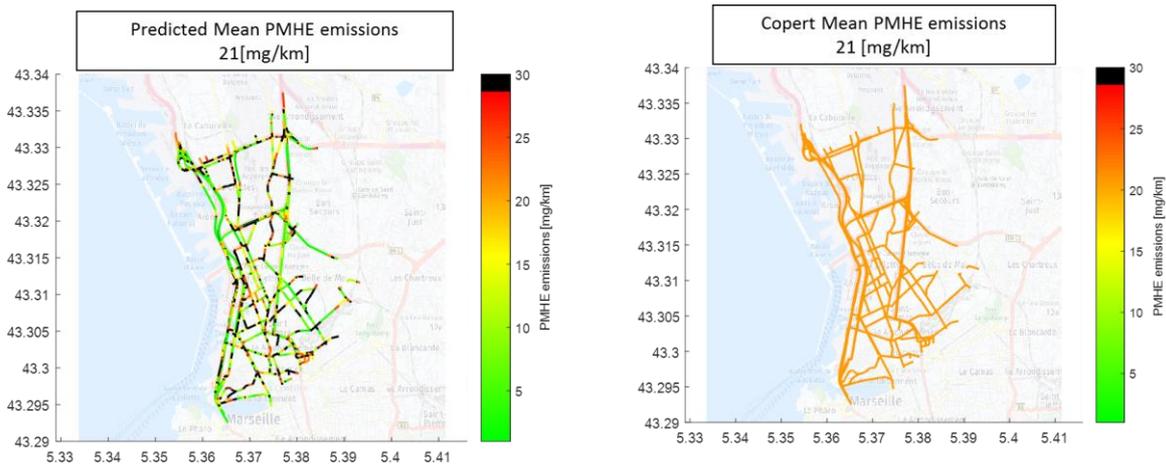
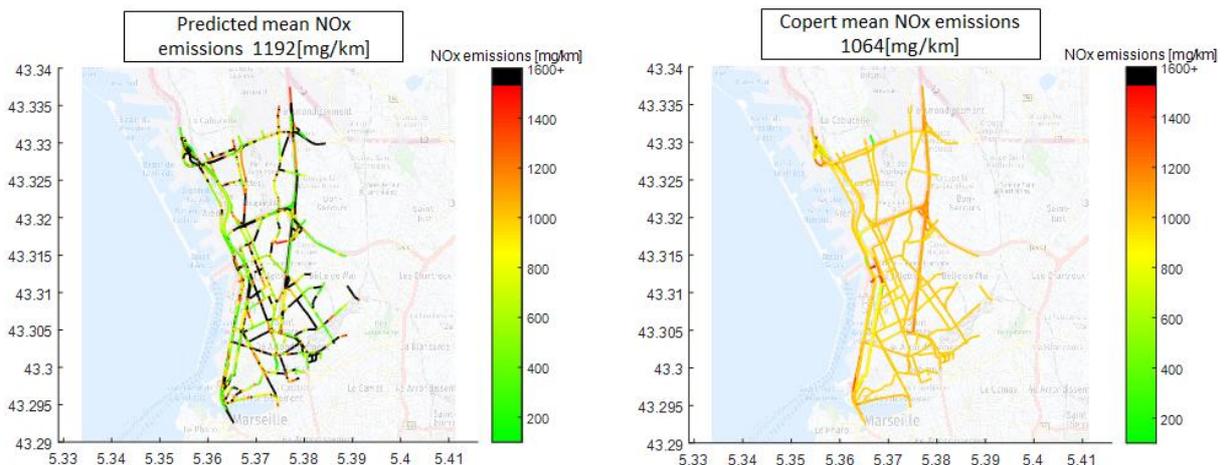


Figure 36 Carte des émissions de PM hors-échappement sur le quartier Euromed et comparaison de l'estimation par rapport à l'état de l'art COPERT (04/04/2019 à 17h)

3.2.2. Calcul des émissions pour les véhicules utilitaires légers (VUL)

Pour les VUL, la même procédure de validation et de calcul des émissions que pour les VP est suivie. Seul le parc roulant change. Un parc national CITEPA 2017 représentatif des VUL a été utilisé (voir paragraphe 2.3.1).

Les figures ci-dessous montrent un comparatif des cartographies d'émissions NO_x, CO₂ et PM entre le modèle microscopique et l'état de l'art COPERT sur Euromed.



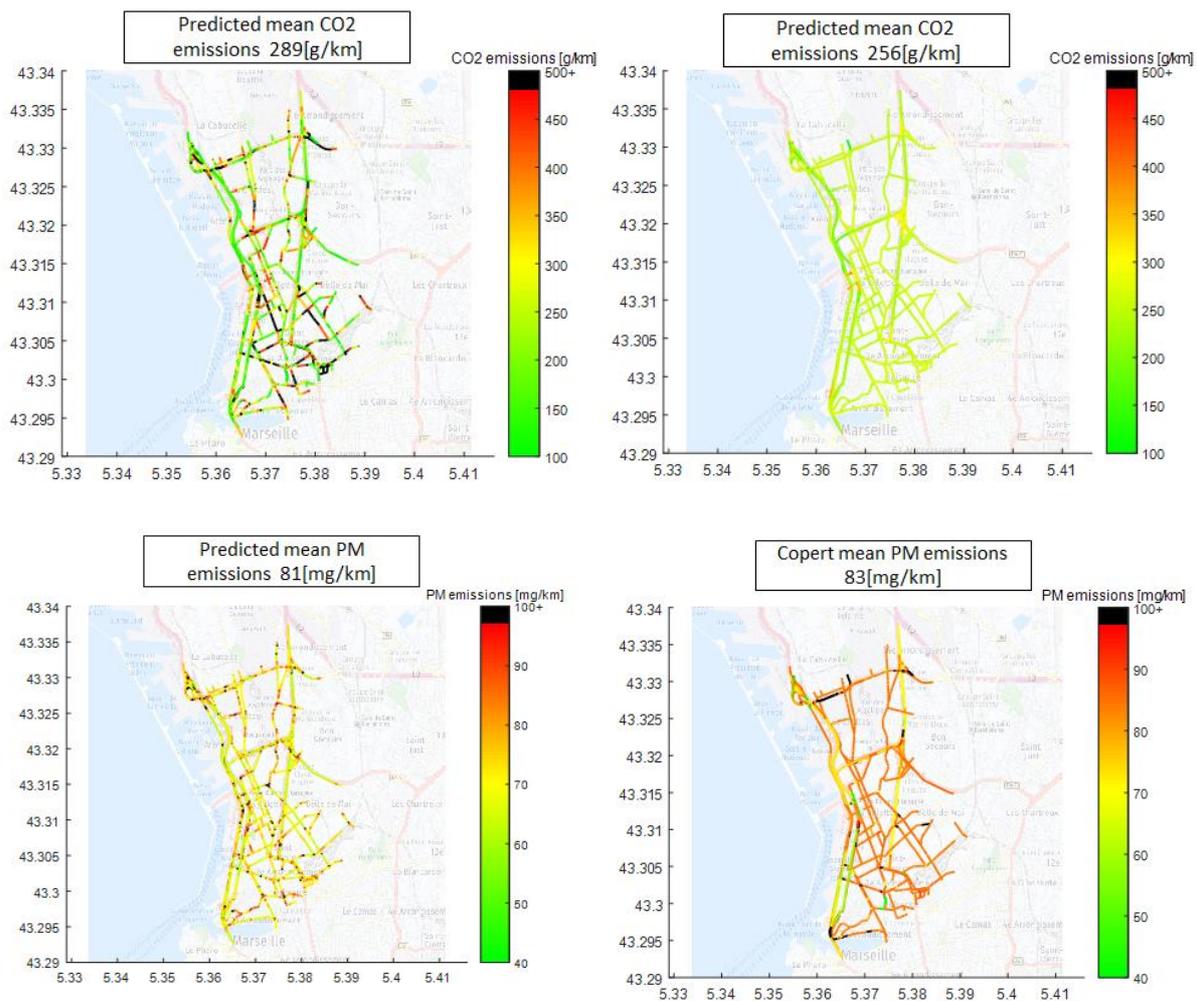


Figure 37 Cartes des émissions de NO_x, CO₂ et PM des VUL sur le quartier Euromed et comparaison de l'estimation par rapport à l'état de l'art COPERT

L'approche microscopique (Predicted) permet d'obtenir des cartographies d'émissions fines à l'échelle spatiale. Il y a une grande sensibilité à la pente et aux accélérations des émissions NO_x PM et CO₂. Cette sensibilité n'est captée avec l'approche macroscopique COPERT. Au niveau du NO_x et CO₂, COPERT estime des valeurs d'émissions très proches de la moyenne avec une très faible variabilité. Même s'il y a beaucoup plus de variabilité pour l'approche microscopique, pour chaque polluant, les moyennes des émissions sont proches entre les deux méthodes. Cette variabilité est due à la prise en compte à échelle fine des effets d'infrastructures et de topologie.

3.2.3. Calcul des émissions pour les poids lourds (PL)

Pour les PL, la même procédure de calcul des émissions des VP est suivie. Des changements mineurs ont été introduits aux différentes briques de l'approche microscopique :

Parc roulant : Le parc national CITEPA 2017 associé aux poids lourds a été utilisé. Le parc contient la répartition des poids lourds en fonction de la norme, la technologie de dépollution (SCR, EGR) et du poids (voir paragraphe 2.3.1).

Modèle d'émission microscopique : Le modèle d'émission contient les mêmes sous-modèles que pour les VP (modèle du véhicule, modèle de transmissions, modèle du moteur et modèle de post-traitement). Toutefois, chaque sous-modèle a été calibré et validé à partir de mesures en roulage sur route ou piste au moyen d'un procédé de type PEMS. Cela permet d'obtenir un modèle d'émission adapté aux poids lourds.

Modèle de prédiction des profils de vitesse : La génération des profils de vitesse suit le même schéma présenté en Figure 2, ce qui change c'est la partie speed profile génération. Pour les PL, on utilise des densités de probabilités apprises à partir de trajets réels effectués par des poids lourds.

Il n'y a pas de profils de vitesse réel mesuré pour les poids lourds sur Euromed. La validation des émissions poids lourds a été donc effectuée à partir de zooms comparatifs entre les approches microscopiques et macroscopiques (COPERT). Ces zooms permettent d'évaluer qualitativement si les deux approches arrivent à capter les effets d'accélération et de pentes. La figure ci-dessous montre un exemple de zoom comparatif entre les deux approches.

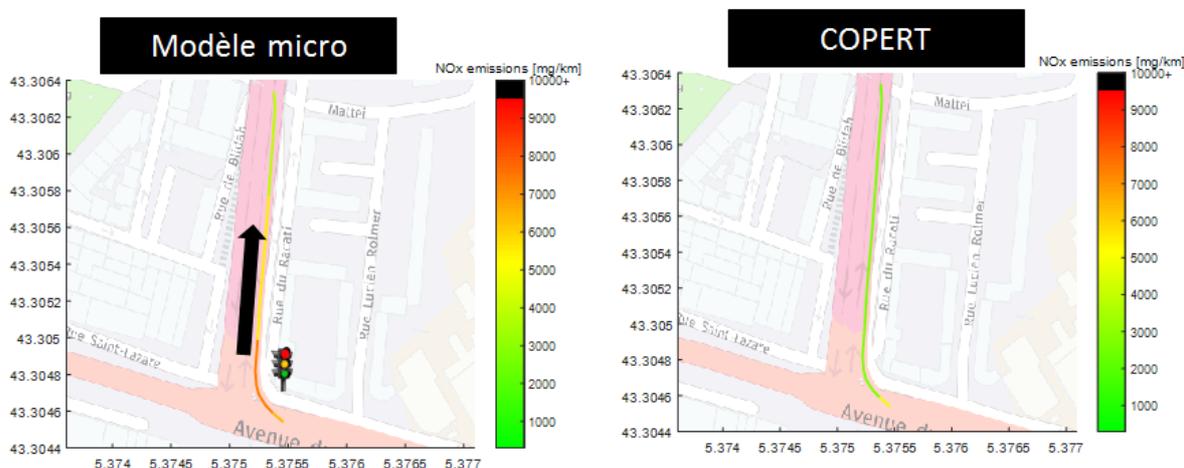


Figure 38 Zoom sur les émissions NO_x des PLs sur le quartier Euromed et comparaison de l'estimation par rapport à l'état de l'art COPERT

La Figure 38 montre un cas d'étude en entrée d'autoroute. Le modèle microscopique arrive à capter les effets d'accélération après le feu de circulation et en engagement sur autoroute. Cela est ressorti par une couleur rouge juste après le feu de circulation soit une valeur d'émission de l'ordre de 8500mg/km. Après accélération, la vitesse est ensuite stabilisée avec une valeur d'émission moyenne de l'ordre de 3000mg/km. Toutefois, le modèle COPERT ne donne qu'une seule valeur d'émissions de l'ordre de 3000mg/km. Il n'arrive pas à ressortir les effets d'accélération après le feu de circulation. Les figures ci-dessous montrent un comparatif des cartographies d'émissions NO_x, CO₂ et PM entre le modèle microscopique et l'état de l'art COPERT en appliquant les deux approches sur le quartier d'Euromed.

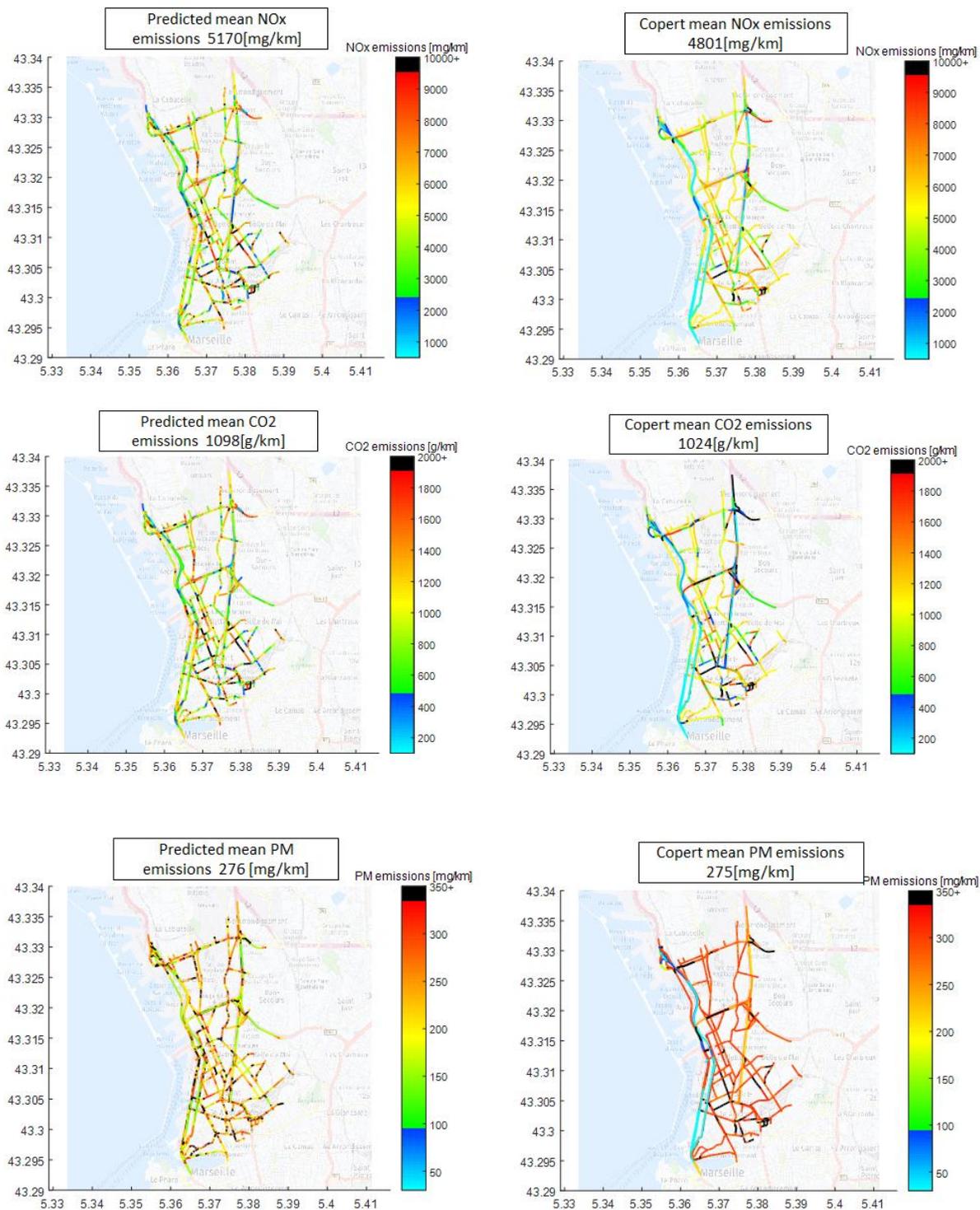


Figure 39 Cartes des émissions de NO_x, CO₂ et PM des PL sur le quartier Euromed et comparaison de l'estimation par rapport à l'état de l'art COPERT (04/04/2019 à 17h)

Comme pour les VUL, l'approche microscopique (Predicted) permet d'obtenir des cartographies d'émissions fines à l'échelle spatiale. Cela est dû à une grande sensibilité à la pente et aux accélérations des émissions NO_x et CO₂. Le modèle COPERT associé aux PL prend en compte l'effet de pente dans le calcul des émissions. Cela permet de ressortir plus de variabilité (par rapport aux VP/VUL) des émissions PL calculés par COPERT.

En plus de cette sensibilité à la pente, le modèle microscopique considère l'effet des accélérations pour une résolution spatiale plus grande. La décomposition des brins routier et le calcul de la pente est aussi plus fine. Comme pour les autres catégories de véhicules, les deux approches donnent en

moyenne les mêmes valeurs d'émissions pour chaque polluant. COPERT est assez représentatif à l'échelle d'un quartier.

3.2.4. Comparaison global entre les approches microscopiques et macroscopiques

Les émissions sont calculées pour chaque catégorie de véhicule (VP, VUL, PL, 2roues...). Ensuite, à un instant donné, chaque émission est multipliée par le débit (dépendant du temps) associé à la catégorie de véhicule considérée. Le débit est calculé en multipliant le TMJA (paragraphe 2.3.1) avec des coefficients horaires. Ces données sont fournies par Atmosud.

En sommant toutes les sources d'émissions calculées avec les deux approches, la carte de différence globale est ressortie.

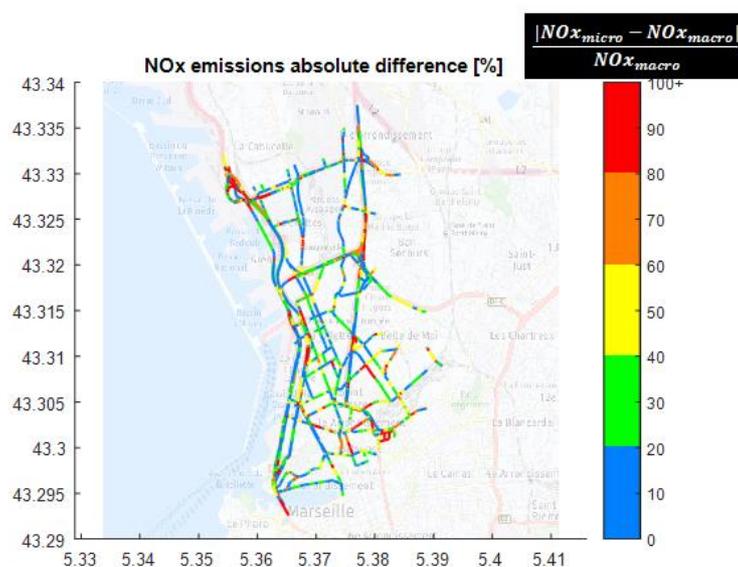


Figure 40 Cartes de différence relative des émissions de NO_x entre les approches micro et macro sur Euromed en considérant toutes les sources d'émissions

La Figure 40 illustre la carte de différence relative en NO_x entre les approches microscopiques et macroscopiques (COPERT). Deux valeurs d'émissions microscopiques et macroscopiques proches sont ressorties par une couleur bleu. Une couleur rouge veut dire que sur le brin considéré, il y a plus de 80% de différence entre les deux approches. En moyenne, il y a 40% de différence entre COPERT et le modèle microscopique, avec 7% de brins qui ont plus de 80% de différence. La sensibilité à ces différences sur la qualité de l'air sera présentée par la suite avec le modèle de dispersion. Des zooms en dispersion sont étudiés sur ces cas de fortes différences pour mieux évaluer l'apport du modèle microscopique.

3.2.5. Format échange sources d'émissions pour modèles de dispersion

Afin de faciliter l'échange de données entre les différentes tâches du projet et, notamment, préparer les sources linéiques d'émissions en entrée des modèles de dispersion utilisées dans la tâche 2, les partenaires ont collaboré et mis au point un format de données compatible avec ces outils.

Un fichier contenant les informations topologiques du quartier Euromed (identifiants, coordonnées lat/long et altitude des brins) est généré de façon « statique » et ponctuelle. Un fichier contenant les sources d'émissions par brin (identifiants, émissions de NO_x, NO₂, CO₂, PM et PM hors-échappement, conditions de trafic, TMJA, date) est généré de façon « dynamique » toutes les 5 minutes sur l'ensemble du réseau.

Un aperçu de ces fichiers est donné en Figure 41 et Figure 42.

BrinAtmo	Id	Latitude	Longitude	Altitude
74904	35738001	43.320780	5.364919	55.025000
		43.320680	5.364980	55.025000
74904	35736	43.320680	5.364980	54.960000
		43.320610	5.365020	54.900000
		43.320360	5.365180	54.750000
332235	17380001	43.303460	5.364786	51.115000

Figure 41 Fichier « statique » de la topologie du quartier Euromed

Id	NOx [µg/km/s]	NO2 [µg/km/s]	Co2 [µg/km/s]	PM10_E [µg/km/s]	PM10_HE [µg/km/s]	V_trafic [km/h]	TMJA	Date début	Date fin
54	8647.22	1815.92	2425843.22	886.12	1972.51	15.00	2513.135262	201904041700	201904041705
55000001	65812.58	13820.64	19196872.52	1672.66	433.17	50.00	6931.348909	201904041700	201904041705
55000002	26779.46	5623.69	8400969.85	1672.66	433.17	50.00	6931.348909	201904041700	201904041705

Figure 42 Fichier « dynamique » des sources d'émissions sur le quartier Euromed

3.2.6. Bilan et conclusions

Au vu des résultats obtenus à l'issue des tâches 1.2 et 1.3, les conclusions suivantes peuvent être résumées :

- L'erreur d'estimation des émissions de NO_x et CO₂ sur le quartier Euromed est réduite de 50 % par rapport à l'état de l'art COPERT pour les VP,
- La résolution spatiale des cartes d'émissions est améliorée permettant de mieux capter l'impact de l'infrastructure et de la régulation du trafic sur les émissions
- Les sources d'émissions seront mises à jour et données en entrée des modèles de dispersion toutes les 5 minutes, donc la résolution temporelle est améliorée aussi par rapport à l'état de l'art

3.3. Modélisation de la dispersion (T2.1)

Le plan de la section est le suivant. Les cartographies de la qualité de l'air obtenues avec les estimations des émissions effectuées lors des tâches 1.1 à 1.3 sont comparées à celles obtenues en faisant usage de la méthodologie macroscopique COPERT.

- La section 3.3.1 présente la cartographie de la qualité de l'air en NO₂ en moyenne jour. La moyenne journalière modélisée sur le domaine avec les différentes méthodes est comparée aux moyennes annuelles observées par les tubes NO₂ disposés sur le domaine d'étude.
- La section 3.3.2 présente le cycle journalier de la modélisation des concentrations en NO_x et PM₁₀ pour la station urbaine de proximité « Place Verneuil ». Les valeurs sont comparées à celles observées à la station de proximité située dans le quartier Euromed et à la station urbaine de fond « 5 avenues ».
- La section 3.3.3 présente la cartographie de la qualité de l'air en NO_x, en identifiant des points d'intérêt en matière d'émissions polluantes et de qualité de l'air.

3.3.1. Evaluation par comparaison avec les tubes NO₂

La figure ci-dessous présente la cartographie de la qualité de l'air en NO₂ pour la journée du 20 juin 2019 et en faisant usage des émissions par le trafic provenant de la méthodologie AIRMES (image de gauche) et COPERT (image de droite). Les 2 cartes font ressortir des concentrations relativement élevées près de certains axes de circulation. Les secteurs avec une qualité de l'air dégradée illustrent les différences entre les 2 méthodes, ce sont les voies rapides, les sorties des tunnels, les axes routiers pentus et les zones de fortes accélérations,

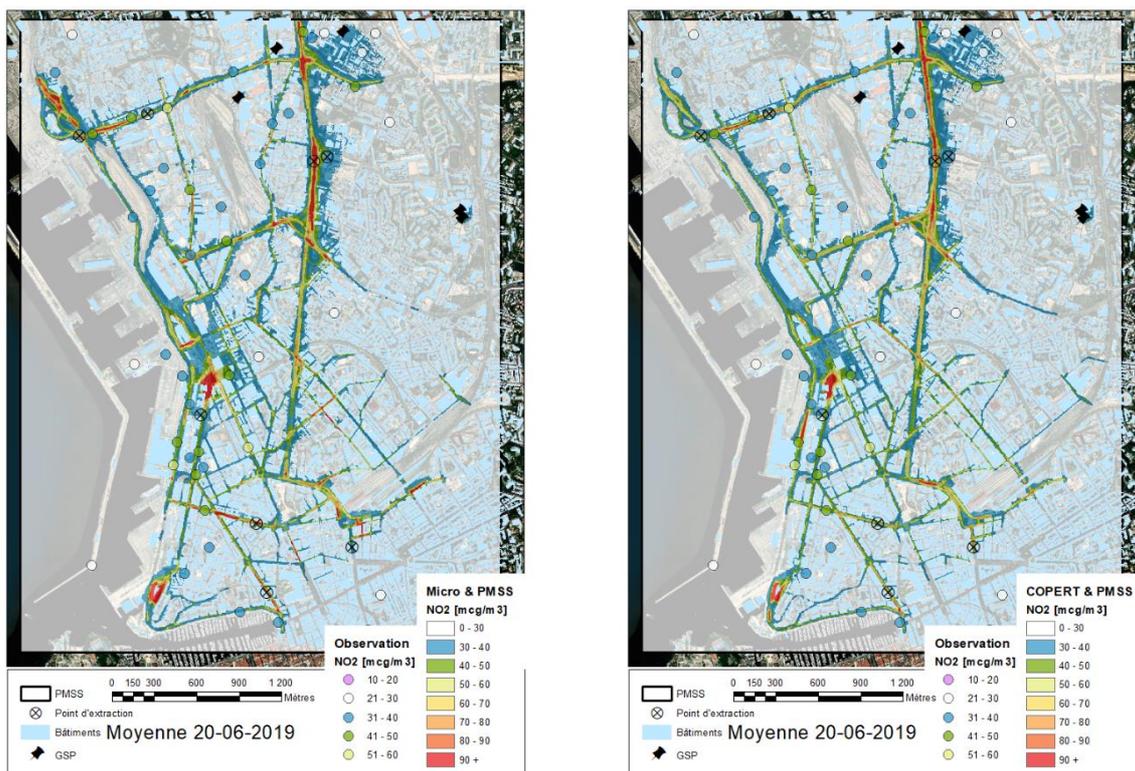


Figure 43 : moyenne journalière en NO₂ calculées avec des émissions AIRMES (à gauche) ou COPERT (à droite)

AtmoSud mène régulièrement des campagnes de mesure, déployant notamment des tubes NO₂ pour estimer la moyenne annuelle de la qualité de l'air à proximité des axes routiers et en situation de fond. Les tubes qui figurent sur le domaine modélisé ont été représentés sur les figures ci-dessus, avec les valeurs observées de concentrations en NO₂.

Seule la journée du 20 juin 2019 a été modélisée dans le cadre de ce projet. La journée est choisie pour sa représentativité par rapport à la moyenne annuelle en concentration de fond pour le NO₂. Une comparaison qualitative des sorties PMSS avec les mesures faites par tube a été réalisée. Elle montre que les ordres de grandeurs des concentrations sont bien respectés. Pour quelques emplacements de tubes NO₂, la plus grande différence s'explique par l'absence de prise en compte dans notre modèle de certains brins routiers ou des émissions liées aux activités portuaires à proximité du secteur.

La figure ci-dessous présente les valeurs observées (moyenne annuelle) et modélisées (moyenne journalière) des concentrations en NO₂. La pente de la droite de régression linéaire, le coefficient de corrélation et la déviation standard indiquent que la méthode AIRMES (en bleu sur l'image) entraîne des concentrations plus proches des mesures que la méthode COPERT (en orange sur l'image). La proportion des valeurs modélisées à +/- 5 µg/m³ (respectivement +/- 1 µg/m³) diffère suivant la méthodologie d'estimation des émissions :

- AIRMES : 71,1% (respectivement 28,9%)
- COPERT : 60,0% (respectivement 26,7%)

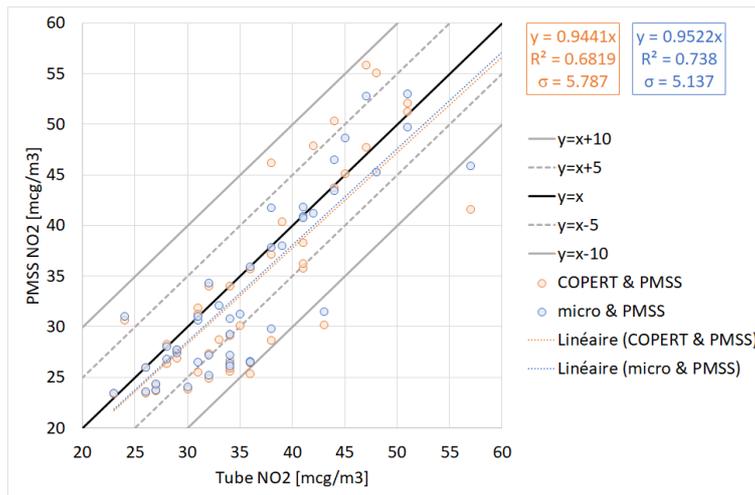


Figure 44 : Comparaison des concentrations NO₂ en moyenne annuelle (en abscisse) avec la moyenne jour modélisée par PMSS (en ordonnée) et des émissions trafic résultant de la méthode AIRMES (points bleus) ou COPERT (points oranges).

La valeur limite des concentrations en NO₂ est de 40 µg/m³ en moyenne annuelle. Comme pour les tubes NO₂, la comparaison ne peut être ici que qualitative. La carte NO₂ provenant de la méthodologie AIRMES montre une augmentation de la zone de dépassement NO₂ pour la journée modélisée, avec une surface passant de 0,864 km² à 0,890 km², soit 3 % de plus.²

3.3.2. Validation par la station urbaine de proximité Euromed

La figure ci-dessous présente des concentrations horaires en NO_x (à gauche) et PM₁₀ (à droite) pour la journée du 20 juin 2019. Les concentrations sont celles observées à la station urbaine de fond « 5 avenues » (en tiret), celles observées à la station urbaine de proximité « Place Verneuil » (en pointillé et tiret) et celles modélisées à la station « Place Verneuil » avec les émissions trafic des méthodologies AIRMES et COPERT. La figure montre des concentrations semblables pour les 2 méthodologies de calcul des émissions.

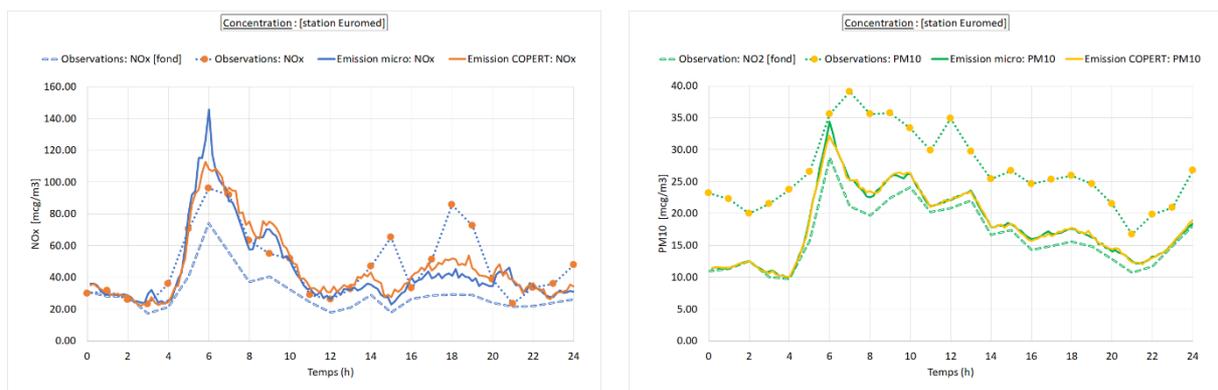


Figure 45 : Concentration en NO_x et PM₁₀ de proximité « Place Verneuil » (observation et modélisation avec émissions AIRMES et COPERT) avec pour rappel les observations à la station de fond « 5 avenues »

Pour les concentrations en NO_x, les maximums modélisés de fin de journée sont plus faibles que l'observation. Cet écart ne provient pas des émissions COPERT ou AIRMES, car les brins à proximité présentent des maximums semblables à ceux du matin, et dont la figure ci-dessous présente les

² N.B. L'emprise au sol des bâtiments n'est pas incluse dans le calcul de cette surface. La prise en compte explicite des bâtiments par le modèle de dispersion implique que les concentrations intérieures sont nulles. Le calcul habituel de l'exposition potentielle de la population réalisée avec la méthode du LCSQA ne pourrait donc s'appliquer ici, une nouvelle méthodologie devra s'appliquer.

émissions pour différentes catégories de véhicules. Une liste non exhaustive de raison potentielle inclus :

- La station « Place Verneuil » se situe sur une place, mais à proximité d'un bâtiment (à moins de 9 mètres). La météorologie provient d'une prévision à 24 heures à fine échelle par le modèle WRF, dont l'interpolation par PSWIFT pourrait présenter localement des écarts aux observations. La Figure 18 présente les 4 plus proches points de grille WRF du domaine modélisé.
- La station « Place Verneuil » se trouve à proximité d'important axes de circulation. Le trafic réel de la journée n'a pas été pris en compte pour le calcul des émissions, ni même la turbulence induite par ce trafic. La valeur TMJA a été utilisée en l'absence de comptage réel pour la journée étudiée.

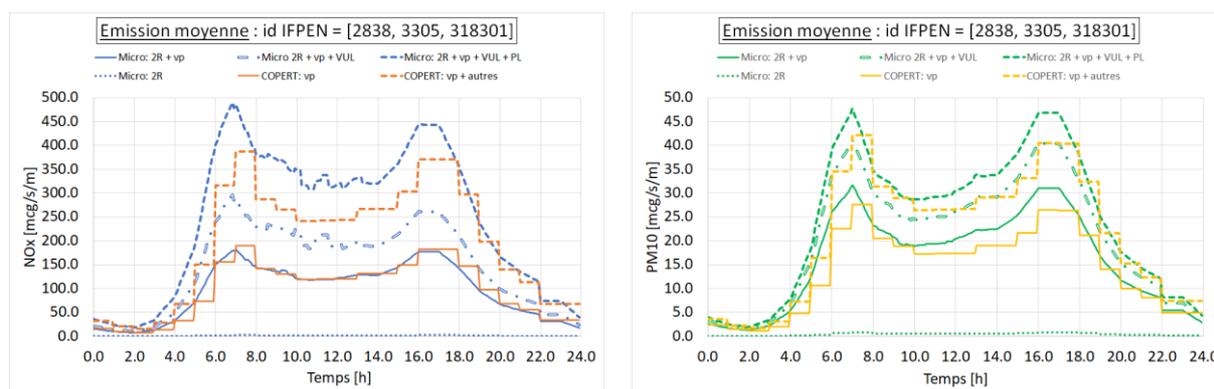


Figure 46 : Emissions NOx et PM10 pour les segments de routes à proximité de la station « Place Verneuil » (modélisation AIRMES et COPERT pour différentes catégories de véhicule)

Les concentrations modélisées en PM₁₀ montrent un écart à la station de proximité Euromed qui semble peu évoluer durant la journée. Cet écart n'a pas pour origine les émissions des segments de routes avoisinants. Il est possible qu'une sous-estimation de la pollution de fond en PM₁₀ à proximité de la station « Place Verneuil » explique cet écart. Le projet AIRMES fait suite à une étude menée par AtmoSud pour identifier la contribution du transport routier aux concentrations de PM₁₀ dans 3 villes et pour la période de 2014 à 2016³. Pour Marseille,

- les émissions maritimes (directe et indirecte) représentent environ 25% des émissions ;
- à comparer avec l'importance des émissions des véhicules qui est estimée à environ 15%.

En prenant la station de fond « 5 avenues », la concentration de fond en PM₁₀ du quartier Euromed est peut-être sous-estimée et ne représente pas les niveaux de fond au voisinage du port.

3.3.3. Cartographie en NO_x

Pour mettre en évidence des points d'intérêt en matière d'émissions polluantes et de qualité de l'air correspondante sur des microenvironnements urbains, différentes configurations de trafic vont être étudiées pour les oxydes d'azote (NO_x). Les sous-sections suivantes détaillent la cartographie de la qualité de l'air en NO_x et avec usage des émissions due au trafic provenant de la méthodologie microscopique AIRMES et macroscopique COPERT.

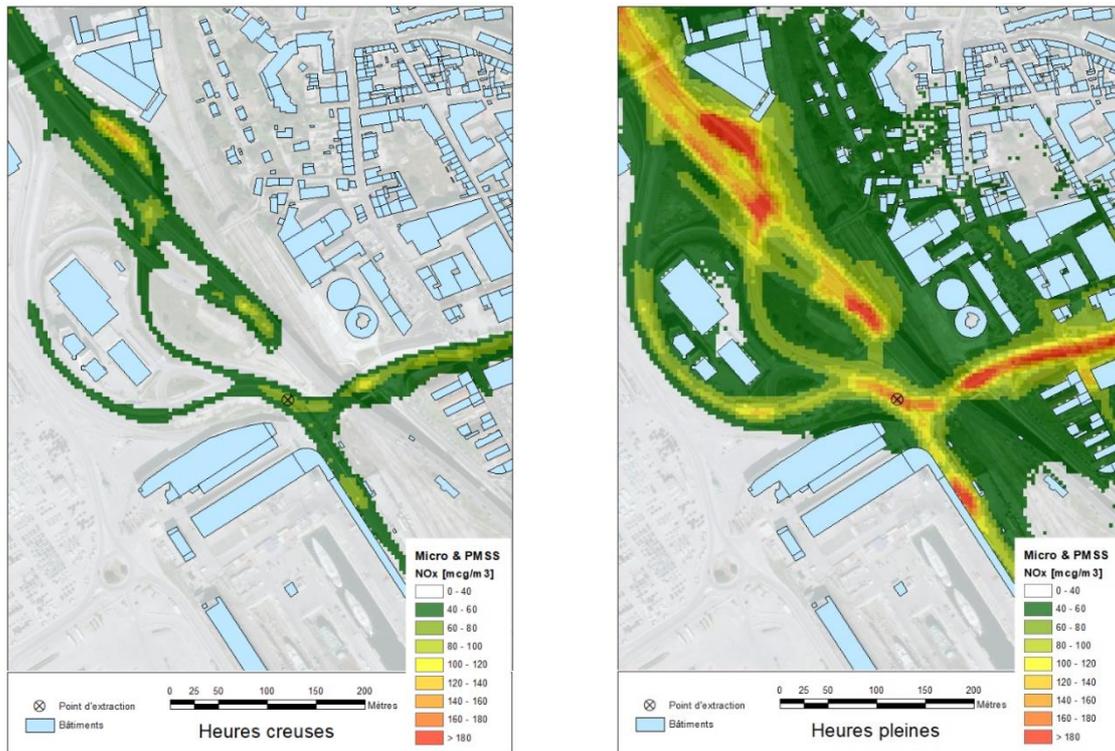
- Des zooms sont faits autour de positions pour lesquelles l'évolution des concentrations en NO_x sur la journée est présentée, accompagnée d'une cartographie rapprochée des concentrations en appliquant une moyenne sur les heures « creuses » et « pleines »⁴.
- Les émissions autour de ces positions sont présentées pour les deux méthodologies d'estimation des émissions et pour différentes catégories de véhicules.

³ https://www.atmosud.org/sites/paca/files/atoms/files/171201_etude_3_villes_2014-2016_rapport.pdf

⁴ En France et en été, un décalage de 2 heures est observé entre TU et GMT. Le créneau « heures pleines » correspond à la période entre 6h et 22h (TU), soit l'intervalle entre 4h et 20h en heure GMT.

Les cartes de la Figure 43 font ressortir des concentrations relativement élevées près de certains axes de circulation du domaine. Les zooms suivants ne listent pas les lieux à fortes concentrations en polluants, ni même les lieux où les concentrations élevées en polluants impactent le plus la population. Les zooms sont choisis pour illustrer des différences entre la méthodologie microscopique AIRMES et macroscopique COPERT d'estimation des émissions : un feu de circulation (section 3.3.1.1), une pente positive dans une zone de forte accélération (section 3.3.1.2), une petite rue dans une zone de fort freinage (section 3.3.1.3).

3.3.1.1. 1^{er} Zoom: feu de circulation



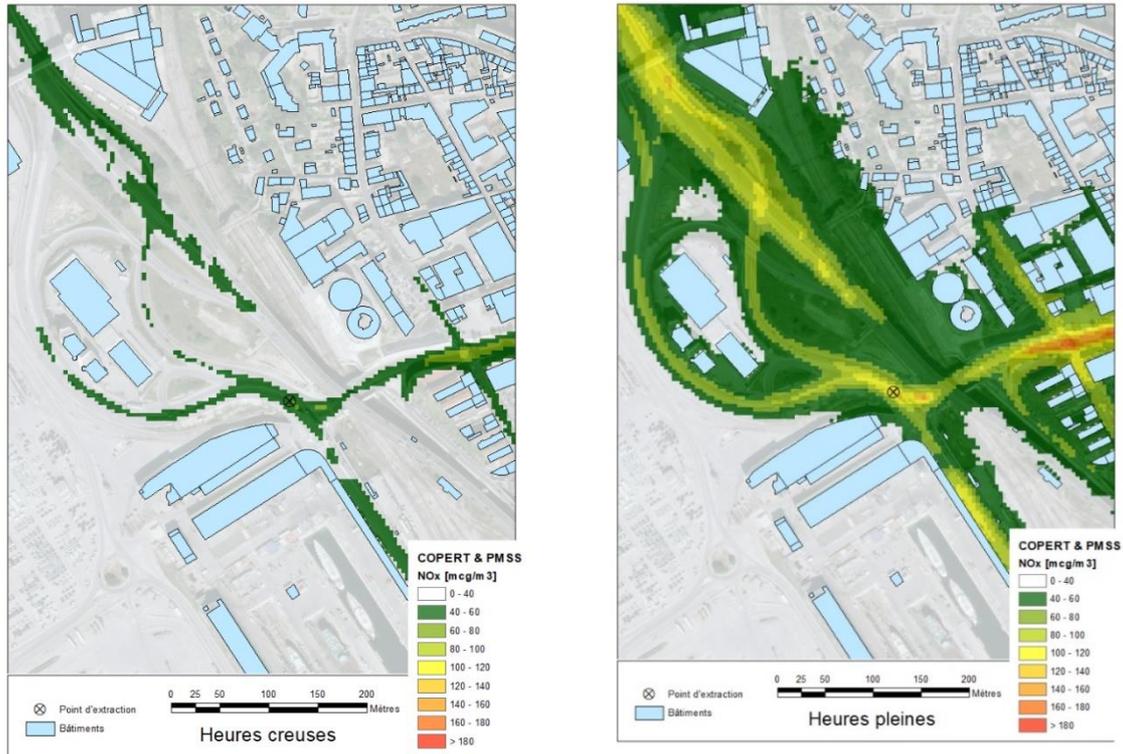


Figure 47 : 1er zoom : moyenne heures creuses (à gauche) et pleines (à droite) en NO_x avec pour des émissions du trafic routier résultant de la méthodologie AIRMES (en haut) ou COPERT (en bas)

La figure ci-dessus présente un premier détail de la cartographie de la qualité de l'air en NO_x, pour les émissions émanant des méthodologies microscopique et macroscopique. Les concentrations sont plus élevées pour les heures pleines, à comparer aux heures creuses, et les différences entre les deux méthodologies (AIRMES / COPERT) également plus importantes en heures pleines qu'en heures creuses. La méthodologie AIRMES entraîne des concentrations plus élevées.

Le point d'extraction est symbolisé par une croix sur les cartes ci-dessus et il se situe au niveau d'un feu de circulation. En accord avec les cartes, la méthodologie microscopique montre des concentrations plus élevées et, pour les segments de routes à proximité du point d'extraction, des surémissions vis-à-vis de la méthodologie macroscopique. A noter que les véhicules particuliers (VP) contribuent à proportion égale de la somme des contributions des véhicules utilitaires légers (VUL) et des poids lourds (PL), avec un apport similaire des VUL et PL aux émissions.

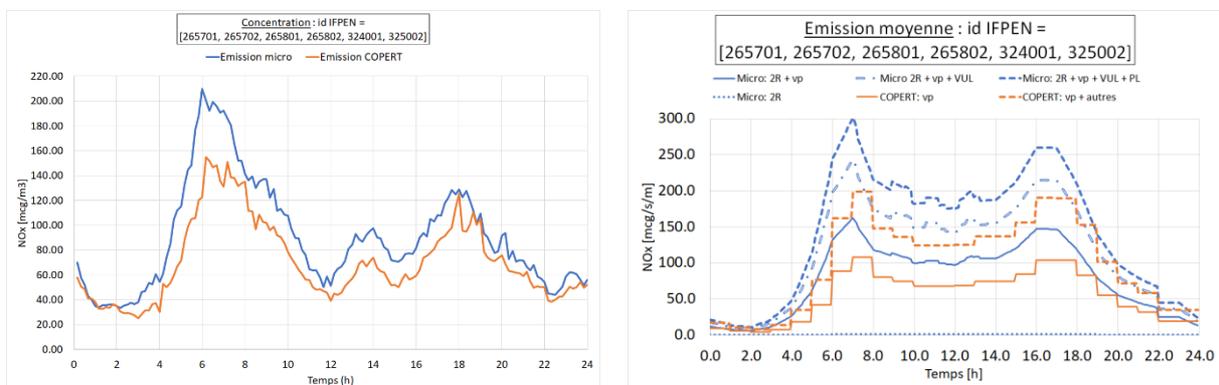


Figure 48 : 1er zoom : feu de circulation. Concentrations (à gauche) et émissions (à droite) de NO_x au point d'extraction avec usage d'une méthodologie AIRMES et COPERT pour différentes catégories de véhicule

3.3.1.2. 2^{ème} Zoom : pente positive et forte accélération

La figure ci-dessous présente un second détail de la cartographie de la qualité de l'air en NO_x, pour les émissions émanant des méthodologies microscopique et macroscopique. Le rapport des concentrations reste similaire au détail précédent, avec des différences entre les deux méthodologies (AIRMES / COPERT) plus importantes en heures pleines et des concentrations plus élevées pour la méthodologie AIRMES.

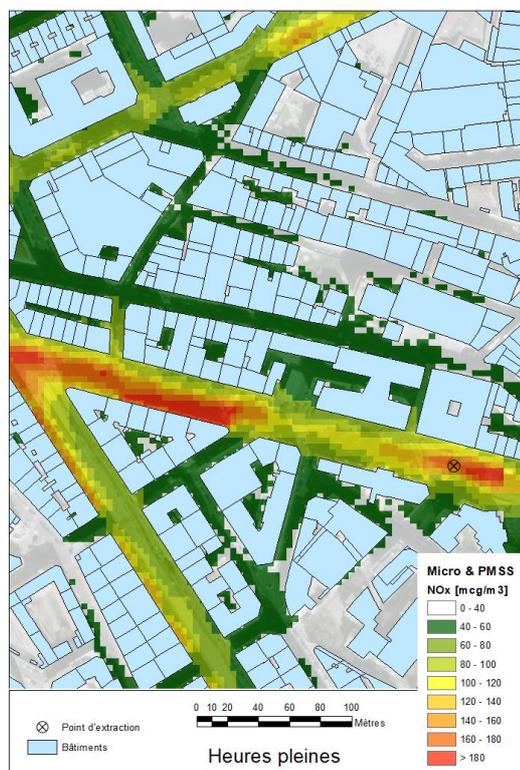




Figure 49 : 2nd zoom : moyenne heures creuses (à gauche) et pleines (à droite) en NO_x avec pour des émissions du trafic routier résultant de la méthodologie AIRMES (en haut) ou COPERT (en bas)

Le point d'extraction se situe au niveau d'un feu de circulation, avec une pente positive et une forte accélération après le feu. En accord avec les cartes, la méthodologie microscopique montre des concentrations plus élevées et, pour les segments de routes à proximité du point d'extraction, des surémissions vis-à-vis de la méthodologie macroscopique. Par comparaison au point d'extraction précédent, l'apport des VUL aux émissions microscopiques a beaucoup augmenté et les VUL contribuent maintenant légèrement plus que les VP aux émissions.

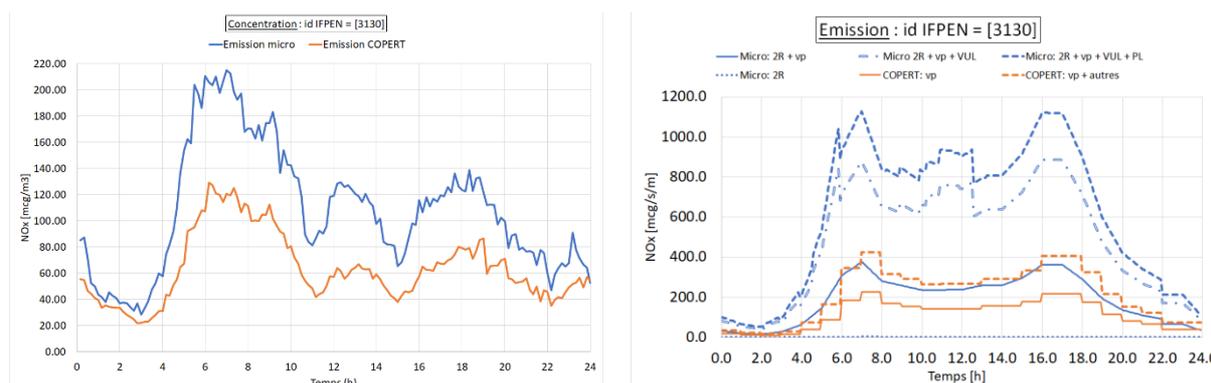


Figure 50 : 2nd zoom : pente positive et forte accélération. Concentrations (à gauche) et émissions (à droite) de NO_x au point d'extraction avec usage d'une méthodologie AIRMES et COPERT pour différentes catégories de véhicule

3.3.1.3. 3^{ème} Zoom : petite rue et freinage

La figure ci-dessous présente un troisième détail de la cartographie de la qualité de l'air en NO_x, pour les émissions émanant des méthodologies microscopique et macroscopique. A la différence des 2 premiers zooms, la méthode AIRMES ne montre pas des concentrations systématiquement plus élevées. En effet la méthode COPERT a tendance à surestimer les émissions pour des pentes négatives, entraînant ainsi des concentrations modélisées plus élevées sur ce type d'axe. Pour le reste des axes les conclusions sont identiques aux 2 zooms précédents.

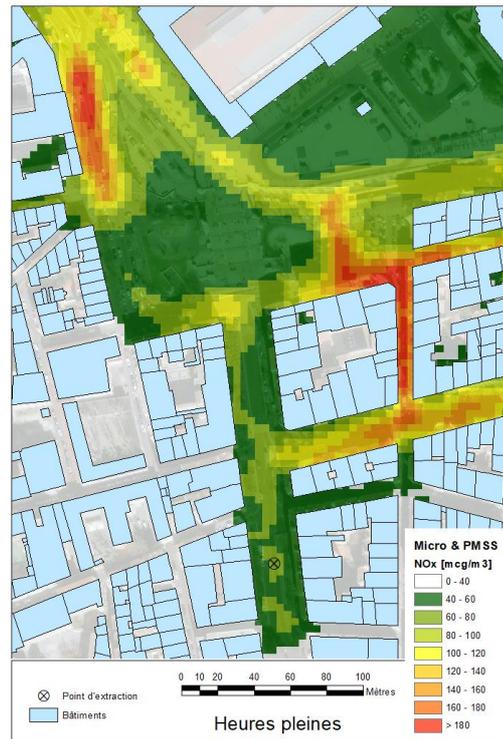


Figure 51 : 3eme zoom : moyenne heures creuses (à gauche) et pleines (à droite) en NO_x avec pour des émissions du trafic routier résultant de la méthodologie AIRMES (en haut) ou COPERT (en bas)

Le point d'extraction se situe au niveau d'une rue présentant une zone de fort freinage. En accord avec les cartes ci-dessus, la méthodologie macroscopique montre des concentrations plus élevées et, pour les segments de routes à proximité du point d'extraction, des surémissions vis-à-vis de la méthodologie microscopique. Comme pour le premier point d'extraction, l'apport des VP aux émissions est similaire à celui de la somme des contributions des VUL et PL.

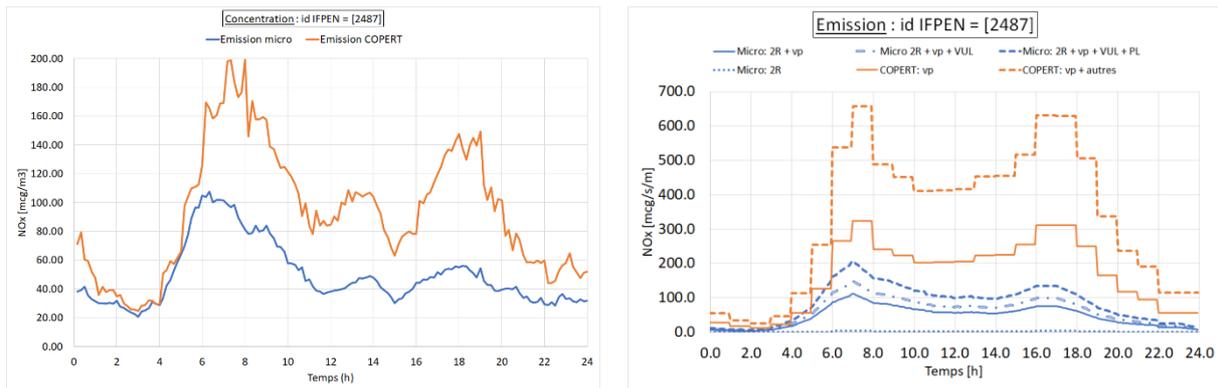


Figure 52 : 3eme zoom : petite rue et freinage. Concentrations (à gauche) et émissions (à droite) de NO_x au point d'extraction avec usage d'une méthodologie AIRMES et COPERT pour différentes catégories de véhicule

3.4. Etude de scénarios (T2.2)

Le volume trafic, les profils réels de conduites et le parc automobile ont une influence d'ordre un sur les émissions liées au trafic routier (tache 1.1 à 1.3) et également sur la qualité de l'air (tache 2.1). Les taches 1.1 à 1.3 du projet AIRMES ont permis la conception et le développement d'une méthodologie microscopique de calcul des émissions due au trafic. La méthodologie microscopique AIRMES permet de décrire les différentes séquences d'émissions liées au changement de couleur des feux de circulation. Pour mettre en lumière les apports à la modélisation de la pollution urbaine qu'ont les profils réels de conduites et le parc automobile, la tache 2.2 est décomposée en 3 parties :

- La section 3.2 présente les cartographies de la qualité de l'air en NO_x résultant des méthodologies COPERT et AIRMES. Les moyennes des 8 derniers cycles d'alternance des feux de circulation modélisés sont comparées.
- Pour mettre en lumière l'impact de la signalisation sur la qualité de l'air, la section 3.4.2 présente les concentrations en NO_x pour 2 synchronisations différentes des feux de circulation.
- Pour mettre en lumière l'impact du parc automobile sur la qualité de l'air, la section 3.4.3 présente les concentrations en NO_x pour 2 parcs différents du parc actuel (en l'occurrence le parc CITEPA corrigé par AtmoSud).

3.4.1. 1^{er} scénario : parc roulant actuel

La figure ci-dessous présente la cartographie de la qualité de l'air en NO_x autour de 3 feux de circulation, et pour des émissions émanant des méthodologies microscopique et macroscopique. Les concentrations sont plus élevées pour la méthodologie microscopique par la prise en compte dans le calcul des émissions :

- Des profils réels de conduites
- De la modulation du trafic routier

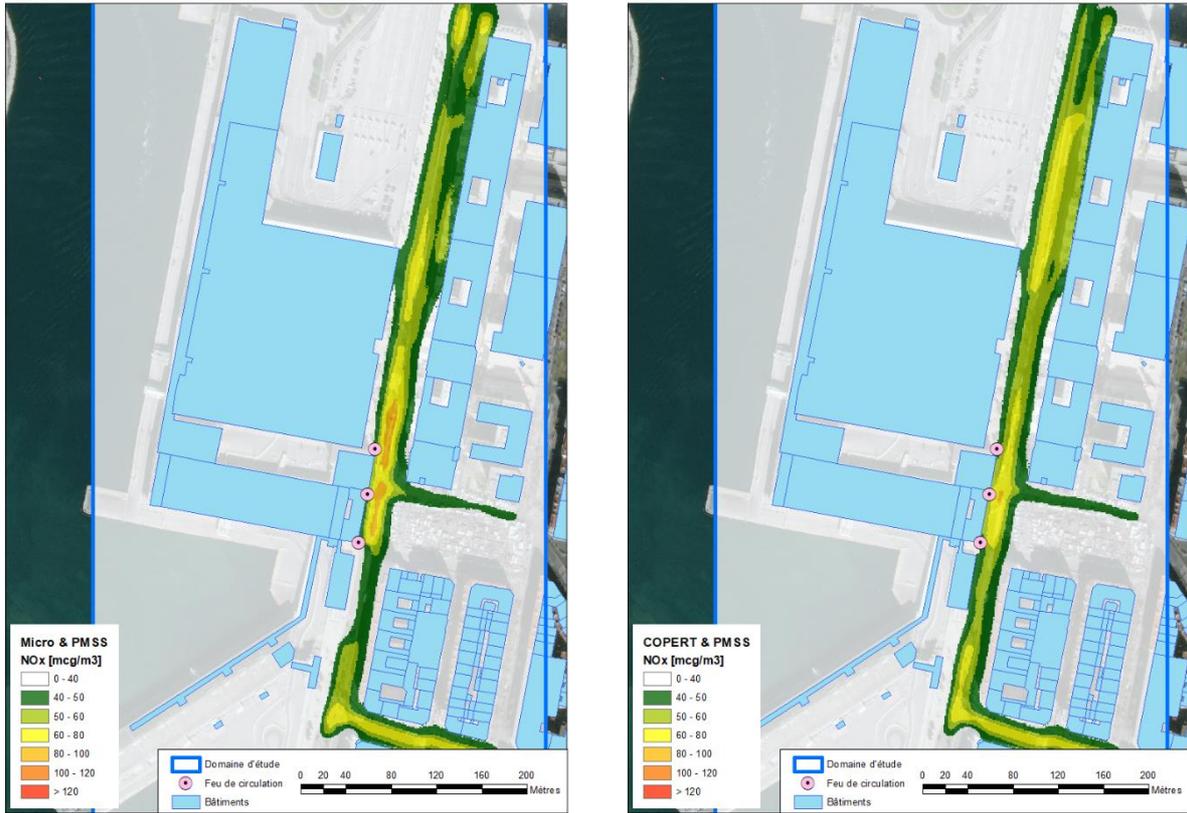


Figure 53 : Moyenne des concentrations en NO_x pour des émissions du trafic routier résultant de la méthodologie AIRMES (à gauche) ou COPERT (à droite)

3.4.2. 2^{ème} scénario : influence de la synchronisation des feux

Pour les émissions, il y a une prise en compte de l'alternance entre rouge et vert d'une succession de 3 feux sur une voie de circulation. La mise à jour des émissions se fait toutes les 5 secondes afin de décrire les différentes séquences d'émissions liées au changement de couleur des feux. Une suite de 4 séquences se répète avec une périodicité de 80 secondes : phase d'accélération, feux au vert, phase de freinage, feux au rouge.

Dans une synchronisation des feux dite « onde verte », les changements de couleur se suivent, et suivent le sens de circulation de la voie, ici du Nord vers le Sud. La chronique ici considéré de l'onde verte est présentée Figure 54, à comparer avec un exemple de synchronisation « asynchrone » Figure 55. A remarquer que le feu numéro 3 de la seconde synchronisation passe plus de temps au vert qu'au rouge. Mise à part cette exception, chaque feu est supposé passer autant de temps au vert qu'au rouge.

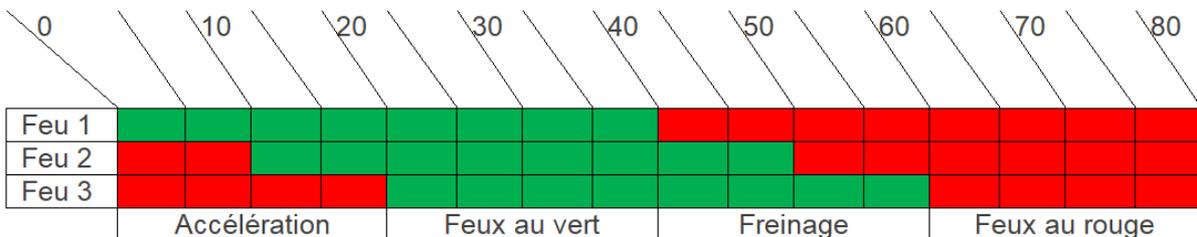


Figure 54 : Chronique « onde verte » de changement de couleur des feux de circulation

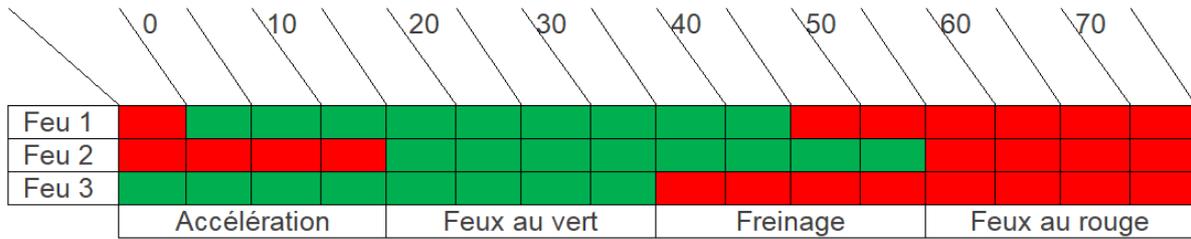


Figure 55 : Chronique « asynchrone » de changement de couleur des feux de circulation

Les figures ci-dessous présentent la cartographie de la qualité de l'air en NO_x autour de 3 feux de circulation, et pour une chronologie « onde verte » (Figure 56) et « asynchrone » (Figure 57) des émissions. Les figures détaillent les concentrations en NO_x correspondant aux différentes séquences d'émissions (phase d'accélération, feux au vert, phase de freinage, feux au rouge), en moyennant sur les 8 derniers cycles d'alternance des feux de circulation modélisés.

Les concentrations en NO_x de la chronologie « asynchrone » présente une nette augmentation des concentrations en phase d'accélération et pour les feux au vert. Seule la séquence des feux au rouge présente des concentrations similaires entre les 2 chronologies.

Les chronologies « onde verte » et « asynchrone » des émissions sont à volume trafic constant. Autrement dit, il n'y a pas d'augmentation dans le temps du trafic suite à la chronologie « asynchrone ». Pour les deux chronologies, la vitesse maximale reste de 50km/h, et les profils de vitesse fortement contraints par la signalisation, et dont un exemple est : peu importe le style de conduite, la vitesse est nulle au feu rouge. Pour la chronologie « asynchrone », la figure montre des concentrations importantes en aval du feu 3 lors de la phase d'accélération, et en aval du feu 2 lors des feux au vert. Cela correspond à des segments où les émissions sont importantes. Les émissions de la chronologie « onde verte » sont moins localisées dans le temps et l'espace, et cela se retrouve dans les concentrations en NO_x. Cela est dû au fait que dans le cas asynchrone les véhicules passent en moyenne plus de temps pour passer les trois feux de circulation. Le temps d'arrêt est en effet plus important que pour le cas synchrone. En plus, certains véhicules se retrouvent à accélérer au moins deux fois pour passer cette séquence. Dans le cas synchrone, les feux sont optimisés pour réduire l'alternance entre les accélérations et les décélérations des véhicules.



Figure 56 : Concentration en NO_x pour des émissions du trafic routier résultant d'une chronique « onde verte » de synchronisation des feux : phase d'accélération (en haut et à gauche), feux au vert (en haut et à droite), phase de freinage (en bas et à gauche), feux au rouge (en bas et à droite)



Figure 57 : Concentration en NO_x pour des émissions du trafic routier résultant d'une chronique « asynchrone » des feux : phase d'accélération (haut et gauche), feux au vert (en haut et à droite), phase de freinage (en bas et à gauche), feux au rouge (en bas et à droite)

3.4.3. 3^{eme} scénario : parc roulant essence et Euro6D-TEMP

Pour montrer le potentiel de notre outil, nous allons tester l'impact de variations majeures du parc roulant dans l'estimation des émissions microscopiques et de la qualité de l'air associée. Pour une chronique « onde verte » des feux de circulation, nous prenons ici l'hypothèse d'un parc 100% VP essence, à comparer avec un second parc 100% VP diesel norme Euro6d-TEMP.

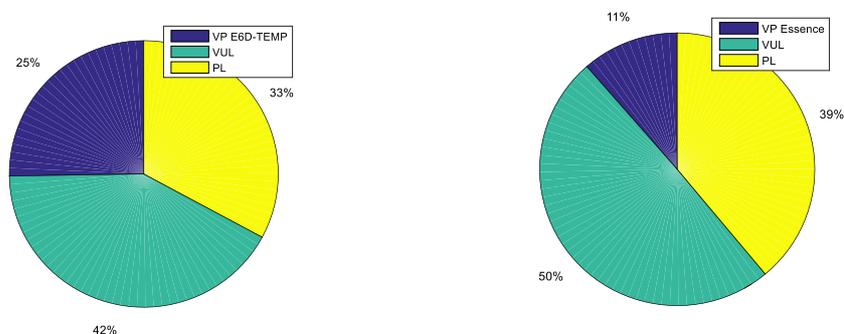


Figure 58 : Répartition des émissions NOx par type de véhicule

La Figure 58 montre la répartition des émissions NOx pour les deux parcs auto considérés et pour chaque type de véhicule. Pour le parc CITEPA, la contribution des VP est de l'ordre de 55%. Cette dernière est réduite jusqu'à 25% avec un parc VP 100% Euro6d-TEMP et jusqu'à 11% avec un parc VP 100% Essence.

La Figure 59 présente les émissions moyennes pour les 2 parcs roulant, à comparer à celui du parc roulant actuel présenté Figure 21. En moyenne sur l'ensemble du réseau modélisé :

- une diminution de 31,6 % des émissions en NO_x est constatée entre le parc CITEPA actuel et le parc 100% VP diesel norme Euro6d-TEMP
- une diminution de 41,6% des émissions en NO_x est constaté entre le parc CITEPA actuel et le parc 100% VP essence ;

Soit une diminution supplémentaire de 15,5% des émissions en NO_x avec un parc 100% VP essence par rapport à un parc 100% VP diesel norme Euro6d-TEMP.

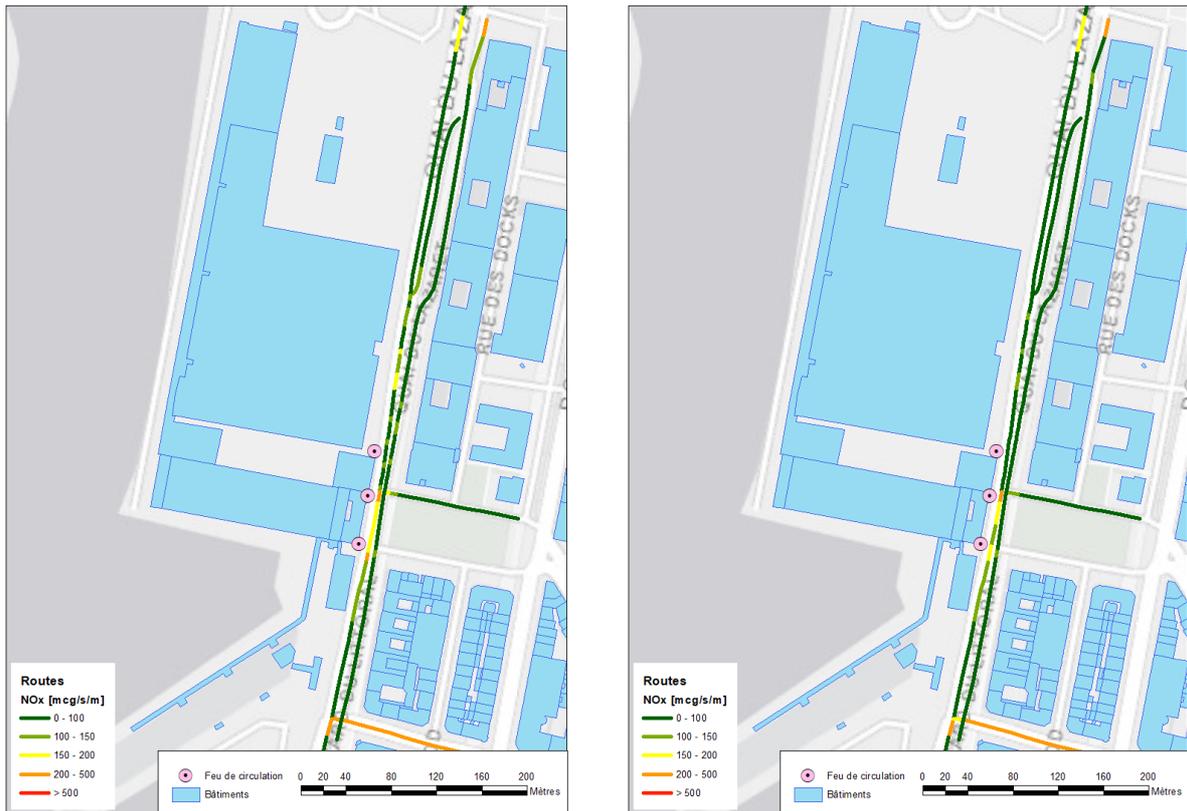


Figure 59 : Emissions résultant d'un parc 100% VP diesel norme Euro6d-TEMP (à gauche) et d'un parc 100% VP essence (à droite)

Les figures ci-dessous présentent la cartographie de la qualité de l'air en NO_x autour de 3 feux de circulation, et pour un parc roulant 100% VP essence (Figure 60) et 100% VP diesel norme Euro6d-TEMP (Figure 61). Les figures détaillent les concentrations en NO_x correspondant aux différentes séquences d'émissions (phase d'accélération, feux au vert, phase de freinage, feux au rouge), en moyennant sur les 8 derniers cycles d'alternance des feux de circulation modélisés.

Les concentrations en NO_x des 2 parcs roulants présentent une nette diminution comparativement à celles du parc roulant actuel, mais cela vient aussi de l'absence des VUL et VP. Les concentrations du parc roulant 100% VP essence sont également comparativement plus faibles que celles du parc 100% VP diesel norme Euro6d-TEMP.



Figure 60 : Concentration en NO_x pour des émissions du trafic routier résultant d'un parc VP 100% essence : phase d'accélération (en haut et à gauche), feux au vert (en haut et à droite), phase de freinage (bas et gauche), feux au rouge (en bas et à droite)



Figure 61 : Concentration en NO_x pour des émissions du trafic routier résultant d'un parc VP 100% diesel Euro6D-TEMP : phase d'accélération (en haut et à gauche), feux au vert (en haut et à droite), phase de freinage (en bas et à gauche), feux au rouge (en bas et à droite)

3.4.4. Bilan et conclusions des taches 2.1 et 2.2

L'objectif des taches 2.1 et 2.2 est de montrer les apports de la méthodologie microscopique aux outils de gestion de la qualité de l'air. Voici un récapitulatif des résultats obtenus :

- Les cartographies de la qualité de l'air basées sur le modèle microscopique des émissions mettent en évidence des microenvironnements avec une qualité de l'air dégradée, qui étaient moins visibles avec le modèle macroscopique des émissions,
- La méthodologie AIRMES présente une meilleure corrélation aux observations (concentrations de NO₂ en moyenne annuelle) que l'équivalent macroscopique,
- Les détails à la cartographie de la qualité de l'air en NO_x illustrent la forte influence du parc roulant, de la pente et de la signalétique.
- Les zooms montrent que le parc roulant et la signalisation peuvent être explicitement décrits dans l'estimation des émissions par la méthodologie microscopique et donc pris en compte dans la cartographie de la qualité de l'air.
 - Un parc roulant 100% VP essence présente une diminution de moitié des émissions par comparaison au parc roulant actuel, et la diminution des émissions reste notable par rapport à un parc 100% VP Euro6d-TEMP.
 - Une mauvaise synchronisation des feux de circulation empêche un trafic fluide. A volume trafic constant, une mauvaise synchronisation des feux présente des concentrations de polluants en nette augmentation.

3.5. Sensibilisation des conducteurs sur l'impact de leur comportement sur la qualité de l'air (T3.1)

Les travaux menés dans cette partie du projet ont permis de sensibiliser les citoyens et les entreprises sur le sujet de l'impact de leur mobilité sur la qualité de l'air et l'environnement de manière plus générale. Pour atteindre cet objectif, un des axes de travail a été de faire connaître au plus grand nombre l'application Geco Air afin de multiplier son nombre d'utilisateurs.

Le principe de Geco air est simple. D'une part, l'application analyse les émissions liées aux trajets de son utilisateur, quel que soit le type de transport (voiture, vélo, marche, transport collectif). D'autre part, elle le sensibilise sur le caractère polluant de ses déplacements avec un score mobilité, délivré chaque jour et après chaque trajet. Lorsque les déplacements sont effectués en voiture, l'application aide à améliorer son style de conduite avec des conseils simples, pratiques et personnalisés après chaque déplacement. Le smartphone d'un conducteur automobile devient ainsi un baromètre d'émissions de polluants et de gaz à effet de serre.

Pour augmenter le nombre d'utilisateurs de l'application Geco Air, une campagne de communication « douce » a été mise en œuvre par AtmoSud dans un premier temps. Cette campagne s'est appuyée sur son réseau de partenaires locaux comme les services de l'état, les services des transports des agglomérations, les partenaires associatifs de défense de l'environnement, les comités de quartiers, etc., auxquels l'application Geco Air a été présentée lors de comités territoriaux sur la qualité de l'air, de réunions de travail ou lors d'interventions de ses équipes sur le thème des transports et la mobilité. L'application a également été promue par des actualités sur le site internet d'AtmoSud ou lors d'événements de plus grande ampleur comme Air24, avec notamment des interviews ciblées et leurs mises en ligne sur le site internet d'AtmoSud et les réseaux sociaux.

Pour cibler plus spécifiquement le terrain d'expérimentation du projet, le quartier d'Euroméditerranée, et d'y disposer d'un échantillon représentatif des usages réels de mobilité, AtmoSud avec le support des partenaires du projet, a lancé le « Challenge Euromed Ecomobilistes 2019 » en février 2019. Les cibles de cette campagne de communication ont été les entreprises et les organismes implantés dans ce territoire ainsi que les citoyens. La communication lors de cette campagne a été axée sur trois thèmes :

- montrer que chacun peut avoir une action pour réduire son empreinte environnementale
- inciter les utilisateurs à choisir un mode de déplacement alternatif ou à adopter une conduite « écoresponsable »
- valoriser les politiques environnementales des entreprises qui contribuent à réduire leur empreinte écologique.

Le « Challenge Euromed Ecomobilistes 2019 » s'est ensuite déroulé du 25 avril au 23 mai 2019. Durant 1 mois, des groupes de salariés et de citoyens individuels ont accepté ce challenge pour agir, à leur niveau, pour la qualité de l'air dans le quartier Euroméditerranée. Pour les participants, le challenge a consisté à installer l'application Geco air, rejoindre son entreprise ou son groupe (préalablement inscrit par un représentant/administrateur) au travers de l'application, et utiliser au maximum la mobilité alternative ou « éco-conduire » lors de trajets en voiture.

Au total, une centaine de volontaires ont participé à ce challenge, effectuant plus de 6 000 trajets et parcourant environ 76 000 km avec l'application. Les principaux chiffres du challenge sont illustrés en Figure 62.

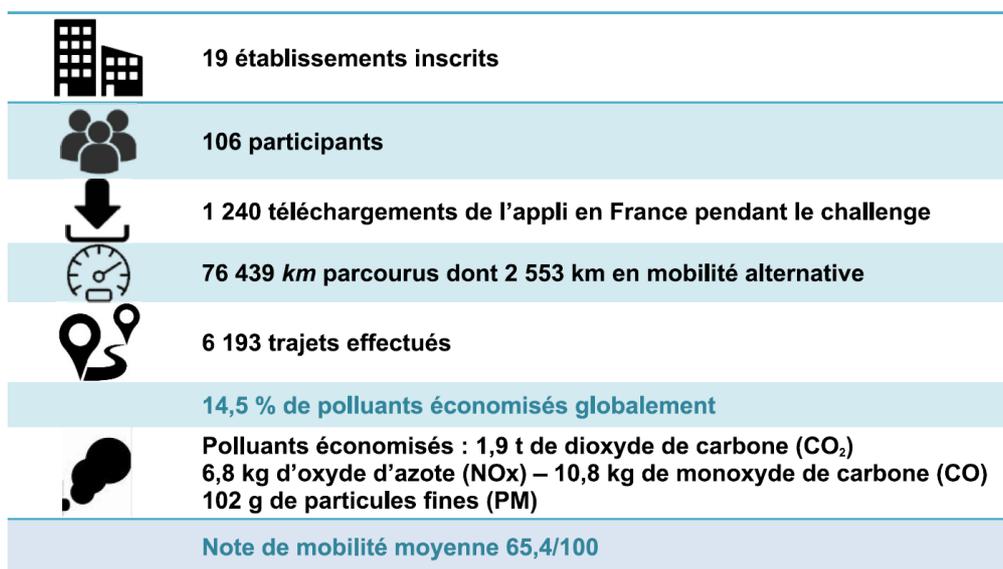


Figure 62 Principaux chiffres du Challenge Euromed Ecomobilistes 2019

A la fin du challenge, une séance de remise des trophées a été organisée dans le quartier d'Euroméditerranée le 7 juin 2019. Elle a permis de valoriser la démarche des entreprises et des participants au challenge et de recueillir les retours d'expérience afin de perfectionner certaines fonctionnalités Geco air pour améliorer les conseils d'éco-conduite donnés après chaque déplacement en voiture. Pour promouvoir cet événement, AtmoSud avait réalisé un clip vidéo disponible sur sa chaîne YouTube⁵.

Au-delà de l'objectif principal de sensibilisation des conducteurs sur l'impact de leur comportement sur la qualité de l'air, ces travaux ont servis également les tâches techniques et scientifiques du projet. Ils ont permis de disposer d'un échantillon plus représentatif des usages réels de mobilité sur le quartier d'Euroméditerranée pour alimenter la base de données.

Plus spécifiquement, le « Challenge Euromed Ecomobilistes 2019 » a permis d'augmenter significativement le nombre de trajets considérés sur la zone d'étude du quartier Euroméditerranée. Un bilan visuel de la quantité de données FCD 1Hz enregistrées avec l'application Geco air dans le quartier Euromed avant et après le challenge est montré en Figure 63.

⁵ <https://youtu.be/lyAWTOHqRZE>

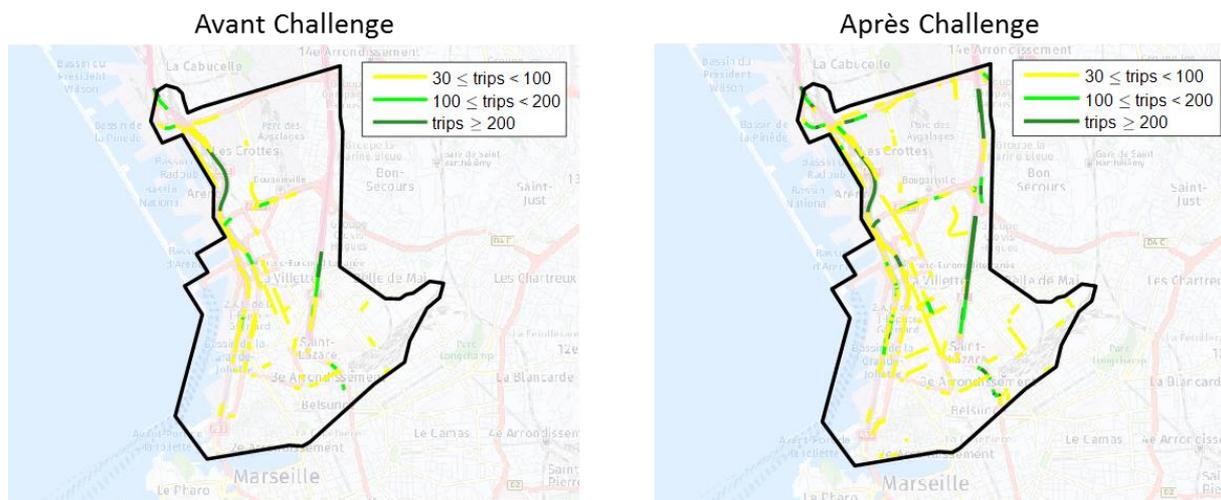


Figure 63 Bilan données FCD 1Hz enregistrées dans le quartier Euromed avant et après le Challenge

3.6. Construction d'une base de données d'usage réel de mobilité (T3.2)

Les trajets des utilisateurs de l'application *Geco air* ont été extraits par IFPEN sur le territoire de l'étude et une base de données des émissions en usage réel a été construite. Si l'on observe uniquement la mobilité à l'intérieur du périmètre du quartier Euromed considéré (voir Figure 64), la base de données compte un total de 65 000 km enregistrés. Ces données d'usage réel collectées dans le cadre du projet sont complétées par la base de données déjà existante des utilisateurs de *Geco air* (60 millions de kilomètres) et *Geco* (15 millions de kilomètres sur la France). Cette base de données est exploitée dans la tâche T1 afin d'améliorer la prédiction des profils de vitesse et les modèles d'émissions.

Comme expliqué dans la Section 2.1, le modèle de prédiction des profils de vitesse s'appuie sur la base de données de conduite en usage réel et consiste en une phase d'apprentissage, dite « offline », et une phase d'utilisation/prédiction, dite « online ». Dans le projet AIRMES, la base d'apprentissage choisie pour établir le modèle contient les trajets *Geco air* enregistrés dans les zones métropolitaines de Paris et Lyon, les villes françaises où l'on a le plus de données et donc une représentativité des conditions de conduite réelles plus élevée. La base d'apprentissage utilisée contient environ 200 000 segments routiers (sur Paris et Lyon) et environ 2 millions de trajets (ou profils de vitesse) enregistrés sur ces segments. Le modèle, dans sa phase « online », a été utilisé pour prédire les profils de vitesse dans le périmètre du quartier Euromed (en Figure 64), ce qui représente environ 1 100 segments routiers. Pour rappel, la phase « online » du modèle ne prend en entrée que des descripteurs macroscopiques pour prédire les profils de vitesse. Les données *Geco air* disponibles dans le quartier n'ont été utilisées que pour validation et pour définir la « référence ».

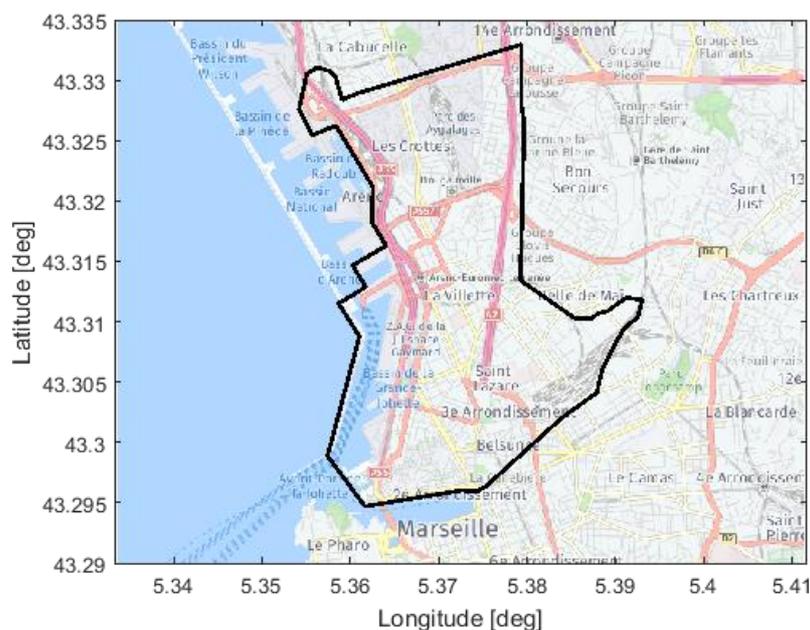


Figure 64 Périmètre du quartier Euromed considéré

4. Conclusions

Le projet a permis de mettre en évidence la forte sensibilité des émissions polluantes aux conditions de conduite, liées à l'infrastructure routière et aux choix d'aménagement et régulation. L'utilisation d'un modèle microscopique permet de capter la sensibilité aux accélérations. L'impact de l'infrastructure devient alors visible. Les améliorations apportées aux modèles de calculs des émissions du trafic routier ont renforcé la précision des résultats obtenus. Ainsi, les profils de conduite qui influent fortement sur les émissions des véhicules, ont pu être reconstruits en fonction des propriétés de la route (pente, congestion, courbure, ...) et de son aménagement (signalisation, intersections, ...). Les différentes technologies de propulsion et de dépollution des véhicules ont également été prises en compte dans les algorithmes de calcul. L'ensemble de ces travaux a permis de réduire les erreurs d'estimation des émissions des véhicules de l'ordre de 50% par rapport aux méthodes de référence qui ne tiennent pas compte de ces différents paramètres.

Tous les développements réalisés dans ce projet ont été pensés et conçus pour être indépendants d'une phase préalable de collecte de données, ce travail pouvant s'avérer long et contraignant pour les opérateurs. Ainsi, ces solutions sont rapides à déployer sur de nouveaux territoires et sont donc reproductibles pour un faible coût.

Les inventaires d'émissions issus des modèles microscopiques ont ensuite été couplés avec succès à un modèle de dispersion atmosphérique haute résolution sur le territoire d'étude, afin de calculer les concentrations de polluants et la qualité de l'air. Les cartographies de la qualité de l'air calculées à partir d'un modèle microscopique à haute résolution de la dispersion confirment ainsi la forte influence de déterminants comme le parc roulant, la pente et les conditions de trafic, et permettent d'étudier finement la qualité de l'air de différents microenvironnements.

Dans les zones critiques pour la qualité de l'air qui ont été mises en évidence, il est alors possible de mieux comprendre les raisons de cette dégradation et de proposer des solutions plus ciblées.

Cette avancée ouvre des possibilités de construire des outils de supervision de la qualité de l'air à fine échelle. Intégré dans une plateforme numérique SmartCity, elle permettrait d'aider à la décision dans la gestion de la qualité de l'air en ville (avec une vision systémique : gestion dynamique de la circulation, prise en compte de la météorologie, des émissions de polluants pour piloter la qualité de l'air sur le territoire). Cette précision spatio-temporelle correspond à une demande sociétale et répond également à un besoin d'une meilleure description des microenvironnements, avec notamment une utilisation courante de capteurs personnels par de nombreux citoyens. Améliorer les cartographies en milieu urbain c'est donc limiter les écarts qui pourraient exister entre les mesures individuelles décrivant un microenvironnement et une cartographie modélisée a priori avec les meilleurs données disponibles (émissions, prévision météorologique, description 3D du bâti, etc...). Cette descente d'échelle spatiale et temporelle permettra d'améliorer l'évaluation de la population de la pollution urbaine et de travailler sur ces déterminants. La complémentarité entre la modélisation et les

différentes mesures sur le territoire permettra d'améliorer la cartographie de la qualité de l'air à haute résolution, avec l'utilisation de techniques d'assimilation de données pour produire la cartographie la plus précise possible.

L'amélioration des outils de suivi et d'aide à la décision est une nécessité pour le futur. Un outil permettant de modéliser à haute résolution spatiale et temporelle les émissions liées au trafic routier et les concentrations en polluants pourra être très utile pour accompagner les politiques publiques, citons par exemple l'urbanisme tactique mis en application dans le cadre de l'épidémie Covid-19. Cet outil pourrait coupler des sources de mesure dynamique du trafic routier comme les données FCD commerciales avec les modèles développés dans AIRMES. Il serait alors possible de disposer d'un outil de monitoring temps réel de l'impact environnemental du transport routier. Dans un deuxième temps, les méthodologies AIRMES pourront être couplées à des plateformes de simulation trafic dans le but de réaliser des prédictions et de comparer l'impact de différents scénarios d'aménagement de voirie.

Les différents travaux menés dans le cadre du projet AIRMES ont fait la démonstration de l'intérêt de développer et d'utiliser des outils à haute résolution, spatiale et temporelle, pour travailler sur la qualité de l'air. Ces travaux ont amélioré les connaissances en matière de pollution atmosphérique sur le territoire d'étude, ont permis de développer et de maîtriser différents outils de calculs, que ce soit pour le calcul des émissions ou les calculs des concentrations, et ont participé à sensibiliser différents acteurs du territoire sur ce sujet.

Les citoyens peuvent ainsi participer à l'amélioration de la qualité de l'air dans les zones où le style de conduite est une des raisons de la dégradation (zone de forte accélération) tandis que les aménageurs peuvent identifier les sections où il serait intéressant de fluidifier la circulation.

Ces résultats démontrent toute l'importance de disposer d'outils adaptés pour la modélisation et le monitoring de la qualité de l'air à haute résolution afin de mieux comprendre son territoire, mieux l'aménager et prendre les mesures les plus adaptées et les plus efficaces.

Au-delà des améliorations scientifiques apportées, le projet AIRMES a montré la sensibilité des acteurs (citoyens, entreprises et organisations) du quartier d'Euroméditerranée aux problématiques de la qualité de l'air et leur volonté d'action pour son amélioration.

Références bibliographiques

- [1] International Energy Agency, “World Energy Outlook – Energy and Air Pollution”, Special Report, 2016.
- [2] L. Aichi, (2015). Pollution de l’air, le coût de l’inaction, Rapport de commission d’enquête de la CE sur le coût économique et financier de la pollution de l’air, n° 610.
- [3] *COmputer Program to calculate Emissions from Road Transports*, programme financé par l’agence européenne de l’environnement ; <http://emisias.com/products/copert>
- [4] Thibault, L., Degeilh, P., Lepreux, O., Voise, L., Alix, G., & Corde, G. (2016). A new GPS-based method to estimate real driving emissions. In Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2016 IEEE 19th International Conference on (pp. 1628-1633). IEEE.

Index des tableaux et figures

Tableaux ⁽ⁱ⁾

Tableau 1 Liste des variables utilisées dans les DSP	10
Tableau 2 Résumé des entrées du modèle et extensions éventuelles	11
Tableau 3 Résumé des essais pour la validation du modèle microscopique d’émissions	12

Figures ⁽ⁱ⁾

Figure 1 Structure du projet	7
Figure 2 Schéma de la phase d’apprentissage et génération/prédiction de profil de la partie « offline » de la méthode	9
Figure 3 Structure de l’arbre de décision	10
Figure 4 Essais de validation du modèle microscopique et comparaison avec la référence PEMS et les facteurs d’émissions (cas urbain)	14
Figure 5 Essais de validation du modèle microscopique et comparaison avec la référence PEMS et les facteurs d’émissions (cas autoroutier)	14
Figure 6 Essais de validation du modèle microscopique et comparaison avec la référence PEMS et les facteurs d’émissions (cas mixte)	15
Figure 7 Trafics moyen journalier annuel en 2016	16
Figure 8 Parc roulant urbain des véhicules particuliers 2016 utilisé sur la commune de Marseille par norme EURO, carburant et cylindre	18
Figure 9 Parc roulant urbain des véhicules utilitaires particuliers 2016 utilisé sur la commune de Marseille par norme EURO, carburant et masse	19
Figure 10 Parc roulant urbain des 2 roues 2016 utilisé sur la commune de Marseille par norme EURO, carburant et cylindre	19
Figure 11 Parc roulant urbain des poids lourds 2016 utilisé sur la commune de Marseille par norme EURO, carburant et masse	20
Figure 12 Répartition des brins par profil de vitesse (VL - 2016 - EuroMed)	21
Figure 13 Profils de vitesse (VL - 2016 - EuroMed)	21
Figure 14 Profils de vitesse (PL - 2016 - EuroMed)	22
Figure 15 Émissions de NO _x sur la commune de Marseille (2016)	22
Figure 16 : <i>Méthodologie de mise en œuvre de PMSS</i>	25
Figure 17 : Domaine d’étude (à gauche) et topographie du domaine d’étude (à droite)	26
Figure 18 : <i>Domaine d’étude, grille de modélisation WRF, stations 5 avenues (en rose) et Place Verneuil (en vert)</i>	27
Figure 19 <i>Domaine modélisé : bâti, axes routiers et GSP (en rouge) sur le domaine d’étude (en bleu)</i>	28
Figure 20 : Concentrations en NO _x et en NO ₂ (et leur rapport) observées à la station de proximité « Place Verneuil » le 20 juin 2019	29

Figure 21 : Domaine à très haute résolution : bâti et émissions du trafic routier sur le domaine d'étude	31
Figure 22 Exemple de prédiction des profils de vitesse sur un segment avec un feu tricolore en aval	32
Figure 23 Exemple de prédiction des profils de vitesse sur un segment de route prioritaire à une intersection	32
Figure 24 Exemples de prédiction des profils de vitesse avec l'approche déterministe sur des segments de route avec arrêt.....	33
Figure 25 Exemples de prédiction des profils de vitesse avec l'approche stochastique sur des segments de route avec arrêt.....	33
Figure 26 Comparaison entre les erreurs des deux méthodes de construction de profils de vitesse dans des cas avec arrêts.....	34
Figure 27 Contribution annuelle des émissions NO _x et PM ₁₀ par catégorie de véhicule	35
Figure 28 Comparaison de l'estimation des émissions de NO _x sur un segment avec un feu tricolore en aval par rapport à la référence et à l'état de l'art COPERT.....	35
Figure 29 Comparaison de l'estimation des émissions de NO _x sur un segment de route prioritaire à une intersection par rapport à la référence et à l'état de l'art COPERT	36
Figure 30 Carte des émissions de NO _x sur le quartier Euromed et comparaison de l'estimation par rapport à la référence et à l'état de l'art COPERT. Seuls les segments de route avec suffisamment de données mesurées sont affichés.....	36
Figure 31 Carte des émissions de NO _x sur le quartier Euromed et comparaison de l'estimation par rapport à l'état de l'art COPERT (04/04/2019 à 17h)	37
Figure 32 Cartes de différence relative des émissions NO _x entre une heure de pointe (HP) et une heure creuse (HC) sur Euromed pour les VP	38
Figure 33 Carte des émissions de CO ₂ sur le quartier Euromed et comparaison de l'estimation par rapport à la référence et à l'état de l'art COPERT. Seuls les segments de route avec suffisamment de données mesurées sont affichés.....	38
Figure 34 Carte des émissions de CO ₂ sur le quartier Euromed et comparaison de l'estimation par rapport à l'état de l'art COPERT (04/04/2019 à 17h)	39
Figure 35 Carte des émissions de PM hors-échappement sur le quartier Euromed et comparaison de l'estimation par rapport à la référence et à l'état de l'art COPERT. Seuls les segments de route avec suffisamment de données mesurées sont affichés.	39
Figure 36 Carte des émissions de PM hors-échappement sur le quartier Euromed et comparaison de l'estimation par rapport à l'état de l'art COPERT (04/04/2019 à 17h).....	40
Figure 37 Cartes des émissions de NO _x , CO ₂ et PM des VUL sur le quartier Euromed et comparaison de l'estimation par rapport à l'état de l'art COPERT	41
Figure 38 Zoom sur les émissions NO _x des PLs sur le quartier Euromed et comparaison de l'estimation par rapport à l'état de l'art COPERT	42
Figure 39 Cartes des émissions de NO _x , CO ₂ et PM des PL sur le quartier Euromed et comparaison de l'estimation par rapport à l'état de l'art COPERT (04/04/2019 à 17h).....	43
Figure 40 Cartes de différence relative des émissions de NO _x entre les approches micro et macro sur Euromed en considérant toutes les sources d'émissions	44
Figure 41 Fichier « statique » de la topologie du quartier Euromed	45
Figure 42 Fichier « dynamique » des sources d'émissions sur le quartier Euromed.....	45
Figure 43 : moyenne journalière en NO ₂ calculées avec des émissions AIRMES (à gauche) ou COPERT (à droite)	46
Figure 44 : Comparaison des concentrations NO ₂ en moyenne annuelle (en abscisse) avec la moyenne jour modélisée par PMSS (en ordonnée) et des émissions trafic résultant de la méthode AIRMES (points bleus) ou COPERT (points oranges).....	47
Figure 45 : Concentration en NO _x et PM ₁₀ de proximité « Place Verneuil » (observation et modélisation avec émissions AIRMES et COPERT) avec pour rappel les observations à la station de fond « 5 avenues »	47
Figure 46 : Emissions NO _x et PM ₁₀ pour les segments de routes à proximité de la station « Place Verneuil » (modélisation AIRMES et COPERT pour différentes catégories de véhicule)	48
Figure 47 : 1er zoom : moyenne heures creuses (à gauche) et pleines (à droite) en NO _x avec pour des émissions du trafic routier résultant de la méthodologie AIRMES (en haut) ou COPERT (en bas)	50
Figure 48 : 1er zoom : feu de circulation. Concentrations (à gauche) et émissions (à droite) de NO _x au point d'extraction avec usage d'une méthodologie AIRMES et COPERT pour différentes catégories de véhicule.....	50

Figure 49 : 2nd zoom : moyenne heures creuses (à gauche) et pleines (à droite) en NO _x avec pour des émissions du trafic routier résultant de la méthodologie AIRMES (en haut) ou COPERT (en bas)	52
Figure 50 : 2nd zoom : pente positive et forte accélération. Concentrations (à gauche) et émissions (à droite) de NO _x au point d'extraction avec usage d'une méthodologie AIRMES et COPERT pour différentes catégories de véhicule	52
Figure 51 : 3eme zoom : moyenne heures creuses (à gauche) et pleines (à droite) en NO _x avec pour des émissions du trafic routier résultant de la méthodologie AIRMES (en haut) ou COPERT (en bas)	53
Figure 52 : 3eme zoom : petite rue et freinage. Concentrations (à gauche) et émissions (à droite) de NO _x au point d'extraction avec usage d'une méthodologie AIRMES et COPERT pour différentes catégories de véhicule	54
Figure 53 : Moyenne des concentrations en NO _x pour des émissions du trafic routier résultant de la méthodologie AIRMES (à gauche) ou COPERT (à droite)	55
Figure 54 : Chronique « onde verte » de changement de couleur des feux de circulation	55
Figure 55 : Chronique « asynchrone » de changement de couleur des feux de circulation	56
Figure 56 : Concentration en NO _x pour des émissions du trafic routier résultant d'une chronique « onde verte » de synchronisation des feux : phase d'accélération (en haut et à gauche), feux au vert (en haut et à droite), phase de freinage (en bas et à gauche), feux au rouge (en bas et à droite)	57
Figure 57 : Concentration en NO _x pour des émissions du trafic routier résultant d'une chronique « asynchrone » des feux : phase d'accélération (haut et gauche), feux au vert (en haut et à droite), phase de freinage (en bas et à gauche), feux au rouge (en bas et à droite)	58
Figure 58 : Répartition des émissions NO _x par type de véhicule	59
Figure 59 : Emissions résultant d'un parc 100% VP diesel norme Euro6d-TEMP (à gauche) et d'un parc 100% VP essence (à droite)	60
Figure 60 : Concentration en NO _x pour des émissions du trafic routier résultant d'un parc VP 100% essence : phase d'accélération (en haut et à gauche), feux au vert (en haut et à droite), phase de freinage (bas et gauche), feux au rouge (en bas et à droite)	61
Figure 61 : Concentration en NO _x pour des émissions du trafic routier résultant d'un parc VP 100% diesel Euro6D-TEMP : phase d'accélération (en haut et à gauche), feux au vert (en haut et à droite), phase de freinage (en bas et à gauche), feux au rouge (en bas et à droite)	62
Figure 62 Principaux chiffres du Challenge Euromed Ecomobilistes 2019	64
Figure 63 Bilan données FCD 1Hz enregistrées dans le quartier Euromed avant et après le Challenge	65
Figure 64 Périmètre du quartier Euromed considéré	66

Sigles et acronymes

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AFT	After-Treatment
CO	Carbon Oxide
CO₂	Carbon Dioxide
COPERT	Computer Program to calculate Emissions from Road Transports
DOC	Diesel Oxidation Catalyst
DPF	Diesel Particule Filter
EF	Emissions Factor
FCD	Floating Car Data
GNSS	Global Navigation Satellite System
GES	Gaz à effet de serre
GPF	Gasoline Particule Filter
GPS	Global Positioning System

IFPEN	IFP Energies nouvelles
LNT	Lean NOx Trap
NO_x	Nitrogen Oxides
NSC	NOx Storage Converter
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
PACA	Provence-Alpes-Côte d'Azur
PEMS	Portable Emissions Measurement System
PM	Particulate Matter
SCR	Selective Catalytic Reduction
SEMS	Smart Emissions Measurement System
SIG	Service d'Information Géographique
TMJA	Taux Moyen Journalier Annualisé
TWC	Three-Way Catalyst

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le réchauffement climatique.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir de données officielles régulièrement mises à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre...



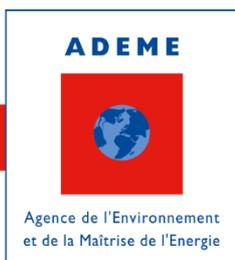
RAPPORT D'AVANCEMENT PRIMEQUAL 2018 PROJET « AIRMES »

Résumé L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a classé, en 2016, la pollution de l'air comme l'une des causes les plus importantes de décès prématurés. Toutefois, les valeurs limites des concentrations de polluants fixées par la Commission Européenne restent dépassées de manière récurrente sur le territoire européen et en particulier sur le territoire français. Le secteur des transports représente toujours l'une des sources les plus importantes de polluants, malgré les nombreuses mesures mises en place par les pouvoirs publics et les avancements technologiques dans le domaine. Or, les outils actuels de monitoring de la qualité de l'air ne permettent pas d'isoler et estimer avec précision la part d'émissions en usage réel due au transport routier ainsi que leur localisation spatiale. Par conséquent, il s'avère difficile pour les villes de prendre les bonnes décisions en matière d'aménagement de l'infrastructure routière et de législation pour améliorer la qualité de l'air sans avoir à disposition des outils précis d'évaluation et de projection d'impact des mesures envisagées sur les émissions polluantes du transport routier et les concentrations de polluants. L'objectif du projet AIRMES est de construire une méthodologie de descente d'échelle spatiale (typiquement de l'ordre de 10 mètres) et temporelle (typiquement de l'ordre de 5 minutes), par rapport aux outils utilisés en routine aujourd'hui, afin d'avoir une carte de la qualité de l'air plus précise. Cet objectif est atteint grâce aux données de conduite en usage réel acquises à haute fréquence (1 Hz) par le capteur GPS du smartphone et collectées sur le territoire français par les utilisateurs de l'application *Geco air* (développée par IFPEN avec le soutien de l'ADEME). L'expérimentation du projet a été effectuée dans le quartier Euroméditerranée (Euromed) de Marseille.

Essentiel à retenir

L'objectif du projet AIRMES est de concevoir et développer de nouvelles méthodologies pour la modélisation de la qualité de l'air en se basant sur les données d'usage réel des voitures particulières.

La finalité de ces nouveaux outils est d'être capable de modéliser les émissions à l'échappement puis les concentrations de polluants avec une résolution spatiale (10 mètres) et temporelle (5 minutes) fines.



www.ademe.fr

