

anses

agence nationale de sécurité sanitaire
alimentation, environnement, travail



Connaître, évaluer, protéger

Particules de l'air ambiant extérieur

Impact sur la pollution atmosphérique des technologies
et de la composition du parc de véhicules automobiles
circulant en France

Rapport d'expertise collective

Juillet 2019 - Édition scientifique

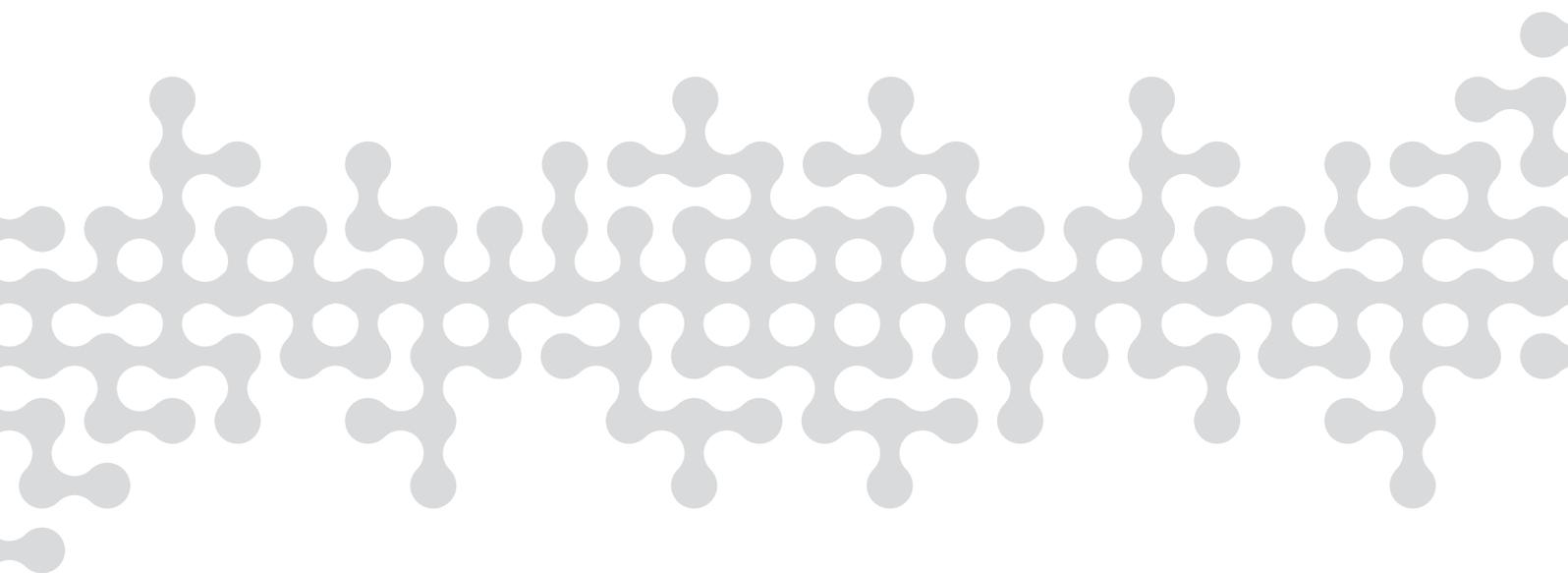


Particules de l'air ambiant extérieur

Impact sur la pollution atmosphérique des technologies
et de la composition du parc de véhicules automobiles
circulant en France

Rapport d'expertise collective

Juillet 2019 - Édition scientifique



Impact sur la pollution atmosphérique des technologies et de la composition du parc de véhicules automobiles circulant en France

Saisine n°2014-SA-0156

RAPPORT d'expertise collective

Comité d'Experts Spécialisé « évaluation des risques liés aux milieux aériens »

Groupe de travail « Particules »

Janvier 2019

Mots clés

Particules, polluants atmosphériques, émissions, concentrations, modélisation, simulation, Polyphemus, COPERT, technologie, motorisation, Diesel, essence, filtre à particules, scénario, prospective, composition, trafic routier, transport routier, Île-de-France, France

Particulate matter, atmospheric pollutants, emission, concentration, modelling, simulation, Polyphemus, COPERT, vehicle technology, motorisation, Diesel, petrol, particulate filter, scenario, prospective, vehicle fleet composition, road traffic, Île-de-France, France

Présentation des intervenants

PRÉAMBULE : Les experts externes, membres de comités d'experts spécialisés, de groupes de travail ou désignés rapporteurs sont tous nommés à titre personnel, *intuitu personae*, et ne représentent pas leur organisme d'appartenance.

GROUPE DE TRAVAIL

[Les membres du groupe de travail ayant réalisé le présent rapport sont surlignés en gras ci-dessous.]

Président

M. Michel ANDRÉ – Directeur de recherche, Transports et pollution de l'air (Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux, IFSTTAR) – Spécialités : Émissions de polluants des véhicules, méthodologies d'évaluation.

Membres

M. Jean-Marc ANDRÉ – Expert transports (Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique) – Spécialités : contribution des sources et émissions nationales.

Mme Armelle BAEZA – Professeur des Universités (Université Paris Diderot) – Spécialité : toxicologie des particules.

Mme Myriam BLANCHARD – Chargée de projet en épidémiologie (Cire Normandie, Santé Publique France) – Spécialités : épidémiologie des pathologies liées aux particules.

Mme Aurélie CHARRON – Chargée de Recherche (Institut des Géosciences de l'Environnement UMR 5001, CNRS / Grenoble INP / IRD / Université Grenoble Alpes et IFSTTAR) – Spécialités : physico-chimie et mesure des aérosols, modèles sources-récepteur

M. Laurent GAGNEPAIN – Ingénieur Expert transports (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) – Spécialités : émissions des véhicules routiers et modélisation.

M. Guillaume GARCON – Professeur des Universités (Université de Lille 2) – Spécialités : toxicologie et HAP.

Cécile HONORÉ – Ingénieure responsable du service Etudes (Airparif) – Spécialités : modélisation et chimie des particules [participation de mai 2016 à septembre 2016]

Mme Bénédicte JACQUEMIN – Chargée de Recherche (Institut national de la santé et de la recherche médicale) – Spécialités : épidémiologie environnementale, pollution atmosphérique.

M. Nicolas MARCHAND – Chargé de Recherche (Université Aix Marseille) – Spécialités : Chimie de l'atmosphère, aérosols [participation de septembre 2015 à décembre 2015]

Mme Sophie MOUKHTAR – Ingénieure partenariats et digital (Airparif) – Spécialités : modélisation et chimie des particules [participation interrompue de mai 2016 à septembre 2016].

M. Jean-Ulrich MULLOT – Pharmacien, chef du Laboratoire d'Analyses de Surveillance et d'Expertise de la Marine de Toulon (Service de santé des armées) – Spécialités : chimie analytique, évaluation des risques sanitaires environnementaux et professionnels.

Mme Karine SARTELET – Directrice de Recherche (CEREA - Ecole nationale des Ponts et Chaussées) – Spécialités : modélisation de la qualité de l'air et de la formation des aérosols.

COMITÉ D'EXPERTS SPÉCIALISÉ

Les travaux, objets du présent rapport ont été suivis et adoptés par le CES suivant « Evaluation des risques liés aux milieux aériens ».

Au cours de l'instruction de cette expertise, le CES a été renouvelé.

La composition du CES ayant suivi ces travaux à l'occasion des séances des 18 septembre 2014, 6 novembre 2014, 26 novembre 2015, 14 avril 2016, 29 avril 2016 (réunion téléphonique avec une délégation du CES), 19 mai 2016, 14 octobre 2016 et 29 juin 2017 était la suivante :

Président

M. Christophe PARIS – Professeur des universités, praticien hospitalier (Université de Rennes 1 - Inserm U1085 IRSET – Centre hospitalier universitaire de Rennes). Spécialités : épidémiologie des risques professionnels, pathologies professionnelles, Santé au Travail.

Vice-présidente

Mme Séverine KIRCHNER – Directrice adjointe de la Direction santé confort (Centre scientifique et technique du bâtiment), coordinatrice de l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur – Spécialités : chimie et pollution de l'atmosphère, air intérieur, expologie.

Membres

Mme Armelle BAEZA – Professeur des universités (Université Paris Diderot) – Spécialité : toxicologie.

M. Claude BEAUBESTRE – Chef de département des Activités scientifiques transversales (Service Parisien de Santé Environnementale) - Spécialités : pollution de l'air intérieur, microbiologie.

M. Olivier BLANCHARD – Enseignant chercheur (Ecole des hautes études en santé publique) – Spécialités : évaluation des risques sanitaires, pollution atmosphérique, qualité de l'air intérieur.

Mme Nathalie BONVALLOT – Enseignant chercheur (Ecole des hautes études en santé publique) – Spécialités : toxicologie, évaluation des risques sanitaires.

M. Patrick BROCHARD – Professeur des universités, praticien hospitalier (Université Bordeaux II – Centre hospitalier universitaire de Bordeaux) – Spécialités : médecine du travail, évaluation des risques sanitaires, agents polluants (démission le 15 novembre 2016).

M. Denis CHARPIN – Professeur des universités, praticien hospitalier (Aix Marseille Université) – Spécialités : médecine, agents polluants et allergènes, épidémiologie des risques liés à l'environnement.

M. Jean-Dominique DEWITTE - Professeur des universités, praticien hospitalier (Université de Brest) – Spécialités : Santé travail, pneumologie.

Mme Emilie FREALLE – Praticien hospitalier (Centre hospitalier régional universitaire de Lille) – Spécialités : Ecologie microbienne de l'air, microbiologie analytique, évaluation et prévention du risque microbiologique, surveillance de l'environnement intérieur.

M. Philippe GLORENNEC – Enseignant chercheur (Ecole des hautes études en santé publique – Institut de recherche sur la santé, l'environnement et le travail, UMR Inserm 1085) – Spécialités : évaluation des expositions et des risques sanitaires d'origine chimique. M. Eddy LANGLOIS – Ingénieur, responsable de laboratoire (Institut national de recherche et de sécurité) – Spécialités : métrologie des polluants, air des lieux de travail (santé travail), surveillance et méthodes d'analyse.

Mme Danièle LUCE – Directrice de recherche (Institut national de la santé et de la recherche médicale) – Spécialités : Epidémiologie, santé travail.

Mme Christelle MONTEIL – Enseignant-chercheur (Université de Rouen) – Spécialité : toxicologie.

Mme Anne OPPLIGER – Privat-Docteur & Maître d'Enseignement et de Recherche (Institut universitaire romand de Santé au Travail, Lausanne) – Spécialités : Santé travail, risques biologiques, bioaérosols, agents zoonotiques.

M. Loïc PAILLAT – Ingénieur, responsable technique (Laboratoire Central de la Préfecture de Police) – Spécialités : métrologie des polluants, air intérieur, air ambiant et air des lieux de travail.

Mme Mathilde PASCAL – Chargée de projets (Santé publique France) – Spécialités : épidémiologie, santé environnement, air et climat (démission le 2 janvier 2017).

M. RIVIERE Emmanuel – Directeur délégué (ATMO Grand Est). Spécialités : métrologie, méthodes d'analyse et de surveillance, air ambiant et intérieur, modélisation des émissions, évaluation de l'exposition.

Mme Sandrine ROUSSEL – Ingénieur hospitalier (Centre hospitalier régional universitaire de Besançon) – Spécialités : microbiologie, pathologies respiratoires et allergiques, microorganisme de l'environnement.

M. Rémy SLAMA – Directeur de recherche (Inserm, Institut national de la santé et de la recherche médicale) – Spécialités : épidémiologie environnementale, reproduction et fertilité, santé des enfants, pollution atmosphérique, milieux aériens et environnement, perturbateurs endocriniens

La composition du CES ayant suivi ces travaux à l'occasion des séances du 3 octobre 2017 et du 11 janvier 2018 est la suivante :

Présidente

Mme Rachel NADIF – Chargée de Recherche (INSERM – Directrice adjointe UMR-S 1168) – Spécialité : épidémiologie, santé respiratoire.

Vice-président

M. Christophe PARIS – Professeur des universités, praticien hospitalier (Université de Rennes 1 - Inserm U1085 IRSET – Centre hospitalier universitaire de Rennes). Spécialités : épidémiologie des risques professionnels, pathologies professionnelles, santé au travail.

Membres

Mme Sophie ACHARD – Enseignant chercheur, maître de conférence (Université Paris Descartes) – Spécialité : toxicologie environnementale.

Mme Christina ASCHAN-LEYGONIE – Enseignant-chercheur (Université Lumière Lyon 2 - UMR 5600 Environnement Ville Société - EVS) - Spécialités : géographie, milieux urbains, inégalités de santé.

M. Denis BÉMER – Responsable d'études (Institut national de recherche et de sécurité) – Spécialités : physique et métrologie des aérosols - filtration de l'air.

Mme Valérie BEX – Responsable de la cellule santé habitat (Service parisien de santé environnementale) – Spécialités : métrologie des polluants biologiques, qualité de l'air intérieur.

Mme Nathalie BONVALLOT – Enseignant chercheur (Ecole des hautes études en santé publique) – Spécialités : toxicologie, évaluation des risques sanitaires.

M. Denis CAILLAUD – Professeur des universités, praticien hospitalier (CHU de Clermont-Ferrand) – Spécialités : pneumologie, allergologie, épidémiologie-environnement (pollens, moisissures).

M. Jean-Dominique DEWITTE - Professeur des universités, praticien hospitalier (Université de Brest) – Spécialités : santé travail, pneumologie.

M. Marc DURIF – Responsable de Pôle (Institut national de l'environnement industriel et des risques) – Spécialités : métrologie et méthode d'analyse des polluants de l'air, caractérisation des expositions.

Mme Emilie FREALLE – Praticien Hospitalier (Centre Hospitalier Régional Universitaire de Lille, Institut Pasteur de Lille) – Spécialités : écologie microbienne de l'air, microbiologie analytique, évaluation et prévention du risque microbiologique, surveillance de l'environnement intérieur.

M. Philippe GLORENNEC – Enseignant chercheur (Ecole des hautes études en santé publique – Institut de recherche sur la santé, l'environnement et le travail, UMR Inserm 1085) – Spécialités : évaluation des expositions et des risques sanitaires d'origine chimique.

Mme Ghislaine GOUPIL – Chef de département, adjoint au chef du pôle environnement (Laboratoire Central de la Préfecture de Police) – Spécialités : métrologie des polluants (air intérieur, air ambiant et air des lieux de travail), techniques d'analyses, réglementation air.

Mme Marianne GUILLEMOT – Responsable d'études (Institut national de recherche et de sécurité) – Docteur en Chimie – Spécialités : métrologie, surveillance atmosphérique et des environnements professionnels.

Mme Bénédicte JACQUEMIN – Chargée de recherche (INSERM) – Spécialités : épidémiologie environnementale, pollution atmosphérique.

M. Olivier JOUBERT – Maître de conférences (Université de Lorraine) – Spécialités : toxicologie, sécurité sanitaire.

Mme Danièle LUCE – Directrice de recherche (Institut national de la santé et de la recherche médicale) – Spécialités : Epidémiologie, santé travail.

Mme Corinne MANDIN – Chef de division (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) – Spécialités : évaluation des expositions et des risques sanitaires, environnements intérieurs.

M. Fabien MERCIER – Ingénieur de recherche, Responsable R&D (Ecole des hautes études en santé publique / Laboratoire d'étude et de recherche en environnement et santé) – Spécialités : métrologie des polluants, méthodes d'analyse, air intérieur.

Mme Christelle MONTEIL – Enseignant-chercheur (Université de Rouen Normandie) – Spécialité : toxicologie.

Mme Anne OPPLIGER – Privat-Doctent & Maître d'Enseignement et de Recherche (Institut universitaire romand de Santé au Travail, Lausanne) – Spécialités : Santé travail, risques biologiques, bioaérosols, agents zoonotiques.

M. Pierre PERNOT – Responsable de service (Airparif) – Spécialités : surveillance et réglementation de la qualité de l'air.

Mme Chantal RAHERISON - Professeur des universités, praticien hospitalier (Université de Bordeaux) – Spécialités : pneumologie, allergologie, épidémiologie [Participation jusqu'au 7 novembre 2018]

PARTICIPATION ANSES

Coordination et contribution scientifique

M. Matteo REDAELLI – Direction de l'évaluation des risques

M. Anthony BRASSEUR – Direction de l'évaluation des risques (jusqu'au 19 décembre 2017)

Mme Charlotte LÉGER – Direction de l'évaluation des risques (à partir du 18 janvier 2018)

Secrétariat administratif

Mme Sophia SADDOKI

AUDITION DE PERSONNALITÉS EXTÉRIEURES

Association for Emissions Control by Catalyst (AECC) – 23 novembre 2016

M. Dirk BOSTEELS – Directeur Général AECC

Mme Cécile FAVRE – Technology and Communications Manager

Comité des constructeurs français d'automobile (CCFA) – 15 novembre 2016

M. Pierre MACAUDIERE : Maître-Expert Systèmes de Dépollution et Carburants chez PSA Groupe

Mme Martine MEYER : Expert leader Qualité de l'air et substances chez Renault

M. Nicolas LE BIGOT : Directeur Affaires Environnementales et Techniques chez CCFA

Chambre Syndicale Internationale de l'Automobile et du Motocycle (CSIAM) – 15 novembre 2016

M. Thierry ARCHAMBAULT : Président-Délégué CSIAM

M. Hassan KHAZZANI : Directeur service après-vente TRIUMPH

Fédération des Industries des Equipements pour Véhicules (FIEV) – 23 novembre 2016

M. Hugues BOUCHER : Ingénieur innovation et environnement

France Nature Environnement (FNE) – 1^{er} décembre 2016

Mme Anne LASSMAN-TRAPPIER

RESPIRE – 1^{er} décembre 2016

M. Sébastien VRAY

Association pour la prévention de la pollution atmosphérique (APPA) – 1^{er} décembre 2016

Mme Isabelle ROUSSEL

CONTRIBUTIONS EXTÉRIEURES AU(X) COLLECTIF(S)

Étude de l'impact sur la pollution atmosphérique des technologies et de la composition du parc de véhicules automobiles circulant en France ; convention de recherche et développement ANSES / Airparif / CEREPA / CITEPA / IFSTTAR n°2016-CRD-04

Étude multi-sites des variations du potentiel oxydant des PM atmosphériques en France, en liaison avec leur chimie et leurs sources (ExPOSURE) ; convention de recherche et développement ANSES / CNRS (agissant pour le compte du laboratoire IGE, UMR 5001) n°2016-CRD-31

SOMMAIRE

Présentation des intervenants	3
Sigles et abréviations	14
Liste des tableaux	16
Liste des figures	18
1 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'expertise	22
1.1 Contexte	22
1.2 Objet de la saisine	23
1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation	24
1.4 Prévention des risques de conflits d'intérêts.	25
2 Introduction et objectifs	26
3 État des lieux de la pollution de l'air ambiant extérieur par les particules et par le trafic routier, et analyse rétrospective en France et Île-de-France	29
3.1 État des lieux de la pollution de l'air ambiant extérieur par les particules et par le trafic routier	29
3.1.1 Pollution de l'air ambiant par les particules	29
3.1.1.1 Enjeux sanitaires	29
3.1.1.2 Origines de la pollution particulaire	31
3.1.2 Pollution de l'air par le trafic routier	35
3.1.2.1 Enjeux sanitaires	35
3.1.2.2 Enjeux de l'exposition à la pollution de l'air liée au trafic routier.....	36
3.1.3 Émissions de polluants et spécificités du trafic	38
3.1.3.1 Inventaire des émissions de polluants.....	38
3.1.3.2 Émissions des véhicules et technologies	40
3.1.3.3 Émissions d'hydrocarbures aromatiques polycycliques par le trafic routier.....	41
3.2 Analyse rétrospective : la France métropolitaine	42
3.2.1 Contexte	42
3.2.2 Analyse rétrospective	44
3.2.2.1 Parc automobile et trafic routier en France métropolitaine	44
3.2.2.2 Émissions en France métropolitaine entre 1990 et 2014	47
3.2.2.3 Qualité de l'air en France métropolitaine depuis 2000	50
3.3 Analyse rétrospective : la région Île-de-France	53
3.3.1 Contexte	53
3.3.2 Analyse rétrospective	55
3.3.2.1 Situation actuelle	55
3.3.2.2 Évolution du trafic routier en Île-de-France	55
3.3.2.3 Évolution des émissions en Île-de-France entre 2000 et 2012.....	57
3.3.2.4 Évolution de la qualité de l'air en Île-de-France depuis 2000	58
3.4 Conclusions	59
3.4.1 France métropolitaine.....	59
3.4.2 Île-de-France	61
4 Hypothèses et méthodes de travail	63

4.1	Approche méthodologique et scénarios	63
4.1.1	Schémas de principe des simulations	65
4.1.2	Principales hypothèses des simulations des émissions et des concentrations de polluants	67
4.1.3	Scénarios de trafic et de composition du parc	68
4.2	Méthode d'élaboration des scénarios de parc automobile	71
4.2.1	Principes généraux de l'élaboration des scénarios	71
4.2.2	Méthode d'élaboration des compositions de parc	72
4.2.2.1	Données de référence et structure de la composition du parc	72
4.2.2.2	Transformations des compositions de parc	73
4.2.3	Parcs de référence (scénario Référence ou REF)	73
4.2.3.1	Parc de référence pour l'Île-de-France	73
4.2.3.2	Parc de référence pour la France métropolitaine	75
4.2.4	Scénario FAP (ou S1) - forte proportion de filtres à particules sur les véhicules Diesel	77
4.2.4.1	Formulation des hypothèses	77
4.2.4.2	Compositions du parc du scénario FAP (S1)	77
4.2.5	Variante : Scénario FAP (S1) avec deux-roues électriques (ou S1-2R élec)	78
4.2.6	Scénario Essence (ou S2) - recul fort des motorisations Diesel des véhicules légers au profit d'essence	78
4.2.6.1	Formulation des hypothèses	78
4.2.6.2	Compositions du parc du scénario Essence (S2)	79
4.2.7	Scénario Technologies Alternatives - Promotion marquée des motorisations alternatives (électriques)	79
4.2.7.1	Formulation des hypothèses	80
4.2.7.2	Compositions du parc du scénario Technologies alternatives	80
4.2.8	Scénario Ambition Air - Diminution du trafic et promotion des véhicules électriques dans la zone urbanisée intra-A86	81
4.2.8.1	Formulation des hypothèses	81
4.2.8.2	Compositions du parc du scénario Ambition Air	81
4.3	Émissions de polluants des secteurs d'activités autres que le trafic	82
4.3.1	Inventaire des émissions en Île-de-France	82
4.3.2	Inventaires des émissions pour la France	83
4.4	Émissions de polluants du trafic routier – Île-de-France	85
4.4.1	Méthode de calcul des émissions et facteurs d'émission	86
4.4.2	Estimation des flux de trafic routier sur le réseau francilien	87
4.4.2.1	Modèle et données de trafic	87
4.4.2.2	Répartition temporelle des trafics	87
4.4.3	Composition du parc automobile en Île-de-France	88
4.5	Émissions de polluants du trafic routier – France métropolitaine	88
4.6	Simulation des concentrations de polluants	90
4.6.1	Présentation du modèle de qualité de l'air Polair3D/Polyphemus	90
4.6.1.1	Modélisation des espèces gazeuses	90
4.6.1.2	Modélisation des espèces semi-volatiles, en phases particulaire et aqueuse	91
4.6.2	Paramètres et données d'entrée des simulations	91
4.7	Expression des résultats, indicateurs	94

4.7.1 Polluants retenus	94
4.7.2 Écarts en émissions et en concentrations	95
4.7.3 Niveaux de concentrations PM _{2,5} versus valeurs guides OMS	95
4.7.4 Résultats globaux et locaux, et variabilité temporelle	97
4.7.5 Résultats en nombres de personnes exposées	97
4.7.6 Intensité relative d'émission	97
5 Scénarios technologiques prospectifs en Île-de-France	99
5.1 Parcs et émissions spécifiques du trafic selon les scénarios	99
5.1.1 Composition du parc automobile en Île-de-France selon les scénarios.....	99
5.1.2 Émissions spécifiques (par km) du trafic selon les scénarios	101
5.2 Émissions de polluants	102
5.2.1 Scénario de référence : diagnostic et enjeux	102
5.2.1.1 Contributions du trafic aux émissions totales de polluants en Île-de-France	102
5.2.1.2 Émissions de polluants primaires du trafic	103
5.2.1.3 Répartition géographique et « intensité » des émissions de polluants	106
5.2.2 Évolution des émissions totales du trafic selon les scénarios.....	107
5.2.2.1 Évolution des émissions du trafic sur l'Île-de-France	107
5.2.2.2 Évolution des émissions en intra-A86	108
5.2.3 Comparaison des options technologiques	110
5.2.4 Effet du renouvellement du parc sur les émissions des scénarios	112
5.2.5 Comparaison de l'évolution simulée des émissions du trafic avec l'évolution rétrospective observée entre 2000 et 2012.....	113
5.2.6 Évolution des émissions en tenant compte des autres secteurs	114
5.3 Évolution des concentrations de polluants.....	118
5.3.1 Éléments de validation des calculs.....	119
5.3.2 Importance du régime chimique	120
5.3.3 Évolution des concentrations moyennes annuelles et variations spatiales.....	121
5.3.4 Analyses mensuelles et par territoire	129
5.4 Expositions (croisement population / concentrations)	132
5.5 Comparaison avec d'autres travaux (études d'impacts).....	135
5.5.1 Plan de déplacements urbains de l'Île-de-France	135
5.5.2 Zone de restriction de circulation - ZAPA intra-A86	136
5.6 Conclusions.....	137
6 Scénarios technologiques prospectifs en France et pour des régions contrastées	139
6.1 Émissions annuelles totales de polluants (tous secteurs) dans le scénario de référence	139
6.1.1 Variabilité régionale de l'inventaire national d'émissions	139
6.1.2 Émissions nationales selon les secteurs	141
6.2 Parcs et émissions de polluants selon les scénarios	141
6.2.1 Compositions du parc automobile national selon les scénarios.....	141
6.2.2 Facteurs d'émission du trafic selon les scénarios	142
6.2.3 Évolution des émissions nationales des principaux polluants.....	144
6.2.4 Synthèse des émissions des polluants intervenant dans la simulation des concentrations	145
6.3 Concentrations de polluants.....	145

6.3.1	Validation des simulations	146
6.3.2	Étude des régimes chimiques	146
6.3.3	Concentrations moyennes annuelles	148
6.4	Conclusions.....	158
7	Avantages et limites de l'approche, et incertitudes	160
7.1	Avantages et limites de l'approche	160
7.1.1	Simulation des émissions et des concentrations de polluants	160
7.1.2	Approche par scénarios dans un contexte invariant	161
7.1.2.1	Émissions constantes des autres secteurs	161
7.1.2.2	Autres invariants des scénarios	162
7.1.2.3	Simulation sur des données statistiques annuelles d'activité	162
7.1.3	Avantages et limites liés aux modèles	162
7.1.3.1	Modèle d'émissions de polluants du trafic.....	162
7.1.3.2	Estimation des émissions des autres secteurs.....	166
7.1.3.3	Modèles d'estimation des concentrations de polluants	166
7.1.4	Pollution de proximité et exposition	166
7.1.4.1	Pollution de proximité et pollution de fond.....	166
7.1.4.2	Exposition.....	167
7.1.5	Positionnement et apports méthodologique des travaux du PREPA.....	167
7.2	Incertitudes.....	168
7.2.1	Éléments sur les incertitudes des facteurs d'émissions du trafic routier.....	168
7.2.2	Éléments sur les incertitudes constatées dans les exercices d'inventaire national des émissions du transport et des autres secteurs	170
7.2.3	Autres indications relatives aux incertitudes des calculs d'émissions.....	171
7.2.4	Incertitudes liées aux données d'entrée des simulations	171
7.2.4.1	Les données contextuelles.....	172
7.2.4.2	Les données variables avec les scénarios	172
7.2.5	Autres paramètres d'incertitude.....	173
7.3	Analyses spécifiques et de sensibilité.....	174
7.3.1	Sensibilité aux facteurs d'émission - cas des NOx et NO ₂	174
7.3.1.1	Facteurs d'émission de NOx	174
7.3.1.2	Facteurs d'émission de NO ₂	175
7.3.2	Sensibilité des simulations au schéma de COSV	176
7.3.2.1	Méthodologie alternative pour l'estimation des émissions de COSV à partir du rapport COSV/NMHC	176
7.3.2.2	Les émissions de COSV	178
7.3.2.3	Les concentrations	180
7.3.3	Analyses complémentaires à envisager.....	182
7.4	Discussion / conclusions	182
8	Conclusions.....	184
8.1	Outils et scénarios	184
8.2	Émissions de polluants (quantités annuelles, t/an).....	185
8.3	Concentrations de polluants (moyennes annuelles et valeurs élevées ou « pics »)..	186
8.4	Exposition de la population	189
8.5	Analyse rétrospective.....	190
8.6	Synthèse des résultats	191
9	Bibliographie	195

ANNEXES	203
Annexe 1 : Lettre de saisine	204
Annexe 2 : Évolution des émissions atmosphériques de PM10, HAP, COVNM, CO, Pb, Cu et NH₃, par secteur en France métropolitaine de 1990 à 2014	207
Annexe 3 : Principes détaillés de construction des compositions de parc automobile	214
Annexe 4 : Compositions détaillées du parc automobile en Île-de-France (situation de référence).....	216
Annexe 5 : Compositions du parc automobile en Île-de-France selon les scénarios	219
Annexe 6 : Facteurs d'émission du parc automobile des voitures particulières en Île-de-France selon les scénarios	224
Annexe 7 : Facteurs d'émission agrégés par catégories de véhicules, du parc automobile en Île-de-France selon les scénarios	234
Annexe 8 : Répartition géographique des émissions en Île-de-France.....	244
Annexe 9 : Estimation du parc national de référence	246
Annexe 10 : Compositions détaillées du parc roulant national selon les scénarios	249
Annexe 11 : Facteurs d'émission des véhicules routiers pour la France et selon les scénarios	252
Annexe 12 : Cartographie des émissions tous secteurs, maillage EMEP sur la France	262
Annexe 13 : Plan National de Réduction des Émissions de Polluants Atmosphériques (PREPA) - Analyse bibliographique	265

Sigles et abréviations

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

Airparif : Observatoire de la qualité de l'air de la région d'Île-de-France

AOS : aérosols organiques secondaires

CEREA : Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique

CITEPA : Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique

CO : monoxyde de carbone

CO₂ : dioxyde de carbone

COPERT : COmputer Program to calculate Emission from Road Transport

COSV : composés organiques semi-volatils

COV : composés organiques volatils

COVNM : composés organiques volatils non méthaniques

DiRIF : Direction des routes Île-de-France

EC : carbone élémentaire

EEA : Agence Européenne de l'environnement

EGR : Exhaust gas recirculation

EGT : Enquête Globale Transport

EMEP : European Monitoring and Evaluation Programme

FAP : filtre à particules

GPL : gaz de pétrole liquéfié

HAP : hydrocarbure aromatique polycyclique

HGV : *Heavy Goods Vehicle*

IFSTTAR : Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux

IGE : Institut des géosciences et de l'environnement

INERIS : Institut national de l'environnement industriel et des risques

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

NH₃ : ammoniac

NO_x : oxydes d'azotes

OM : matière organique

PL : Poids lourds

PM : Matière particulaire (famille regroupant les émissions massiques des différentes tailles de particules)

PM₁₀ : Particules dont le diamètre aérodynamique médian est inférieur à 10 µm.

PM_{2,5} : Particules dont le diamètre aérodynamique médian est inférieur à 2,5 µm.

PM_{2,5-10} : Particules dont le diamètre aérodynamique médian est compris entre 2,5 µm et 10 µm.

PN : particules en nombre

SCR : *Selective Catalytic Reduction*

SO₂ : dioxyde de soufre

SO_x : oxydes de soufre

TC : Transport collectif (Bus et cars)

TSP : *total suspended particles*

VG-OMS_{CT} : Seuil des concentrations moyennes 24 heures de PM_{2,5} (seuil court terme) établi à partir de la valeur guide journalière de qualité de l'air ambiant de l'OMS pour les PM_{2,5}.

VG-OMS_{LT} : Seuil des concentrations moyennes annuelles de PM_{2,5} (seuil long terme) établi à partir de la valeur guide annuelle de qualité de l'air ambiant de l'OMS pour les PM_{2,5}.

VP : Voitures particulières

VUL : Véhicules utilitaires légers

2R : Deux-roues à moteur thermique

Liste des tableaux

Tableau 1 : Nomenclature EMEP des secteurs d'activités de l'inventaire des émissions polluantes	40
Tableau 2 : Principaux périmètres en Île-de-France et répartition des populations et réseaux routiers (estimation à partir des données de simulation).....	54
Tableau 3 : Scénarios de composition du parc et leurs hypothèses	69
Tableau 4 : Compositions du parc roulant urbain Île-de-France, voitures particulières et véhicules utilitaires légers, scénarios de référence (2014) et FAP (S1)	77
Tableau 5 : Compositions du parc roulant urbain Île-de-France, véhicules légers, scénario de référence (2014) et sous différentes hypothèses de décroissance des immatriculations Diesel à 2025	79
Tableau 6 : Compositions du parc roulant urbain Île-de-France, véhicules particuliers et utilitaires légers, scénario de référence (2014) et scénario Essence (S2, fort repli des immatriculations Diesel).....	79
Tableau 7 : Compositions du parc roulant urbain Île-de-France, véhicules légers, scénarios de référence (2014) et Technologies Alternatives (promotion des motorisations électriques en urbain)	80
Tableau 8 : Hypothèses et compositions du parc roulant du scénario « Ambition Air » (réduction du trafic et promotion des motorisations électriques en urbain / intra-A86)	82
Tableau 9 : Répartition des émissions liées à l'abrasion selon la taille des particules (Source COPERT 4)	87
Tableau 10 : Spéciations des NOx en % utilisées pour les différentes simulations.....	93
Tableau 11 : Spéciations des particules en % utilisées pour les différentes simulations	93
Tableau 12 : Seuils P98 réf - 98 ^{ème} percentile des concentrations horaires simulées par le scénario de référence (en µg/m ³ sauf pour le nombre de particules en nombre/cm ³)	95
Tableau 13 : Seuils VG-OMS _{LT} et VG-OMS _{CT} utilisés pour les concentrations PM _{2,5} (en µg/m ³)	95
Tableau 14 : Synthèse des normes de qualité de l'air ambiant en PM _{2,5} (adapté de Anses (2017)).....	96
Tableau 15 : Comparaisons des compositions moyennes du parc automobile en circulation en Île-de-France selon les différents scénarios	100
Tableau 16 : Facteurs d'émission moyens du trafic, polluants gazeux, sur l'ensemble de l'Île-de-France selon les scénarios	101
Tableau 17 : Facteurs d'émission moyens du trafic, polluants particulaires, sur l'ensemble de l'Île-de-France selon les scénarios	101
Tableau 18 : Émissions annuelles de polluants gazeux en Île-de-France et contribution du trafic.....	102
Tableau 19 : Émissions annuelles de polluants particulaires en Île-de-France et contribution du trafic.....	102
Tableau 20 : Bilan annuel et répartition des trafics et émissions - polluants gazeux.....	103
Tableau 21 : Bilan annuel et répartition des trafics et émissions - polluants particulaires.....	103
Tableau 22 : Contribution des technologies et réglementations aux émissions du trafic en Île-de-France	104
Tableau 23 : Émissions de démarrage à froid.....	104
Tableau 24 : Répartition des émissions de particules selon les phénomènes	106
Tableau 25 : Répartition géographique des trafics et émissions annuels	106
Tableau 26 : Trafics et émissions annuelles selon les scénarios - Île-de-France - polluants gazeux.....	107
Tableau 27 : Émissions annuelles selon les scénarios - Île-de-France - polluants particulaires	107
Tableau 28 : Trafics et émissions annuelles selon les scénarios - intra-A86 - polluants gazeux	109
Tableau 29 : Émissions annuelles selon les scénarios - intra-A86 - polluants particulaires.....	109
Tableau 30 : Comparaison des scénarios par rapport au scénario fil de l'eau FAP (S1) - polluants gazeux	110
Tableau 31 : Comparaison des scénarios par rapport au scénario fil de l'eau FAP (S1) - polluants particulaires.....	111
Tableau 32 : Contributions respectives de l'option technologique et du renouvellement de parc sur les émissions du trafic entre les scénarios FAP (S1) et Essence (S2) - Île-de-France	113
Tableau 33 : Émissions en tonnes/an sur l'Île-de-France pour la simulation de référence ainsi que pour les différents scénarios. Pour chaque scénario, les variations par rapport à la simulation de référence en % sont détaillées ...	114
Tableau 34 : Statistiques de comparaisons aux mesures pour O ₃ et NO ₂	119
Tableau 35 : Statistiques de comparaisons aux mesures pour PM ₁₀ , PM _{2,5} , BC et OM	119
Tableau 36 : Statistiques des concentrations pour les différents scénarios – Île-de-France (en µg/m ³ , sauf pour le nombre de particules PNC en #/cm ³)	127
Tableau 37 : Évolution des émissions de polluants du trafic selon le rapport environnemental du plan de déplacement urbain de l'Île-de-France (STIF 2012).....	135

Tableau 38 : Évolution des émissions de polluants du trafic en Île -de-France dans le cas de la mise en œuvre d'une zone de restriction pour l'air (Airparif 2012c, APUR 2012)	136
Tableau 39 : Émissions (en tonnes) de la France pour l'année 2013 (édition 2016) par grands secteurs - Polluants gazeux (haut) et particulaires (bas) (source CITEPA).....	141
Tableau 40 : Composition moyenne du parc automobile en circulation en France selon les différents scénarios et comparaison à la composition moyenne du parc en circulation en Île-de-France	142
Tableau 41 : Facteurs d'émission moyens du trafic national, polluants gazeux, selon les scénarios.....	143
Tableau 42 : Facteurs d'émission moyens du trafic national, polluants particulaires, selon les scénarios	143
Tableau 43 : Émissions du transport routier et totales en France, avec le scénario FAP (S1) - polluants gazeux (en tonnes)	144
Tableau 44 : Émissions du transport routier et totales en France, avec le scénario FAP (S1) - Particules et SOx (en tonnes)	144
Tableau 45 : Émissions du transport routier et totales en France, avec le scénario Essence (S2) - polluants gazeux (en tonnes).....	144
Tableau 46 : Émissions du transport routier et totales en France, avec le scénario Essence (S2) – Particules et SOx (en tonnes).....	144
Tableau 47 : Émissions en tonnes/an sur la France pour la simulation de référence ainsi que pour les différents scénarios (hors secteur 11) du black carbone, de la matière organique et des composés organiques semi-volatils. Pour chaque scénario, les variations par rapport à la simulation de référence en % sont détaillées	145
Tableau 48 : Statistiques de comparaisons aux mesures pour O ₃ et NO ₂	146
Tableau 49 : Statistiques de comparaisons aux mesures pour PM ₁₀ et PM _{2,5}	146
Tableau 50 : Statistiques des concentrations pour les différents scénarios – France métropolitaine (en µg/m ³ , sauf pour le nombre de particules PNC en #/cm ³)	153
Tableau 51 : Appréciation qualitative des facteurs d'émission à l'échappement de la méthodologie COPERT et du Guidebook pour les calculs d'émissions du trafic routier (EEA 2016).....	168
Tableau 52 : Appréciation qualitative des facteurs d'émission de particules de la méthodologie COPERT et du Guidebook pour les calculs d'émissions du trafic routier (EEA 2016).....	169
Tableau 53 : Incertitudes sur les ratios BC/PM ₁₀ et OC/BC de la méthodologie COPERT et du Guidebook pour les calculs d'émissions du trafic routier (EEA 2016).....	169
Tableau 54 : Estimation des incertitudes des inventaires des émissions anthropiques totales de polluants atmosphériques utilisant la méthode TIER1 de la méthodologie européenne	171
Tableau 55 : Évolution des facteurs d'émission de NOx entre les éditions 2013 et 2016 du guide méthodologique	175
Tableau 56 : Évolution des émissions sur la France (pour la référence, le scénario FAP (S1) et le scénario Essence (S2)), par rapport aux émissions présentées dans ce rapport, en appliquant les mises à jour des facteurs d'émission de NOx et de NO ₂	175
Tableau 57 : Répartition des émissions des véhicules Diesel sans filtre en classes de volatilité.....	177
Tableau 58 : Répartition des émissions des véhicules essence en classes de volatilité.....	177
Tableau 59 : Répartition des émissions des véhicules Diesel avec filtre en classes de volatilité.....	177
Tableau 60 : Formules utilisées pour la détermination des espèces selon les classes de volatilité.....	177
Tableau 61 : Synthèse de l'impact des scénarios sur les émissions des polluants particulaires et gazeux du trafic routier	192
Tableau 62 : Synthèse de l'impact des scénarios sur les concentrations des polluants particulaires et gazeux.....	193

Liste des figures

Figure 1 : Sélection d'épisodes de pollution aux PM ₁₀ d'ampleur nationale depuis 2013 (CGDD, 2017).....	31
Figure 2 : Contributions annuelles moyennes des principaux facteurs constitutifs des PM ₁₀ en fond urbain à l'échelle nationale (Moyenne des résultats obtenus par analyse PMF harmonisée sur 10 sites de fond urbain (ADEME 2018, LCSQA, Ineris, and IGE 2017a)	32
Figure 3 : Contributions relatives moyennes annuelles aux PM ₁₀ des facteurs identifiés pour chacun des 15 sites. La couleur du fond indique la typologie du site : jaune pour urbain, rose pour trafic, marron pour vallée alpine et vert pour rural (ADEME 2018, LCSQA, Ineris, and IGE 2017b)	33
Figure 4 : Contributions relatives moyennes annuelles au PO (DTTv, AAv) et à la masse des PM ₁₀ (PM _{2,5} pour le site ANDRA) des facteurs identifiés pour chacun des 8 sites (2016-CRD-31)	35
Figure 5 : Mise en perspective des kilomètres parcourus et des émissions de PM ₁₀ selon les normes Euro pour les véhicules particuliers Diesel d'après l'estimation du parc national 2013 du CITEPA (CITEPA/Ominea 2016a).....	40
Figure 6 : Zonage en aires urbaines de la France (INSEE 2011).....	43
Figure 7 : Variation annuelle de la densité de la population entre 1982 et 2011 (INSEE 2014).....	43
Figure 8 : Occupation des sols de la France métropolitaine selon la nomenclature Corine Land Cover 2012 (données CGDD, 2015).....	44
Figure 9 : Évolution du parc roulant en France métropolitaine en milliards de véhicules x kilomètres (CITEPA/Secten 2016)	45
Figure 10 : Évolution du parc statique (nombre de véhicules) en France métropolitaine (CITEPA/Ominea 2016b)	46
Figure 11 : Évolution du taux de diésélisation des voitures en Europe occidentale en % des immatriculations totales (CCFA 2017)	47
Figure 12 : Émissions atmosphériques de PM _{2,5} par secteur en France métropolitaine (gauche). Émissions du transport routier par type de véhicule/motorisation (haut droit). Répartition des émissions du transport routier en 1990 et 2014 (bas droit) (CITEPA/Secten 2016)	48
Figure 13 : Émissions atmosphériques de carbone suie par secteur en France métropolitaine. (CITEPA/Secten 2016)	48
Figure 14 : Émissions atmosphériques de NOx par secteur en France métropolitaine (gauche). Émissions du transport routier par type de véhicule/motorisation (haut droit). Répartition des émissions du transport routier en 1990 et 2014 (bas) (CITEPA/Secten 2016)	49
Figure 15 : La situation des agglomérations françaises en 2017 vis-à-vis des normes sanitaires de PM ₁₀ (CGDD 2018b)	51
Figure 16 : Évolution des concentrations moyennes annuelles en PM _{2,5} à proximité du trafic routier et en fond urbain sur la période 2009-2017 (Adapté de CGDD (2018b))	51
Figure 17 : Évolution des concentrations en SO ₂ , NO ₂ , O ₃ et PM ₁₀ entre 2000 et 2017 (CGDD 2018a)	52
Figure 18 : Évolution des émissions en SO ₂ , NOx, NH ₃ , PM ₁₀ et Cd entre 2000 et 2017 (CGDD 2018a)	52
Figure 19 : Les dépassements des normes pour la protection de la santé dans les agglomérations pour O ₃ , NO ₂ et PM ₁₀ (CGDD 2018a).....	53
Figure 20 : Occupation du sol en Île-de-France à partir des données Corine-Land-Cover 2006	54
Figure 21 : Réseau routier pris en compte pour le calcul des émissions liées au trafic routier (Source : DRIEA – traitement et image Airparif)	54
Figure 22 : Contribution par secteur aux émissions de particules PM ₁₀ en Île-de-France pour l'année 2012 (Airparif 2012b)	55
Figure 23 : Résumé concernant les déplacements en voiture particulière en Île-de-France en 2001 et 2010 – Enquête Globale Transport 2010	56
Figure 24 : Évolution de l'usage des réseaux routiers entre 2010 et 2014 – Données STIF à partir de données RATP, SNCF, Optile, DiRIF, départements et Ville de Paris.....	56
Figure 25 : Évolution de la répartition en véhicules x kilomètres du trafic routier modélisé en Île-de-France entre 2000 et 2012 – Traitement Airparif, données Ville de Paris et DiRIF.....	56
Figure 26 : Évolution des émissions de PM ₁₀ du transport routier en Île-de-France entre 2000 et 2012	57
Figure 27 : Évolution des émissions de NOx du transport routier en Île-de-France entre 2000 et 2012	57
Figure 28 : Évolution des émissions de HAP (somme de 8 HAP) du transport routier en Île-de-France entre 2000 et 2012	58
Figure 29 : Évolution des concentrations moyennes sur 3 ans en fond et en proximité du trafic en particules PM ₁₀ (en haut) et PM _{2,5} (en bas), de 1999-2001 à 2013-2015 dans l'agglomération parisienne et à proximité du Boulevard Périphérique, en estimant les moyennes avant 2007 pour intégrer la fraction volatile	59
Figure 30 : Schéma de principe de l'approche	63

Figure 31 : Schéma conceptuel de simulation des émissions et concentrations de polluants pour la France (en haut) et pour l'Île-de-France (en bas) et renvoi aux sections correspondantes pour la description des méthodes et outils (dans ce chapitre) et pour les résultats (chapitres suivants).....	66
Figure 32 : Comparaisons des compositions du parc roulant en Île-de-France (en % des véhicules x km) selon les scénarios - distribution selon les motorisations et les réglementations en émissions (pré-Euro-5 et véhicules récents ou électriques), pour les véhicules légers (voitures + véhicules utilitaires légers).....	70
Figure 33 : Parc roulant des jours ouvrés (JO) sur les axes parisiens selon les heures de la journée (année 2014)	74
Figure 34 : Part du kilométrage parcouru selon les technologies au sein de l'ensemble des VP, des TC, des VUL, PL et 2RM en Île-de-France en 2014.....	75
Figure 35 : Logigramme du processus d'estimation des données de composition de parcs et de distribution du trafic nécessaires au calcul des émissions selon la méthodologie COPERT4	76
Figure 36 : Répartition du trafic selon les technologies au sein de l'ensemble des VP, des VUL, des PL, des TC et des 2RM en France en 2013.....	77
Figure 37 : Cartographie des émissions de NOx, COVNM et PM ₁₀ en Île-de-France pour l'année 2012.....	83
Figure 38 : Principe de spatialisation de la soumission 2016 de l'inventaire 2013 et principales évolutions entre les soumissions 2015 et 2016	84
Figure 39 : Représentation cartographique de l'inventaire national des émissions de polluants de l'année 2013 (et situation de référence) - Cas des NOx, PM ₁₀ , COVNM et CO	84
Figure 40 : Schéma de principe de l'évaluation des émissions routières dans le système HEAVEN.....	85
Figure 41 : Profils mensuels (a) et hebdomadaires (b) du trafic routier, par zone (Paris intra-muros, Bd Périphérique, autoroutes et routes)	88
Figure 42 : Principe de spatialisation des émissions des différents scénarios sur la grille EMEP.....	89
Figure 43 : Représentation cartographique des différences absolues (gauche) et relatives (droite) des émissions de polluants entre le scénario FAP (S1 - forte proportion de véhicules Diesel équipés de filtres à particules) et la situation de référence - Cas des SOx et NH ₃	89
Figure 44 : Carte des trois domaines utilisés pour les simulations.....	92
Figure 45 : Répartition des émissions de COV selon les émissions à chaud, à froid et par évaporation (hors stationnement) pour les seuls véhicules particuliers et dans le bilan global tous véhicules	105
Figure 46 : Émissions annuelles du trafic (t/an) de PM ₁₀ , PM _{2,5} , BC, COVNM, NOx et trafic (véhicules x kilomètres) : différences relatives (en %) entre les scénarios prospectifs et le scénario de référence (axe horizontal), Île-de-France	108
Figure 47 : Évolution du trafic et de ses émissions annuelles avec les scénarios - en intra-A86	110
Figure 48 : Comparaison du trafic et de ses émissions annuelles de PM ₁₀ , PM _{2,5} , BC, COVNM, NOx : Différences relatives (en %) entre les scénarios prospectifs et le scénario au fil de l'eau FAP (S1), Île-de-France (haut) et intra-A86 (bas)	112
Figure 49 : Évolution rétrospective des émissions de particules PM ₁₀ du trafic routier entre 2000 et 2012, et comparaison avec les émissions calculées pour l'année 2025 avec les scénarios FAP (S1) et Essence (S2).....	114
Figure 50 : Évolution des émissions annuelles totales tous secteurs d'activité, avec les scénarios - Île-de-France	115
Figure 51 : Évolution des émissions annuelles du trafic et tous secteurs d'activité avec les scénarios - Île-de-France..	115
Figure 52 : Émissions annuelles en tonnes par an de NOx sur l'Île-de-France (en haut à gauche). Différences relatives entre les émissions annuelles du scénario FAP (S1) et les émissions annuelles de la simulation de référence en % (en haut à droite). Différences relatives entre les émissions annuelles des scénarios Essence (S2) et S1-2R élec (FAP moins émissions des deux-roues) et les émissions annuelles du scénario FAP (S1) en % (en bas).....	116
Figure 53 : Émissions annuelles en tonnes par an de COV sur l'Île-de-France (en haut à gauche). Différences relatives entre les émissions annuelles du scénario FAP (S1) et les émissions annuelles de la simulation de référence en % (en haut à droite). Différences relatives entre les émissions annuelles des scénarios Essence (S2) et S1 – 2R élec et les émissions annuelles du scénario FAP (S1) en % (en bas)	117
Figure 54 : Émissions annuelles en tonnes par an de COSV sur l'Île-de-France (en haut à gauche). Différences relatives entre les émissions annuelles du scénario FAP (S1) et les émissions annuelles de la simulation de référence en % (en haut à droite). Différences relatives entre les émissions annuelles des scénarios Essence (S2) et S1 – 2R élec et les émissions annuelles du scénario FAP (S1) en % (en bas)	118
Figure 55 : Régimes chimiques pour l'ozone. Isopleths d'ozone (isovaleurs, typiquement de concentration maximale horaire) en fonction des concentrations de NOx et de COV. [COV]/[NOx] ≈ 8 : situation américaine	120
Figure 56 : Rapport des concentrations de COV/NOx pour la simulation de référence	121
Figure 57 : Rose des vents pour l'année 2014.....	121
Figure 58 : Concentrations moyennes annuelles en µg/m ³ de l'O ₃ sur l'Île-de-France (en haut à gauche). Différences relatives entre les concentrations annuelles du scénario FAP (S1) et les concentrations annuelles de la simulation	

de référence en % (en haut à droite). Différences relatives entre les concentrations annuelles des scénarios Essence (S2) et S1 – 2R élec et les concentrations annuelles du scénario FAP (S1) en % (en bas).....	122
Figure 59 : Concentrations moyennes annuelles en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ des $\text{PM}_{2,5}$ sur l'Île-de-France (en haut à gauche). Différences relatives entre les concentrations annuelles du scénario FAP (S1) et les concentrations annuelles de la simulation de référence en % (en haut à droite). Différences relatives entre les concentrations annuelles des scénarios Essence (S2) et S1 – 2R élec et les concentrations annuelles du scénario FAP (S1) en % (en bas).....	123
Figure 60 : Concentrations moyennes annuelles en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de BC sur l'Île-de-France (en haut à gauche). Différences relatives entre les concentrations moyennes du scénario FAP (S1) et les concentrations de la simulation de référence en % (en haut à droite). Différences relatives entre les concentrations annuelles des scénarios Essence (S2) et S1 – 2R élec et les concentrations annuelles du scénario FAP (S1) en % (en bas).....	124
Figure 61 : Concentrations moyennes annuelles en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ des inorganiques sur l'Île-de-France (en haut à gauche). Différences relatives entre les concentrations moyennes du scénario FAP (S1) et les concentrations de la simulation de référence en % (en haut à droite). Différences relatives entre les concentrations annuelles des scénarios Essence (S2) et S1 – 2R élec et les concentrations annuelles du scénario FAP (S1) en % (en bas).....	125
Figure 62 : Concentrations moyennes annuelles en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ des organiques sur l'Île-de-France (en haut à gauche). Différences relatives entre les concentrations moyennes du scénario FAP (S1) et les concentrations de la simulation de référence en % (en haut à droite). Différences relatives entre les concentrations annuelles des scénarios Essence (S2) et S1 – 2R élec et les concentrations annuelles du scénario FAP (S1) en % (en bas).....	126
Figure 63 : Comparaison des concentrations moyennes annuelles ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de $\text{PM}_{2,5}$, BC, PM_{10} organiques, PM_{10} inorganiques, NO_2 et O_3 : différences relatives (en %) entre les scénarios prospectifs et le scénario de référence, en Île-de-France	129
Figure 64 : Différences mensuelles en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ entre les concentrations d' O_3 simulées avec les différents scénarios : FAP (S1), Essence (S2), S1 – 2R élec, et réduction par 2 sur Île-de-France / France des émissions de COV hors trafic, et la simulation de référence sur l'Île-de-France (à gauche) et sur le domaine intra-A86 (à droite).....	130
Figure 65 : Mailles prises en compte lors des calculs des statistiques dans le domaine intra A86 (en orange foncé)....	130
Figure 66 : Différences mensuelles en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ entre les concentrations d'organiques simulées avec les différents scénarios : FAP (S1), Essence (S2), S1–2R élec, et réduction par 2 sur Île-de-France / France des émissions de COV hors trafic, et la simulation de référence sur l'Île-de-France (à gauche) et sur le domaine intra-A86 (à droite).....	131
Figure 67 : Différences mensuelles en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ entre les concentrations d'inorganiques simulées avec les différents scénarios : FAP (S1), Essence (S2), S1–2R élec, et réduction par 2 sur Île-de-France / France des émissions de COV hors trafic, et la simulation de référence sur l'Île-de-France (à gauche) et sur le domaine intra-A86 (à droite)	131
Figure 68 : Densité de population de la région Île-de-France (INSEE 2011) en nombre d'habitants par maille de 50 x 50 m. Zoom sur Paris	132
Figure 69 : Différences de concentrations moyennes annuelles de PM_{10} (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) entre les scénarios FAP généralisation du filtre à particules (S1) et référence (gauche), et entre les scénarios Essence (S2) et référence (droite).....	132
Figure 70 : Différences de concentrations moyennes annuelles de NO_2 (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) entre les scénarios FAP (S1) et référence (gauche) et entre les scénarios Essence (S2) et référence (droite).....	133
Figure 71 : Pourcentage de population impactée selon la diminution minimale (différentiel) de la concentration moyenne annuelle de PM_{10} (figure du haut) et de NO_2 (figure du bas). Diminutions minimales selon les scénarios FAP (S1 - généralisation des FAP), S1-2R élec (idem FAP (S1) avec uniquement des deux-roues électriques) et Essence (S2)	134
Figure 72 : Niveaux d'émission de polluants (tous secteurs) en situation de référence (de gauche à droite et de haut en bas : CO, NOx, NH ₃ , COVNM, $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10} , $\text{PM}_{\text{coarse}}$, SOx)	140
Figure 73 : Rapport des concentrations de COV/NOx pour la simulation de référence	147
Figure 74 : Émissions des COV biogéniques en tonnes/an	147
Figure 75 : Concentrations moyennes annuelles de l' O_3 sur la France (en haut à gauche) en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Différences relatives entre les concentrations annuelles du scénario FAP (S1) et de la simulation de référence en % (en haut à droite). Différences relatives entre les concentrations annuelles du scénario Essence (S2) et celles du scénario FAP (S1) en % (en bas)	148
Figure 76 : Concentrations moyennes annuelles des $\text{PM}_{2,5}$ sur la France (en haut à gauche) en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Différences relatives entre les concentrations annuelles du scénario FAP (S1) et de la simulation de référence en % (en haut à droite). Différences relatives entre les concentrations annuelles du scénario Essence (S2) et celles de FAP (S1) en % (en bas)	149
Figure 77 : Concentrations moyennes annuelles de BC sur la France (en haut à gauche) en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Différences relatives entre les concentrations moyennes du scénario FAP (S1) et celles de la simulation de référence en % (en haut à droite). Différences relatives entre les concentrations annuelles du scénario Essence (S2) et celles du scénario FAP (S1) en % (en bas)	150

Figure 78 : Concentrations moyennes annuelles des inorganiques sur la France (en haut à gauche) en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Différences relatives entre les concentrations moyennes du scénario FAP (S1) et celles de la simulation de référence en % (en haut à droite). Différences relatives entre les concentrations annuelles du scénario Essence (S2) et celles du scénario FAP (S1) en % (en bas).....	151
Figure 79 : Concentrations moyennes annuelles des organiques sur la France (en haut à gauche) en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Différences relatives entre les concentrations moyennes du scénario FAP (S1) et celles de la simulation de référence (en haut à droite). Différences relatives entre les concentrations annuelles du scénario Essence (S2) et celles du scénario FAP (S1) (en bas).....	152
Figure 80 : Évolution des concentrations moyennes annuelles ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de $\text{PM}_{2,5}$, BC, PM_{10} organiques, PM_{10} inorganiques, NO_2 et O_3 : Différences relatives (en %) entre les scénarios prospectifs et le scénario de référence, en France .	154
Figure 81 : Localisation des points choisis pour les analyses mensuelles	155
Figure 82 : Différences mensuelles par rapport à la simulation de référence, des concentrations d' O_3 (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) des scénarios FAP (S1) et Essence (S2) à Lyon et Grenoble (en haut à gauche), à Marseille et Draguignan (en haut à droite), à Bordeaux et Mimizan (en bas).....	156
Figure 83 : Différences mensuelles par rapport à et la simulation de référence, des concentrations d'organiques ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) des scénarios FAP (S1) et Essence (S2), à Lyon et Grenoble (en haut à gauche), à Marseille et Draguignan (en haut à droite), à Bordeaux et Mimizan (en bas).....	157
Figure 84 : Différences mensuelles par rapport à et la simulation de référence, des concentrations d'inorganiques ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) des scénarios FAP (S1) et Essence (S2), à Lyon et Grenoble (en haut à gauche), à Marseille et Draguignan (en haut à droite), à Bordeaux et Mimizan (en bas).....	158
Figure 85 : Comparaison entre les concentrations annuelles observées sur les stations de proximité au trafic en Île-de-France et les résultats de simulation	165
Figure 86 : Facteurs d'émission de NO_x par norme des VP Diesel < 2l pour différentes versions de Copert (ed.2006 = Copert III, ed.2007 à 2016 = Copert 4, ed.2017 = Copert 5)	170
Figure 87 : Évolution entre les facteurs d'émission de NO_x utilisés dans COPERT et les valeurs mesurées dans différentes conditions dont des mesures embarquées. De gauche à droite, les graphiques correspondent à VP Euro 5, VP Euro 6 et VUL Euro 5 respectivement.....	174
Figure 88 : Évolution possible des facteurs d'émission de NO_x des VP (a) et VUL (b) dans les années à venir et comparaison vis-à-vis des facteurs d'émission de COPERT 4 v11.3	174
Figure 89 : Émissions de COSV en tonnes/an par le trafic, estimées à partir des émissions de composés organiques particulaires OM (simulation de référence, à gauche), et différence relative (%) entre les émissions de COSV de l'étude de sensibilité (approche COV) et la référence (approche OM).....	178
Figure 90 : Émissions de OM (à gauche) et des COV (à droite) en tonnes/an par le trafic.....	178
Figure 91 : Différences relatives (%) des émissions trafic entre le scénario FAP (S1) et la référence si les émissions de COSV sont calculées à partir du rapport COSV/OM (à gauche), et si les émissions de COSV sont calculées à partir du rapport COSV/COV (à droite).....	179
Figure 92 : Différences relatives des émissions trafic entre le scénario Essence (S2) et le scénario FAP (S1) si les émissions de COSV sont calculées à partir du rapport COSV/OM (à gauche) et si les émissions de COSV sont calculées à partir du rapport COSV/COV (à droite).....	179
Figure 93 : Concentrations en organiques en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (à gauche) et différences relatives (en %) entre les concentrations obtenues avec des émissions estimées à partir du rapport COSV/COV et celles obtenues avec des émissions estimées à partir du rapport COSV/OM (à droite).....	180
Figure 94 : Concentrations en organiques totaux (gaz + particules) en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (à gauche) et différences relatives (en %) entre les concentrations obtenues avec des émissions estimées à partir du rapport COSV/COV et celles obtenues avec des émissions estimées à partir du rapport COSV/OM (à droite)	180
Figure 95 : Différences en % des concentrations en particules organiques entre le scénario FAP (S1) et la référence quand les émissions de COSV sont calculées à partir du rapport COSV/OM (à gauche) et quand les émissions de COSV sont calculées à partir du rapport COSV/COV (à droite)	181
Figure 96 : Différences en % des concentrations en organiques (gaz + particules) entre le scénario FAP (S1) et la référence quand les émissions de COSV sont calculées à partir du rapport COSV/OM (à gauche) et quand les émissions de COSV sont calculées à partir du rapport COSV/COV (à droite)	181

1 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'expertise

1.1 Contexte

La pollution atmosphérique se caractérise par la présence dans l'air extérieur de gaz et de particules ayant des effets néfastes sur la santé humaine et sur l'environnement. La problématique des particules dans l'air est prégnante en France où plusieurs zones du territoire présentent des niveaux élevés de particules, des épisodes de pollution conduisant l'état français (et d'autres États membres) à se retrouver en situation de contentieux européen pour non-respect des valeurs limites fixées pour les PM₁₀. Au-delà, les particules de l'air ambiant représentent un enjeu de santé publique. Le poids de la pollution par les particules fines PM_{2,5} en lien avec l'activité humaine a été estimé à 48 000 décès par an et est accentué dans les zones urbaines de plus de 100 000 habitants où les résultats montrent, en moyenne, une perte de 15 mois d'espérance de vie à 30 ans du fait des PM_{2,5} (SpFrance, 2016a). Le coût sanitaire et non sanitaire de la pollution par les PM_{2,5} a été estimé à au moins 75 Md€/an (Commission d'enquête du Sénat 2015). Les concentrations¹ de particules dans l'air (PM₁₀ et PM_{2,5}) ont diminué au cours des années mais restent supérieures aux valeurs guides recommandées par l'Organisation mondiale de la santé (OMS 2006).

Les effets sanitaires des particules de l'air ambiant extérieur (PM_{2,5} et PM₁₀) sont déjà bien documentés. Des effets cardiovasculaires et respiratoires sont mis en évidence pour des expositions à court et à long termes. En octobre 2013, le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) classait la pollution de l'air ambiant extérieur dans son ensemble et les particules en suspension composant cette pollution comme cancérigènes pour l'Homme (groupe 1) (CIRC 2016).

Les interrogations qui subsistent concernent entre autres les effets sanitaires potentiellement associés à la composition de l'aérosol particulaire dont l'évolution au cours des dernières années est vraisemblable. L'US EPA a conclu en 2009 qu' « *il existe plusieurs composés contribuant aux effets sanitaires des PM_{2,5}, mais les indications sont insuffisantes pour différencier ceux des composés (ou sources) qui sont le plus étroitement reliés à des événements de santé spécifiques* » (Commission d'enquête du Sénat 2015). Cette conclusion était reprise et maintenue par l'OMS (2013). Entre 2013 et 2016, plusieurs études scientifiques ont été publiées sur le sujet, y compris des études épidémiologiques en Europe.

Les particules fines proviennent d'une multitude de sources d'émission diffuses et de processus de transformation dans l'atmosphère. Elles proviennent de phénomènes naturels (sable de désert, sels marins, éruptions volcaniques, incendies de forêts, etc.) et d'activités humaines (industries, transports, agriculture, chauffage, etc.). La combustion d'énergie fossile et le transport routier sont particulièrement responsables de fortes concentrations d'aérosols carbonés dans l'atmosphère mesurés sous la forme de carbone suie et de matière organique, avec la combustion de biomasse utilisée pour le chauffage résidentiel et tertiaire. Les particules primaires issues des transports routiers sont principalement émises par les véhicules Diesel non équipés de filtre à particules. Le niveau des émissions est très dépendant de l'âge et de la technologie du véhicule, les véhicules anciens contribuant fortement aux émissions particulières du trafic. L'origine des aérosols secondaires est plus incertaine, ces aérosols étant de plus en plus étudiés, tout comme d'autres facteurs de la pollution du trafic : émissions hors échappement, démarrage à froid, émissions des deux-roues, etc.

Le trafic routier est la source de pollution de l'air ambiant extérieur probablement la plus documentée. Les effets sanitaires mis en évidence incluent là aussi des effets cardiovasculaires et respiratoires pour des expositions à court et à long termes. En 2012, le CIRC classait les émissions

¹ Les concentrations de polluants caractérisent la qualité de l'air respiré et sont mesurées en différents points du territoire français, dans les villes, à proximité de sources d'émissions (trafic routier, industries) et dans des zones éloignées de ces sources (fond urbain).

d'échappement des moteurs Diesel comme cancérogènes pour l'Homme (groupe 1) et les émissions d'échappement des moteurs à essence comme possiblement cancérogènes pour l'Homme (groupe 2B) (CIRC 2014). Le CIRC évaluait par ailleurs que les indications d'une cancérogénicité en expérimentation animale étaient « suffisantes » pour les émissions d'échappement des moteurs Diesel dans leur ensemble mais également pour les particules d'échappements et la fraction organique de ces particules d'échappements. Concernant la fraction gazeuse, les indications étaient évaluées comme « inadéquates ».

Il est reconnu que les populations résidant à proximité des voies à fort trafic routier ont une santé dégradée (HEI 2010, ORS IdF 2012). Le projet Aphekom dans 10 villes européennes a estimé que le fait d'habiter à proximité de grands axes de circulation pourrait être responsable d'environ 15 à 30 % des nouveaux cas d'asthme de l'enfant et, de proportions similaires ou plus élevées, de bronchopneumopathies chroniques obstructives (BPCO) et de maladies coronariennes chez les adultes âgés de 65 ans et plus (InVS 2012).

La composition des carburants et les technologies de motorisation ont évolué depuis de nombreuses années en vue de diminuer l'impact des émissions des moteurs des véhicules sur la qualité de l'air. Fort de ce constat, des interrogations se posent sur l'impact des futurs choix technologiques.

1.2 Objet de la saisine

Par courrier du 30 juin 2014, l'Anses a été saisie par les ministères en charge de la santé et de l'environnement afin notamment :

A. De répondre aux questions suivantes :

1. Existe-t-il un document d'expertise compilant l'ensemble des données/études existantes associant concentration, composition physico-chimique et sources des particules de l'air ambiant en France ?

Le cas échéant, réaliser cette compilation, sous un angle national et régional, en appréciant si possible les variabilités temporelle et spatiale de l'aérosol, en vue d'estimer pour les concentrations et compositions physico-chimiques des particules de l'air ambiant en France les contributions respectives des différentes sources (trafic, chauffage, industries, agriculture, imports, naturelles...) et leur évolution ces dernières années.

2. Existe-t-il des données concluantes sur les différences de toxicité selon la composition et/ou les sources de particules ?

Le cas échéant, quelles conclusions peut-on tirer sur la toxicité des particules selon la composition et/ou les sources ? »

B. Concernant la source « trafic routier », de conduire une expertise visant à :

1. définir l'évolution rétrospective et prospective des émissions de particules selon le parc roulant français et des cycles se rapprochant d'usage réel en considérant différents scénarios ;
2. et identifier les impacts différenciés des technologies de dépollution sur les émissions de particules par la source « trafic ».

Ces éléments pouvaient être mis en regard avec les données d'émission disponibles concernant les autres sources de particules.

Conformément à l'avenant au contrat d'expertise passé entre l'Anses et les ministères commanditaires le 5 mai 2015, la question A.1 de la saisine a été exclue puisque ce point a été traité par ailleurs dans le cadre du projet « SOURCES » co-financé par l'Agence de l'Environnement et de la maîtrise de l'Énergie (ADEME), l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS)/le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA) et l'Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE, anciennement Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'environnement (LGGE)), projet au sein duquel l'Anses est représentée.

1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation

L'Anses a confié au groupe de travail « Particules » (GT), rattaché au comité d'experts spécialisé « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » (CES) l'instruction de cette saisine.

Le GT a été constitué en septembre 2015 après un appel à candidature public et s'est réuni à 25 reprises d'octobre 2015 à décembre 2018. Le présent rapport vise à répondre à la question B de la saisine (chapitre 1.2), la question A de la saisine étant traitée par ailleurs par le GT.

Les travaux d'expertise du GT ont été soumis régulièrement au CES (tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques). Le rapport produit par le GT tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

Ces travaux sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires.

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – prescriptions générales de compétence pour une expertise (mai 2003) ».

Les travaux du GT s'appuient largement sur des simulations numériques de compositions du parc roulant, d'émissions et de concentrations atmosphériques répondant à différents scénarios prospectifs décrits ci-après dans le rapport. Ces simulations ont été réalisées dans le cadre d'une convention de recherche et développement contractée entre l'Anses, Airparif, le Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique (Cerea), le Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique (CITEPA) et l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR) (rapport de CRD n°2016-CRD-04, juillet 2017).

Deux études ont été réalisées en dehors du cadre du GT et sont venues enrichir les travaux concernant en particulier l'état des lieux sur les sources des particules atmosphériques :

- une étude multi-sites en France sur l'identification et la quantification des sources de particules fines dans l'air ambiant (PM₁₀ et PM_{2,5}) incluant la mise en place d'une méthodologie standardisée à partir des profils chimiques des particules ainsi qu'une synthèse des études expérimentales réalisées ces dix dernières années en France (projet « SOURCES »). Cette étude a été co-financée par l'ADEME, l'INERIS/LCSQA et le laboratoire LGGE (aujourd'hui devenu laboratoire IGE), l'Anses étant représentée au sein de son comité de pilotage (ADEME 2018, LCSQA, Ineris, and IGE 2017a, 2017b) ;
- une étude multi-sites en France des variations du potentiel oxydant des particules atmosphériques, en liaison avec leur chimie et leurs sources (projet « ExPOSURE »). Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une convention de recherche et développement contractée entre l'Anses et le CNRS agissant pour le compte du laboratoire IGE - UMR 5001 (rapport de CRD n°2016-CRD-31, juillet 2017).

Des parties prenantes (associations impliquées dans la lutte contre la pollution atmosphérique, industrie automobile) ont été auditionnées par le GT afin de porter à sa connaissance :

- la perception de ces acteurs sur les enjeux de la pollution particulaire (santé publique, surveillance) ;
- des informations de l'industrie automobile sur les évolutions technologiques et réglementaires ainsi que leur impact sur les émissions de particules, incluant des sujets émergents : émissions hors échappements, impact du taux d'incorporation de biocarburant, aérosols organiques secondaires et filières GNV (gaz naturel pour véhicules), GPL (gaz de pétrole liquéfié), Hydrogène et électrique.

Les représentants des fabricants et équipementiers automobiles suivants ont été auditionnés en novembre 2016 par une délégation de trois membres du GT accompagné des coordinateurs : l'Association for Emissions Control by Catalyst (23 novembre 2016), le Comité des constructeurs français d'automobile (15 novembre 2016), la Chambre Syndicale Internationale de l'Automobile et du Motocycle (15 novembre 2016) et la Fédération des Industries des Equipements pour Véhicules (23 novembre 2016).

Les représentants des associations suivantes ont été auditionnés le 1^{er} décembre 2016 par les coordinateurs du GT : Association pour la prévention de la pollution atmosphérique, France Nature Environnement et RESPIRE.

1.4 Prévention des risques de conflits d'intérêts.

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet de l'agence (www.anses.fr).

2 Introduction et objectifs

L'étude présentée dans ce rapport s'inscrit dans le cadre de la saisine n°2014-SA-0156 portant sur l'état des connaissances sur les particules de l'air ambiant (composition chimique et émissions du trafic routier) où il est prévu d'investiguer l'évolution rétro-prospective des émissions de particules liées au trafic routier et l'impact des technologies de dépollution, tout en mettant ces émissions en regard de celles des autres sources de pollution (chapitre 1.2). Cette saisine pose par ailleurs la question de la toxicité des particules en regard de leur composition chimique et granulométrie, et de leurs sources d'émission. Dans ce contexte, l'évaluation rétro-prospective des émissions du trafic routier en lien avec les autres sources de pollution, et compte tenu de l'évolution des technologies automobiles, a deux objectifs :

1. Établir un état des lieux et analyser l'évolution passée des émissions du trafic et des autres secteurs, des concentrations de polluants atmosphériques et de leurs conséquences pour l'exposition des populations ;
2. Évaluer et comparer l'effet de différentes motorisations et technologies de dépollution en ayant recours à la simulation numérique sous différents scénarios prospectifs.

Les premières réflexions dans le cadre du Groupe de Travail « Particules » ont rapidement abouti à la conclusion qu'une étude portant sur la comparaison de différentes technologies de véhicules quant à leur impact sur la pollution particulaire ne pouvait se résumer à la seule analyse des émissions particulières du trafic routier. En effet, ce travail impliquait de traiter non seulement l'ensemble des émissions de polluants du trafic routier, mais aussi la chimie atmosphérique et la formation des aérosols secondaires, tout en considérant les émissions des autres secteurs, et autant que possible la composition chimique et la granulométrie des particules. Ainsi, au-delà des particules (PM_{10} , $PM_{2,5}$ et particules en nombre (PN)) et de leurs composés (carbone suie (BC) et matière organique (OM)), il est apparu nécessaire de s'intéresser également aux composés organiques volatils (COV) et aux oxydes d'azote (NO_x) qui sont à l'origine de la formation d'aérosols secondaires organiques et inorganiques ou d'ozone (O_3) pour le dioxyde d'azote (NO_2). En revanche, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les métaux lourds n'ont pas été pris en compte car les facteurs d'émissions et les simulations de concentration ne sont pas assez robustes et documentés.

Pour l'aspect prospectif des émissions et pour traiter les phénomènes complexes de la pollution de l'air, la simulation numérique était indispensable. Les travaux se sont également appuyés sur la littérature afin de documenter au mieux les données nécessaires aux simulations.

Une approche relativement pragmatique a été adoptée, visant à mobiliser et mettre en œuvre des outils déjà opérationnels, de les enrichir et de les appliquer sur un territoire pour lequel la plupart des données étaient déjà disponibles. En l'occurrence, une simulation sur la région Île-de-France a été réalisée, avec :

- la simulation du trafic et de ses émissions de polluants, réalisée à partir de la modélisation du réseau routier détaillé, et utilisant la plate-forme de calcul Heaven, l'ensemble des données et outils étant disponible auprès d'Airparif ;
- la simulation des concentrations des polluants atmosphériques, utilisant la plate-forme de calcul Polyphemus disponible au Cerea, et s'appuyant sur le calcul des émissions du trafic de la plate-forme Heaven d'une part, et l'inventaire des émissions des autres sources de l'Île-de-France d'autre part (également disponible auprès d'Airparif) ;
- les simulations des émissions et concentrations des polluants atmosphériques à l'échelle européenne et sur la France pour la prise en compte de la pollution longue distance. Celles-ci sont réalisées à partir des données d'inventaires d'émissions européens et français, ces dernières étant disponibles auprès du CITEPA.

La simulation de l'évolution prospective des émissions et des concentrations de polluants selon différentes technologies de dépollution a reposé sur la définition et la construction de scénarios, variant principalement par les compositions du parc automobile (contexte, trafic et autres secteurs invariants). Différentes options ont été considérées : la généralisation progressive du filtre à particules sur les véhicules Diesel, le repli des véhicules légers Diesel au profit des motorisations essence, ou encore l'introduction significative de motorisations alternatives (électriques).

À côté de ces approches technologiques, un scénario avec réduction du trafic a également été simulé. Par ailleurs des études d'impacts sur la pollution de l'air en Île-de-France de mesures d'organisation des transports (Plan de déplacements PDU, Zone d'actions prioritaires pour l'air ZAPA) ont été mises en perspective avec les résultats des simulations.

La simulation sur la France, documentée et calculée moins précisément que la simulation en Île-de-France, permet néanmoins d'analyser les particularités

territoriales notamment concernant les conditions de chimie atmosphérique et leur impact sur la pollution atmosphérique, et ainsi d'analyser les résultats sous des contextes régionaux contrastés. Les évolutions correspondant aux différents scénarios ont de ce fait pu être étudiées sous d'autres contextes que celui de l'Île-de-France.

Enfin, le volet exposition avec un croisement de la population et des concentrations de polluants atmosphériques (Île-de-France) a été abordé, sans mener une évaluation fine car les outils de simulation mis en œuvre ne le permettaient pas. En effet, les concentrations de polluants et notamment de particules n'ont pas pu être calculées avec une résolution spatiale suffisamment fine rendant compte des gradients de concentration en proximité immédiate du trafic ; il s'agit pourtant du lieu où l'exposition de la population aux polluants atmosphériques est la plus intense et où la pollution peut être sensiblement différente de celle de fond. Néanmoins, pour deux des scénarios étudiés, une analyse croisée des cartes de concentrations de polluants atmosphériques et de population en Île-de-France a été réalisée pour apporter un premier niveau d'éclairage sur l'impact sanitaire des changements de parcs de véhicules.

Ainsi, pour répondre à la demande de la saisine n°2014-SA-0156 et aux deux objectifs associés définis précédemment, le rapport a été organisé en huit chapitres.

Après un premier chapitre sur le contexte, l'objet et les modalités de traitement de la saisine et un deuxième chapitre introductif précisant les objectifs, le chapitre 3 rappelle d'abord les principaux aspects de la pollution particulaire, puis propose une analyse rétrospective des émissions et des concentrations de polluants en Île-de-France et en France. Il s'appuie principalement sur les données d'observation et sur la littérature.

Les trois chapitres 4, 5 et 6 suivants développent et mettent en œuvre une méthode de simulation des émissions et concentrations de polluants, sous différents scénarios, en vue de répondre au second objectif.

Le chapitre 4 décrit en détail les méthodes utilisées (calcul d'émission, simulation atmosphérique, élaboration des scénarios de composition du parc automobile), ainsi que les nombreuses hypothèses qui ont dû être spécifiées (émissions des autres secteurs, météorologie, etc.). Le chapitre 5 récapitule les résultats des simulations prospectives établies sur l'Île-de-France sous

Avertissement : *Toute comparaison de ces travaux avec les résultats d'études d'impacts de la mise en œuvre de politiques publiques (zones de restrictions de la circulation, etc.) est à éviter. En effet, les scénarios simulés dans la présente étude visent uniquement à tester différentes hypothèses technologiques (voire de réduction du trafic), dans un contexte constant (pas d'évolution démographique, ni des autres secteurs émetteurs, etc.). Ils n'intègrent pas d'évolution des comportements de mobilité, ou du contexte économique. Ils permettent plutôt une étude de sensibilité de la pollution de l'air à différentes évolutions technologiques et non une étude prospective de la pollution de l'air en lien avec les politiques publiques.*

différents scénarios. La simulation du scénario de référence permet d'identifier les enjeux en émissions de polluants, en concentrations atmosphériques, selon les zones géographiques et les populations. Quatre scénarios technologiques prospectifs dont un avec réduction du trafic sont ensuite simulés en émissions, et deux d'entre eux sont analysés en concentrations atmosphériques de polluants. Cette simulation prospective est complétée par l'étude de scénarios PDU et ZAPA à partir de travaux publiés. Puis, la France métropolitaine est la zone d'étude considérée dans le chapitre 6. Le scénario de référence ainsi que deux scénarios technologiques sont simulés en émissions et concentrations atmosphériques de polluants. Après observation des disparités spatiales de l'impact des scénarios sur l'ensemble du territoire, des régions contrastées (régimes chimiques de pollution différents) sont identifiées et les impacts des scénarios sont comparés. Les évolutions peuvent en effet diverger selon les contextes locaux.

Le chapitre 7 expose les avantages et les limites de l'approche, notamment en regard des incertitudes des simulations et des hypothèses retenues. Ce chapitre est complété d'une synthèse (principalement méthodologique) des travaux d'élaboration du PREPA (Plan National de Réduction des Émissions de Polluants Atmosphériques), et il formule également des recommandations. Certains facteurs d'émissions ou spéciations tirés de la littérature ou récemment mis à jour permettent d'évaluer les éventuels biais au niveau des calculs des émissions. Par ailleurs, la modélisation des COSV (composés organiques semi-volatils), un des paramètres essentiels de la production d'aérosols secondaires anthropiques, fait l'objet d'une analyse de sensibilité des résultats au schéma de modélisation des COSV.

Enfin, pour conclure ce rapport, les principaux résultats des analyses sont récapitulés dans le chapitre 8.

3 État des lieux de la pollution de l'air ambiant extérieur par les particules et par le trafic routier, et analyse rétrospective en France et Île-de-France

Ce chapitre a pour but de positionner la problématique actuelle de la pollution de l'air et en particulier la contribution du trafic routier, dans une approche rétrospective.

En s'appuyant sur la littérature, il dresse d'abord un état des lieux de la pollution particulaire, de ses enjeux sanitaires et origines, et du cas particulier de la pollution liée au trafic routier, avant d'explicitier plus en détail les émissions de polluants.

Ce chapitre s'attache ensuite à positionner l'évolution passée ou rétrospective des émissions et concentrations de polluants (niveaux actuels et évolutions au cours des dernières années), pilotée notamment par l'évolution des technologies et des réglementations. Cette analyse rétrospective porte sur les territoires géographiques considérés ensuite pour les simulations : 1- la région Île-de-France, qui représente environ 18 % de la population française avec des niveaux d'urbanisation et d'activités très élevés qui accentuent la problématique d'exposition des populations à la pollution, 2- le territoire national (métropolitain).

A la suite de cette analyse rétrospective et en réponse aux questions de la saisine, des simulations des émissions et concentrations de polluants atmosphériques sous différents scénarios prospectifs seront développées dans les chapitres suivants 4, 5, 6 et seront focalisées sur des évolutions technologiques « à venir ».

3.1 État des lieux de la pollution de l'air ambiant extérieur par les particules et par le trafic routier

Cette section dresse un état des lieux de la pollution particulaire de l'air ambiant et la contribution du trafic routier.

Dans la 1^{ère} partie de cette section, les enjeux sanitaires de la pollution particulaire sont récapitulés brièvement, avant d'explicitier en détail les origines de la pollution particulaire au travers de travaux récents.

Dans la 2^{ème} partie, la pollution de l'air due au trafic routier est plus spécifiquement considérée, avec ses enjeux sanitaires spécifiques et la question de l'exposition des populations (échelles spatiales d'impact de la pollution, transfert de pollution extérieur - intérieur des bâtiments).

La 3^{ème} partie de cette section est centrée sur les émissions de polluants, notamment celles du trafic routier. Les polluants et activités considérés dans les inventaires d'émissions sont tout d'abord décrits. Sont ensuite discutées plus spécifiquement les émissions du trafic, en lien avec les véhicules et technologies, puis les émissions d'hydrocarbures aromatiques polycycliques.

3.1.1 Pollution de l'air ambiant par les particules

3.1.1.1 Enjeux sanitaires

En France et en Europe, les particules PM₁₀ font partie des trois polluants réglementés dont les concentrations présentent le plus de dépassements des normes réglementaires pour la protection de la santé humaine, avec le dioxyde d'azote (NO₂) et l'ozone (O₃).

La problématique des particules dans l'air est prégnante en France où plusieurs zones du territoire présentent des niveaux élevés de particules, des épisodes de pollution conduisant l'état français à se retrouver en situation de contentieux européen pour non-respect des valeurs limites fixées pour

les PM₁₀ (10 zones retenues dans l'avis motivé de la commission européenne en 2015, la première mise en demeure datant de 2009).

Au-delà, les particules de l'air ambiant représentent un enjeu de santé publique. D'après une estimation de SpFrance (2016a), le poids de la pollution par les particules fines PM_{2,5} en lien avec l'activité humaine est estimé à 48 000 décès par an et est accentué dans les zones urbaines de plus de 100 000 habitants où les résultats montrent, en moyenne, une perte de 15 mois d'espérance de vie à 30 ans. Si les concentrations en PM_{2,5} respectaient la valeur recommandée par l'OMS (10 µg/m³), plus de 17 000 décès pourraient être évités chaque année. La majorité de ces décès (près de 13 000) seraient évités dans les communes de plus de 100 000 habitants. Le respect de la réglementation européenne (valeur cible à 20 µg/m³) correspondrait à 11 décès évités et 1,5 mois en moyenne de gain d'espérance de vie (SpFrance 2016a). L'Afsset, devenue Anses en 2010², a mis en avant que l'abaissement de la valeur moyenne de la concentration particulaire sur le long terme amènerait à un bénéfice sanitaire plus important qu'une stratégie de gestion focalisée sur les pics journaliers de pollution particulaire (Afsset 2009). SpFrance a par ailleurs étudié la part des épisodes de pollution (définis par le dépassement des seuils d'alerte) dans les effets à court terme de la pollution de l'air sur la santé dans les villes du programme de surveillance Air et santé. Cette étude a montré que la réduction des niveaux des PM₁₀ uniquement en cas d'épisode de pollution ne permettait pas d'assurer une prévention efficace des impacts sanitaires de la pollution atmosphérique (SpFrance 2016b). Le coût sanitaire et non sanitaire de la pollution par les PM_{2,5} est estimé à au moins 75 Md€/an (Commission d'enquête du Sénat 2015). Les concentrations de particules dans l'air (PM₁₀ et PM_{2,5}) ont diminué au cours des années mais restent supérieures aux valeurs guides recommandées par l'OMS et à d'autres normes de qualité de l'air (ex : National Ambient Air Quality Standards aux Etats-Unis). Il convient de préciser que ces estimations de Santé publique France et de la Commission d'enquête du Sénat n'intègrent que partiellement la pollution de proximité aux sources (dont le trafic) compte tenu de la résolution spatiale du modèle se situant à l'échelle de la commune pour les données de mortalité.

Les effets sanitaires des particules de l'air ambiant (PM_{2,5} et PM₁₀) sont déjà bien documentés. Des effets cardiovasculaires et respiratoires sont mis en évidence pour des expositions à court et à long termes. En octobre 2013, le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) classait la pollution de l'air extérieur dans son ensemble et les particules en suspension composant cette pollution comme cancérogènes pour l'Homme (groupe 1) (CIRC 2016). Des effets sur la santé respiratoire (mortalité et morbidité respiratoires) sont mis en évidence à des niveaux de PM_{2,5} inférieurs aux valeurs guides de l'OMS établies en 2005 (25 µg/m³ sur 24 h et 10 µg/m³ en moyenne annuelle). L'absence de seuil en dessous duquel aucun effet n'est attendu est clairement avancée. Des données plus récentes mettent en évidence des associations entre l'exposition à long terme aux PM_{2,5} et des effets autres que respiratoires ou cardiovasculaires telles que des maladies neurodégénératives, des troubles cognitifs ainsi que des maladies chroniques comme le diabète.

Il existe plusieurs composés contribuant aux effets sanitaires des particules (PM_{2,5} et PM₁₀) et les particules carbonées issues de la combustion sont considérées comme les particules parmi les plus toxiques. Néanmoins, la différenciation des effets sanitaires selon les composés (ou sources) des particules émises dans l'air ambiant extérieur reste difficile compte tenu notamment des fortes corrélations entre la concentration des composés, la concentration de matière particulaire et l'activité des sources (OMS 2013, US EPA 2009).

² L'Anses a été créée le 1^{er} juillet 2010, agence reprenant les missions de l'Agence française de sécurité sanitaire de l'alimentation (Afssa) et de l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Afsset).

3.1.1.2 Origines de la pollution particulaire

Les particules (PM₁₀ et PM_{2,5}) en suspension dans l'air ambiant extérieur proviennent d'une multitude de sources d'émissions diffuses et de processus de transformation dans l'atmosphère, expliquant la grande diversité et la complexité de leurs propriétés physico-chimiques. Schématiquement, les particules sont formées d'un mélange complexe de poussières, de carbone suie (BC pour *black carbon*), de composés inorganiques (principalement sodium, sulfate, ammonium, nitrate, chlorure) et de composés organiques (OC pour *organic carbon* ou OM pour *organic matter*). Leurs tailles varient de quelques nanomètres à plusieurs micromètres. Elles proviennent de phénomènes naturels (sable de désert, sels marins, éruptions volcaniques, feux de forêts, etc.) et d'activités humaines (industries, transports, agriculture, chauffage, etc.). La combustion d'énergie fossile et le transport routier ainsi que la combustion de biomasse utilisée pour le chauffage résidentiel et tertiaire sont particulièrement responsables de fortes concentrations d'aérosols carbonés dans l'atmosphère mesurés sous la forme de carbone suie et de matière organique.

Des épisodes de pollution d'ampleur nationale³, plus ou moins nombreux selon les conditions météorologiques, surviennent chaque année en France et à des périodes différentes selon les polluants (CGDD 2016, 2017, 2018a). Sur la période 2013-2017, les épisodes de pollution d'ampleur nationale sont essentiellement dus aux particules (épisodes plus fréquents pour les particules que pour les autres polluants). Neuf épisodes majeurs pour les PM₁₀ se distinguent sur la période 2013-2016 (Figure 1). En début d'hiver, les épisodes sont marqués par une quantité importante de matière organique liée aux phénomènes de combustion tels que le chauffage au bois, le brûlage des déchets verts (en plus des autres sources telles que les transports et l'industrie). Au printemps, les épisodes observés se singularisent par l'influence des activités agricoles (épandages d'engrais, effluents organiques) conjointement aux émissions de l'industrie et des transports. Des phénomènes naturels, comme le transport de poussières telluriques d'Afrique ou des éruptions volcaniques, peuvent également conduire à des épisodes de pollution.

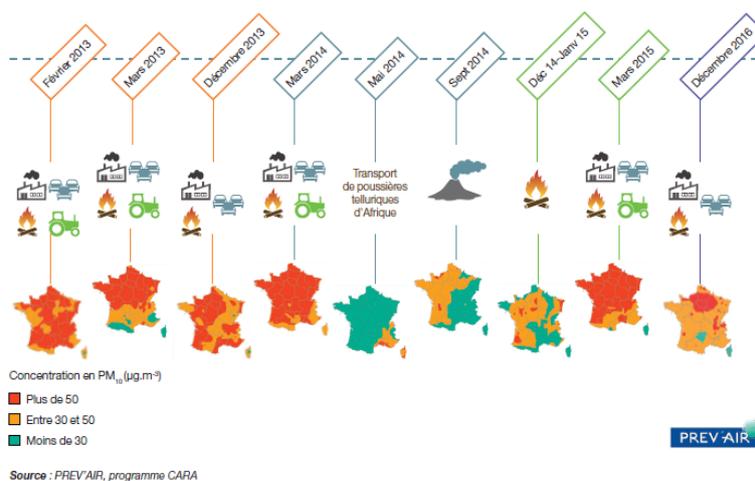


Figure 1 : Sélection d'épisodes de pollution aux PM₁₀ d'ampleur nationale depuis 2013 (CGDD, 2017)

Dans le cadre du projet « SOURCES » (ADEME 2018, LCSQA, Ineris, and IGE 2017a, 2017b), des jeux de données obtenus à partir de mesures de PM₁₀ et de leurs profils chimiques réalisés depuis 2010 sur 15 sites de typologies différentes (urbain, trafic, vallée alpine, rural) en France ont été réanalysés. Pour cela, une méthode PMF5.0 (« *Positive Matrix Factorization* »)⁴ a été utilisée avec

³ Le commissariat général au développement durable caractérise un épisode de pollution par « le dépassement des normes de qualité de l'air fixées pour la protection de la santé humaine à court terme (horaires ou journalières), pour un ou plusieurs polluants, sur une période excédant 2 jours consécutifs » et le considère d'ampleur nationale « lorsque la superficie des territoires concernés s'étend sur plusieurs régions » (CGDD, 2018a).

⁴ La PMF (*Positive Matrix Factorization*) (Paatero 1999, Paatero and Tapper 1994) est une technique d'analyse factorielle multivariée des moindres carrés pondérés qui prend en compte l'évolution de la concentration des espèces chimiques mesurées et rassemble ainsi dans un même facteur les fractions des espèces dont les concentrations évoluent de la même manière (projet « SOURCES », ADEME, 2018). Chaque facteur est ensuite identifié et attribué à une source (et/ou catégorie de source) en se basant sur les traceurs chimiques caractérisant chaque profil de facteur résolu et leur répartition dans celui-ci.

l'application de contraintes chimiques spécifiques dans les profils chimiques de certains facteurs (par exemple, pour le lévoglucosan, traceur chimique de la combustion de biomasse).

Les principales conclusions tirées de cette étude sont les suivantes :

- les émissions primaires liées au transport routier influencent fortement la masse des PM₁₀ sur les sites de proximité automobile, mais également sur certains sites de fond urbain tels que Rouen, Marseille, Grenoble et Nogent-sur-Oise (avec des contributions relatives de l'ordre de 20-30 % en moyenne annuelle). Sur les autres sites, les contributions annuelles sont d'environ 10 % ;
- la source de combustion de biomasse est très importante en hiver, contribuant jusqu'à 70 % de la masse des PM₁₀ en moyenne saisonnière à Chamonix (contre 10-15 % à Marseille, Lens et Rouen, et environ 30 % sur tous les autres sites) ;
- les aérosols secondaires riches en nitrate d'ammonium présentent une concentration maximale au printemps (typiquement 30 % des PM₁₀), en particulier sur les sites de la moitié nord de la France ;
- l'impact des aérosols secondaires riches en sulfate d'ammonium sur les niveaux de PM₁₀ est principalement observé en période estivale (en particulier dans le sud de la France) ;
- les poussières minérales présentent des contributions importantes et relativement comparables (5-20 %) au printemps et en été sur un grand nombre de sites ;
- de nouveaux traceurs organiques (e.g., polyols et l'acide méthylsulfonique (MSA), rarement utilisés dans les études précédentes) ont permis la quantification de sources biogéniques spécifiques (e.g., émissions primaires biogéniques et aérosols organiques secondaires d'origine marine) qui présentent des contributions significatives du printemps à l'automne ;
- les émissions biogéniques primaires continentales (e.g., spores) ne peuvent être considérées comme négligeable, en particulier en fin d'été et automne.

À titre de synthèse et d'illustration des conclusions du projet « SOURCES », la Figure 2 présente les contributions moyennes des principales sources de PM₁₀ à l'échelle nationale en fond urbain, obtenues en combinant les résultats issus de l'analyse PMF harmonisée pour 10 agglomérations métropolitaines (Rouen, Nogent-sur-Oise, Lens, Poitiers, Lyon, Grenoble, Bordeaux, Aix en Provence, Marseille et Nice). La Figure 3 présente les contributions moyennes annuelles aux PM₁₀ pour chacun des 15 sites. Les variabilités saisonnières et spatiales de ces contributions sont détaillées dans le rapport d'étude (ADEME 2018, LCSQA, Ineris, and IGE 2017a, 2017b).

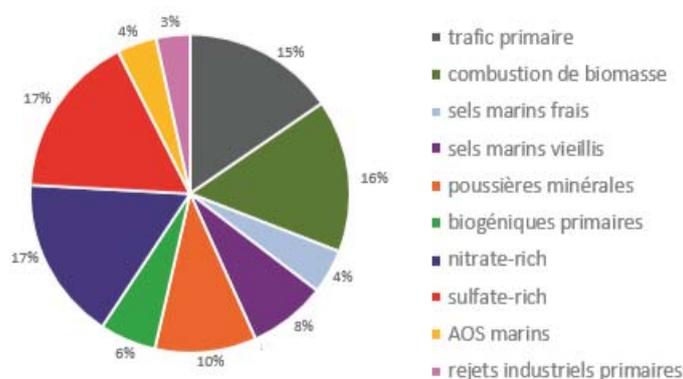


Figure 2 : Contributions annuelles moyennes des principaux facteurs constitutifs des PM₁₀ en fond urbain à l'échelle nationale (Moyenne des résultats obtenus par analyse PMF harmonisée sur 10 sites de fond urbain (ADEME 2018, LCSQA, Ineris, and IGE 2017a))

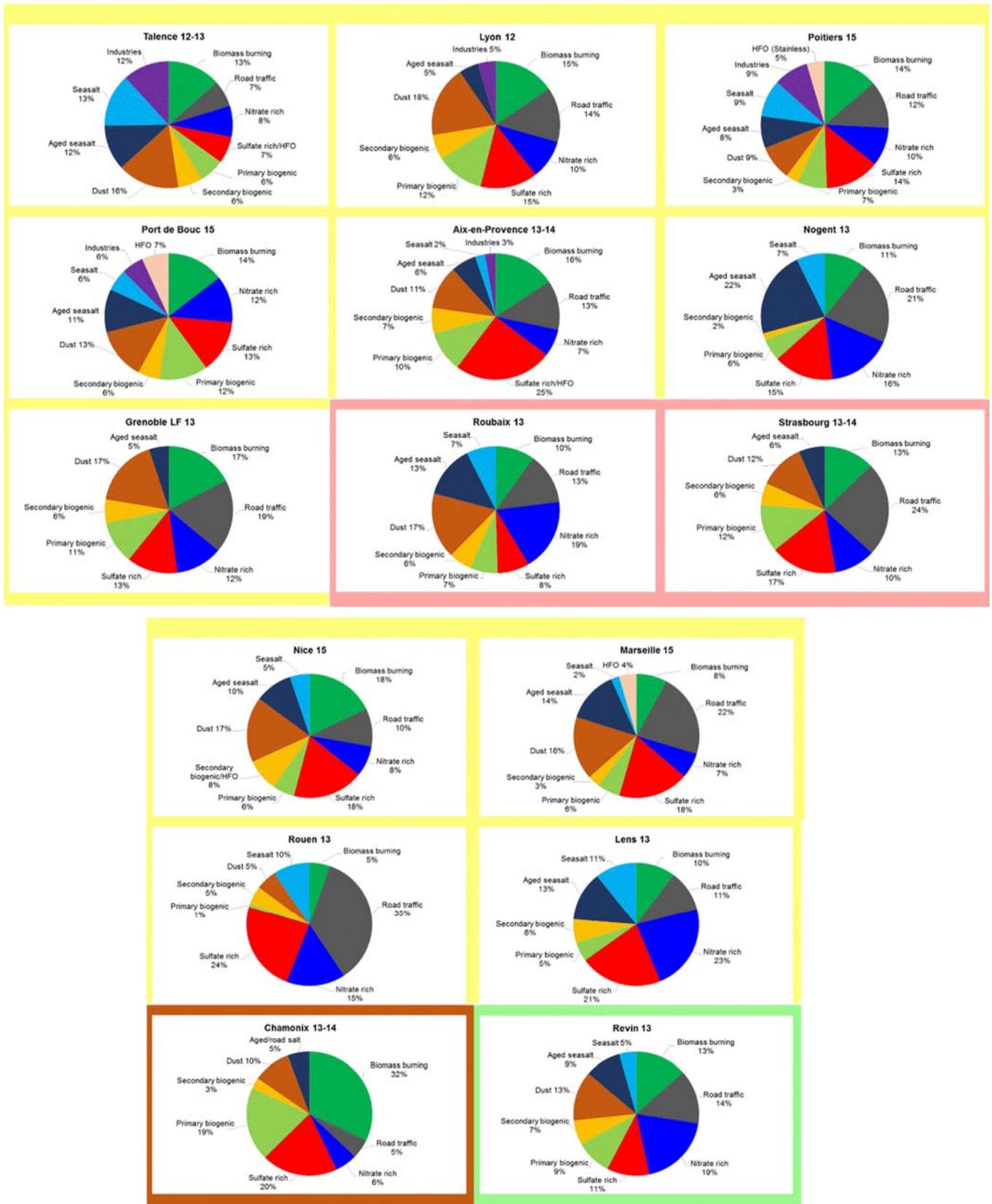


Figure 3 : Contributions relatives moyennes annuelles aux PM₁₀ des facteurs identifiés pour chacun des 15 sites. La couleur du fond indique la typologie du site : jaune pour urbain, rose pour trafic, marron pour vallée alpine et vert pour rural (ADEME 2018, LCSQA, Ineris, and IGE 2017b)

Compte tenu de la non-linéarité des mécanismes atmosphériques, les estimations des contributions de sources réalisées à l'aide de ces méthodologies expérimentales ne peuvent pas être utilisées simplement afin d'évaluer l'efficacité de scénarios de gestion de qualité de l'air ou pour l'étude d'impacts de l'efficacité de mesures spécifiques de réduction des émissions.

Le Potentiel Oxydant en système acellulaire des particules (PO) est un indicateur proposé depuis quelques années (Borm et al. 2007, Janssen et al. 2015, Uzu et al. 2011) comme une métrique autre que la masse ou la composition chimique des PM atmosphériques pour évaluer leurs effets sanitaires. Aussi, dans le cadre du projet « ExPOSURE » (2016-CRD-31) le PO des PM₁₀ (PM_{2,5} pour le site ANDRA) a été mesuré avec trois méthodologies (DTT, AA, DCFH)⁵ pour des séries de prélèvements annuels sur 8 sites de différentes typologies (rurales, urbaines et vallées alpines) avec des données sur les profils chimiques des PM₁₀ disponibles à partir du projet « SOURCES » (ADEME 2018, LCSQA, Ineris, and IGE 2017a, 2017b). Les jeux de données ont été analysés à partir de la méthodologie PMF (PMF5.0) décrite précédemment (p.31) et ont permis d'étudier la relation PO-chimies-sources des particules.

Sur les villes étudiées dans ce projet, les trois tests utilisés corrélaient aussi bien avec les composés organiques que les métaux et les corrélations observées sont dépendantes de la saison. Il existe une remarquable homogénéité des variations saisonnières, avec un PO significativement plus élevé en hiver sur l'ensemble des sites étudiés. Des régressions univariées ont permis d'identifier quatre composants des PM comme des déterminants du PO : carbone organique (OC), carbone élémentaire (EC), monosaccharides et cuivre (Cu).

Une méthodologie qui paraît robuste pour attribuer un PO intrinsèque à chaque source d'émission des PM a ensuite été développée. Bien que ces travaux soient exploratoires, cette déconvolution du PO selon les sources issues d'un pré-traitement par approche PMF conduit à une certaine redistribution de l'importance des sources pour leur contribution au PO par rapport à leur contribution à la masse des PM. Les principales conclusions tirées de cette étude sont les suivantes :

- les sources qui contribuent de façon majoritaire au PO sont en accord avec les proxys individuels précédemment identifiés : « combustion de biomasse » et « véhiculaire » ;
- certaines sources qui ne contribuent pas de manière significative à la masse peuvent contribuer de manière significative au PO et, inversement, les sources qui contribuent le plus à la masse peuvent ne pas contribuer au PO ;
 - o en particulier, la part prise par la source « biomasse », déjà importante en masse est exacerbée en termes de PO (particulièrement pour le test AA), et la part de la source véhiculaire augmente elle aussi assez largement comparativement à sa contribution massique ;
 - o *a contrario*, les contributions des aérosols secondaires riches en nitrates et des aérosols secondaires riches en sulfates baissent significativement quand la métrique PO est employée par rapport à la masse des PM₁₀, ces aérosols secondaires contribuant de manière significative à la masse des PM₁₀ ;
 - o certaines sources, comme les espèces « primaires biogéniques » et la source « industrielle », qui ne contribuent pas fortement à la masse des PM₁₀, ont une contribution nettement plus importante au PO.

⁵ Le potentiel oxydant est un indicateur mesuré par des tests acellulaires quantifiant la capacité intrinsèque des particules à générer des espèces réactives de l'oxygène (ERO). Les tests acellulaires du PO des PM₁₀ utilisés (DTT-dithiothréitol, AA-acide ascorbique et DCFH-2',7'-dichlorofluorescéine) sont basés sur la consommation d'antioxydants pulmonaires ou substitués au contact des particules.

La Figure 4 présente les moyennes annuelles de ces contributions des sources au PO total (calculées comme la moyenne des contributions sur chaque jour d'observation au cours de l'année), pour les deux tests étudiés (DTTv, AAv)⁶. Ces contributions moyennes des sources au PO sont comparées à la contribution massique moyenne de ces mêmes sources à la reconstruction de la masse des PM₁₀ (PM_{2,5} pour le site ANDRA). Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour approfondir tous ces points.

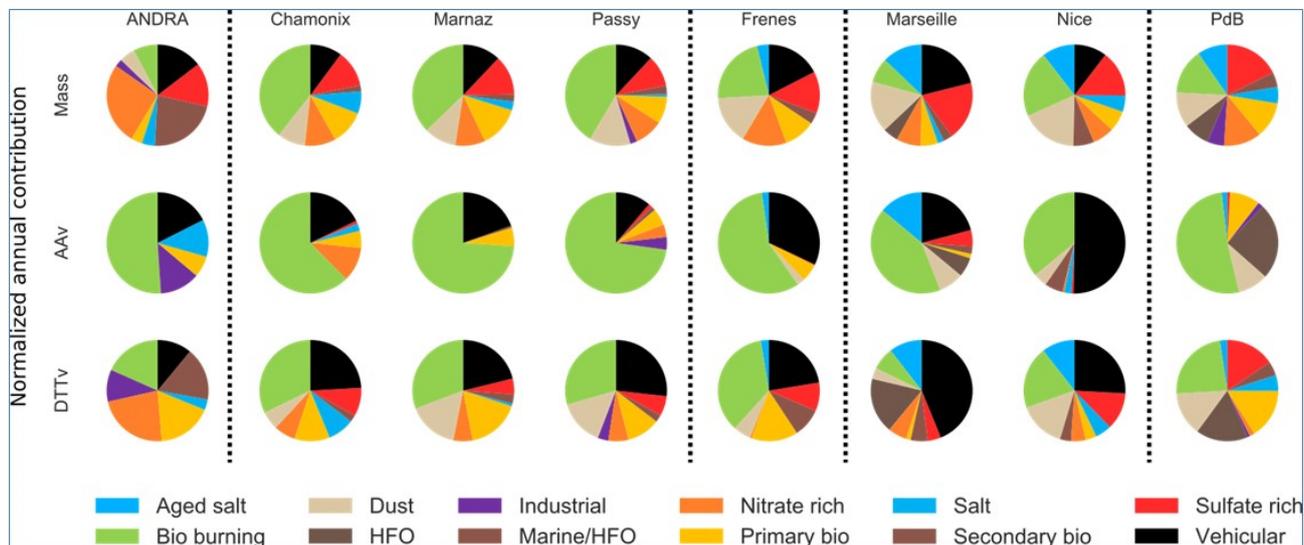


Figure 4 : Contributions relatives moyennes annuelles au PO (DTTv, AAv) et à la masse des PM₁₀ (PM_{2,5} pour le site ANDRA) des facteurs identifiés pour chacun des 8 sites (2016-CRD-31)

3.1.2 Pollution de l'air par le trafic routier

3.1.2.1 Enjeux sanitaires

Le trafic routier est la source de pollution de l'air ambiant extérieur probablement la plus documentée. Les effets sanitaires mis en évidence incluent des effets cardiovasculaires et respiratoires pour des expositions à court et à long termes. En 2012, le CIRC classait les émissions d'échappement des moteurs Diesel comme cancérigènes pour l'Homme (groupe 1) et les émissions d'échappement des moteurs à essence comme possiblement cancérigènes pour l'Homme (groupe 2B) (CIRC 2014). Le CIRC évaluait par ailleurs que les indications d'une cancérigénicité en expérimentation animale étaient « suffisantes » pour les émissions d'échappement des moteurs Diesel dans leur ensemble mais également pour les particules d'échappements et la fraction organique de ces particules d'échappements. Concernant la fraction gazeuse, les indications étaient évaluées comme « inadéquates ».

Il est reconnu que les populations résidant à proximité des voies à fort trafic routier ont une santé dégradée (HEI 2010, ORS IdF 2012). En 2008, 58 % des Franciliens déclaraient avoir déjà ressenti les effets de la pollution atmosphérique sur leur santé ou celle de leur entourage proche. Cette perception des risques était significativement renforcée pour les Franciliens ($p < 0,01$) qui déclaraient résider à proximité d'une autoroute ou d'une voie à grande circulation (soit 2 Franciliens sur 5), avec des effets ressentis pour 67 % d'entre eux (ORS IdF 2009). Plusieurs études épidémiologiques ont documenté une dégradation de la santé des populations résidant à proximité des voies à fort trafic routier (ORS IdF 2012). Les effets documentés de la pollution de l'air générée par le trafic incluent de manière non exhaustive et avec un niveau de preuve plus ou moins fort : l'exacerbation de l'asthme, l'incidence d'asthme infantile, les symptômes respiratoires non asthmatiques, l'altération de la fonction respiratoire, la mortalité cardiovasculaire, totale, par cancer

⁶ AAv : potentiel oxydant mesuré par test acellulaire à l'acide ascorbique normalisé par le volume d'air (nmol/min/m³), DTTv : potentiel oxydant mesuré par test acellulaire au dithiothréitol normalisé par le volume d'air (nmol/min/m³)

bronchopulmonaire et la morbidité cardiovasculaire (CIRC 2014, HEI 2010). D'autres atteintes telles que des leucémies aiguës myéloblastiques chez l'enfant et des troubles de la reproduction ont également été mises en relation avec la pollution de proximité liée au trafic, le lien de causalité étant moins documenté pour ces effets (Boothe et al. 2014, Carlos-Wallace et al. 2016, Janitz et al. 2016, Raaschou-Nielsen et al. 2016, Slama et al. 2007, Symanski et al. 2016, Wilhelm and Ritz 2003).

L'impact sanitaire de la pollution atmosphérique en proximité des axes à fort trafic routier a été évalué à Paris et en proche couronne selon les méthodes employées dans le cadre du projet européen Aphekom (ORS IdF 2012). Selon les estimations de l'ORS IdF (ordres de grandeur), cette proximité des axes à fort trafic routier est responsable de 16 % (intervalle de confiance = 3 %-30 %) des nouveaux cas d'asthme chez les enfants (< 18 ans). Ces estimations considèrent le bénéfice sanitaire dans l'hypothèse où plus personne ne réside à proximité du trafic, soit un scénario peu réaliste mais illustratif. Selon leurs estimations, ces effets chroniques, conjugués aux effets à court terme de la pollution de l'air liés au non-respect de la valeur guide de l'OMS pour les particules (PM₁₀ et PM_{2,5}), sont responsables de 29 % (intervalle de confiance ≈ 9 %-46 %) des crises d'asthme et de 16 % (intervalle de confiance ≈ 4 %-31 %) des hospitalisations pour asthme dans cette population, ce qui représente environ 650 hospitalisations évitables chaque année. Les mêmes ordres de grandeur sont obtenus par le projet Aphekom dans 10 villes européennes où il est estimé que le fait d'habiter à proximité de grands axes de circulation pourrait être responsable d'environ 15 à 30 % des nouveaux cas d'asthme de l'enfant, et, de proportions similaires ou plus élevées, de bronchopneumopathies chroniques obstructives et de maladies coronariennes chez les adultes âgés de 65 ans et plus (InVS 2012).

3.1.2.2 Enjeux de l'exposition à la pollution de l'air liée au trafic routier

Échelles spatiales d'influence de la pollution du trafic routier

Localement, les niveaux d'exposition à proximité du trafic sont généralement plus élevés qu'en situation de fond (notamment PM₁₀, PM_{2,5}, NO₂, HAP, HAM⁷, PUF⁸, CO). L'exposition aux particules y est la plus intense même en dehors des pics de pollution (Afsset 2009). La composition physico-chimique et la toxicité de la pollution peuvent être sensiblement différentes de celles de la pollution de fond (Schlesinger et al. 2006).

Des études ont montré que les émissions liées à la circulation affectent la qualité de l'air ambiant sur une large gamme d'échelles spatiales, allant du bord de la route jusqu'à l'échelle urbaine et plus largement l'échelle de fond régional (HEI 2010). D'après les données de la littérature principalement nord-américaine, la zone d'exposition la plus affectée par les émissions du trafic a une portée maximale de 300 à 500 mètres à partir d'un axe routier majeur, cet intervalle reflétant l'influence variable de la pollution de fond, des conditions météorologiques et de la saison (HEI 2010). Concernant les facteurs anthropiques, l'importance des niveaux de pollution est principalement fonction de la distance par rapport à l'axe routier et de la densité du trafic routier (Airparif 2008). Les niveaux de pollution au plus près des axes routiers sont ainsi les plus élevés puis une décroissance est identifiée en s'éloignant de l'axe. La distance d'influence des axes varie selon les polluants (Airparif 2012a). Pour le dioxyde d'azote, la distance d'influence est supérieure à 100 m pour les axes majeurs (100 000 à 200 000 véhicules par jour) : de l'ordre de 150-200 m pour le Périphérique et de 100-150 m pour les autoroutes en zone urbaine. Les niveaux de pollution décroissent très rapidement dans les 50 premiers mètres, puis diminuent plus progressivement dans les dizaines de mètres suivants. Pour les axes plus modestes (30 000 véhicules par jour), la zone d'impact est généralement comprise entre 50 et 100 m. Pour le benzène, la distance d'impact est un peu plus faible : de l'ordre de 100-150 m pour un axe majeur, et de 50 m pour un axe plus modeste. Pour les particules (PM_{2,5}, PM₁₀), les mesures sont moins nombreuses, mais les distances d'influence observées sont de l'ordre de 100 m.

Population exposée à la pollution de l'air par le trafic routier

⁷ HAM : Hydrocarbures Aromatiques Monocycliques

⁸ PUF : Particules ultrafines (moins de 0,1 µm de diamètre)

La densité de population exposée est plus importante en proximité des axes routiers et inclut une majorité des établissements recevant des publics sensibles (jeunes enfants, personnes âgées ou hospitalisées). Le projet européen Aphekom a montré qu'en moyenne, plus de 50 % de la population de 10 villes européennes résidait à moins de 150 mètres de rues ou de routes empruntées par plus de 10 000 véhicules par jour (InVS 2012). À Paris et en proche couronne, également plus de la moitié de la population réside à moins de 150 mètres d'un axe à fort trafic routier et environ un tiers à moins de 75 mètres (ORS IdF 2012). L'étude d'Airparif (2012a) montrait qu'en Île-de-France, 55 % des crèches, écoles, structures d'hébergement des personnes âgées, hôpitaux, mais aussi terrains de sport en plein air sont situés à moins de 500 m d'un axe routier majeur. Cette étude mettait en évidence que le dépassement des valeurs limites réglementaires contraignantes concernait un quart des établissements pour les PM_{10} (valeur limite : $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne journalière) et un tiers pour le NO_2 (valeur limite : $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle). Tous les établissements de la région dépassaient la valeur guide pour les $PM_{2,5}$ ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne annuelle). Un dépassement de l'ensemble des normes de qualité de l'air pour les particules, le NO_2 et le benzène était observé pour les établissements implantés en moyenne à moins de 40 mètres d'un axe important, soit 25 écoles (près de 28 000 élèves de maternelles et primaires), 85 crèches (3 250 places), 66 hôpitaux (6 700 lits) et 36 hébergements pour personnes âgées (2 500 places).

Transfert de pollution extérieur - intérieur des bâtiments

Les polluants émis à l'extérieur peuvent pénétrer à l'intérieur des locaux par le système de ventilation et par infiltration (fenêtres, portes, cheminées, etc.) Si le transfert des polluants de l'air extérieur vers le milieu intérieur est conditionné en grande partie par le dispositif de ventilation, les capacités de pénétration à travers le bâti diffèrent selon le polluant considéré, de même que les comportements à l'intérieur (réactivité, capacité de déposition et de remise en suspension). Par rapport à l'air extérieur, les niveaux des polluants mesurés à l'intérieur des bâtiments localisés à proximité des axes routiers suivent les teneurs extérieures avec un léger déphasage temporel (Airparif 2008). D'après une étude expérimentale (CSTB 2001), le monoxyde de carbone et les oxydes d'azote (NO_2 et NO) pénètrent largement dans le logement (entre 80 % et 100 %). Les concentrations intérieures de dioxyde de soufre (SO_2) sont diminuées de 33 % par rapport aux concentrations extérieures, les particules fines ($PM_{2,5}$) et les fumées noires de 20 %. L'ozone (O_3), mesuré seulement en été, est le polluant qui subit la plus forte diminution à l'intérieur, environ 80 %. Des mesures réalisées par Airparif (2010) à l'extérieur et à l'intérieur de quelques bâtiments situés à proximité du Boulevard Périphérique (BP) indiquent quant à elles une concentration moyenne de $PM_{2,5}$ mesurée à l'intérieur d'une maison de retraite comparable à celle mesurée en situation de fond à la station fixe, une concentration moyenne de NO à l'intérieur des bâtiments similaire à celle enregistrée au même endroit en air extérieur, mais une concentration de NO_2 à l'intérieur de 35 % à 55 % inférieure en moyenne à celle extérieure. Un nombre restreint de mesures dans une pièce d'une maison de retraite située à proximité du BP indiquent que près de 90 % des particules $PM_{2,5}$ mesurées dans la pièce étudiée étaient d'origine extérieure à partir de la mesure du ratio moyen sulfates int/sulfates ext (Airparif 2008). Une étude menée à Helsinki et Amsterdam a estimé que 70 % à 84 % des $PM_{2,5}$ mesurées à l'intérieur provenaient de l'extérieur (Yli-Tuomi et al. 2008). Une large fraction des particules ultrafines et du mode d'accumulation qui sont d'origine extérieure peuvent pénétrer à l'intérieur des bâtis et causer des concentrations intérieures élevées (Diapouli, Chaloulakou, and Spyrellis 2007). Les ratios intérieur/extérieur pour les particules sont notamment fonction de la granulométrie, les ratios observés étant proches de 1 pour les particules fines quel que soit le type de bâti ou encore l'efficacité de la ventilation, alors que pour les particules plus grosses dont le diamètre dépasse environ $2 \mu\text{m}$, les concentrations intérieures sont faiblement corrélées aux concentrations extérieures (Blondeau et al. 2005). En effet, pour ces particules, d'une part le bâti peut jouer un rôle de filtre, d'autre part, elles se déposent rapidement sur les surfaces. Par ailleurs, en proximité du trafic, les concentrations de pollution diminuent avec la hauteur des étages, en particulier lorsque les conditions météorologiques sont dispersives (Airparif 2008). Par exemple, des mesures en bordure d'une avenue fortement fréquentée au niveau de la porte de Gentilly montrent une baisse de 30 % pour le dioxyde d'azote et le benzène, entre le rez-de-chaussée et le deuxième étage. Enfin, l'orientation du logement et la présence de bordures arborées le long de l'axe routier sont également susceptibles d'influer sur les niveaux intérieurs. Il a en effet été observé que les

niveaux extérieurs relevés subissent un abattement, l'immeuble ou la bordure arborée jouant un rôle d'écran par rapport à la source de polluants (Airparif 2008, Maher et al. 2013). Plus de détails sont disponibles dans une revue actualisée des transferts de pollution de l'extérieur vers l'intérieur des bâtiments (Anses 2019).

3.1.3 Émissions de polluants et spécificités du trafic

3.1.3.1 Inventaire des émissions de polluants

Des inventaires des émissions de polluants des différents secteurs d'activités sont réalisés périodiquement (annuellement pour la France). Les **polluants atmosphériques et gaz à effet de serre** pris en compte sont les suivants :

- les **NOx**, oxydes d'azote. Le NO₂ est un précurseur de nitrate d'ammonium, composant des particules ;
- les **particules**, PM₁₀, PM_{2,5} et PM_{1,0} ;
- le **carbone suie**⁹ est un composé que l'on mesure généralement dans la fraction PM_{2,5}, constitué de carbone inorganique produit par les combustions incomplètes. Il est couramment appelé « black carbon » (**BC**) ;
- les **COVNM** : les composés organiques volatils non méthaniques sont une famille de plusieurs centaines d'espèces qui sont recensées pour leur impact sur la santé et comme précurseurs dans la formation de l'ozone. Certains sont des précurseurs de la matière organique des particules. Ils peuvent être d'origine anthropique ou biogénique ;
- le **SO₂**, dioxyde de soufre. Compte tenu des niveaux de SO₂ rencontrés aujourd'hui dans l'environnement, les émissions de SO₂ ne sont plus problématiques en Île-de-France et concernent quelques régions avec des sites industriels. Le SO₂ est un précurseur de sulfate d'ammonium ;
- le **NH₃**, l'ammoniac. L'ammoniac est un précurseur de nitrate et sulfate d'ammonium, composants volatils des particules. Les dépôts ammoniacaux entraînent également divers dérèglements physiologiques de la végétation ;
- les **HAP** : somme des 8 principaux hydrocarbures aromatiques polycycliques substances de la norme NF X 43329 : benzo(a)pyrène (BaP) ; benzo(b)fluoranthène (BbF) ; benzo(k)fluoranthène (BkF) ; indéno(1,2,3-cd)pyrène (IndPy) ; benzo(g,h,i)pérylène (BghiPe) ; benzo(a)anthracène (BaA) ; benzo(a,h)anthracène (BahA) et le fluoranthène (FluorA) ;
- les **GES** : ensemble des gaz à effet de serre (7 composés dont les trois principaux CO₂, CH₄ et N₂O) exprimés en équivalent pouvoir de réchauffement global (PRG) du CO₂. Les PRG utilisés sont ceux définis par le GIEC¹⁰ pour le protocole de Kyoto. Les émissions détaillées des gaz à effet de serre et les émissions indirectes de CO₂ liées à la consommation d'énergie sont également déterminées ;
- les **métaux lourds** : As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn ;
- le **CO**, monoxyde de carbone, les **PCDDF**, dioxines et furannes : leurs émissions sont également déterminées.

⁹ En pratique, le guidebook EMEP 2016 pour l'inventaire européen exprime le carbone suie en fraction de carbone suie dans les particules PM_{2,5} (f-BC) en s'appuyant également sur la fraction de carbone élémentaire (f-EC) issue d'une revue de la littérature et en supposant que le carbone élémentaire (EC) et le carbone suie (BC) sont équivalents. Cette hypothèse permet d'utiliser la plus large base de données disponibles, bien que les définitions et méthodes de détermination diffèrent (le carbone organique OC contribue à l'absorption de la lumière par les particules mais dans une moindre mesure que l'EC). Pour le secteur des transports routiers, il est considéré dans le guidebook que cette approximation est d'une importance limitée par rapport à l'incertitude de détermination des émissions de chacun de ces composés par technologie de véhicule.

¹⁰ Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

Pour l'élaboration de l'inventaire de la région Île-de-France, les émissions de ces polluants sont inventoriées pour les 10 grands **types de sources** suivants :

- la **production d'énergie** : les installations concernées sont les centrales thermiques de production d'électricité, les installations d'extraction du pétrole, les raffineries et les stations-service ;
- l'**industrie manufacturière** : les émissions sont liées aux procédés de production et au chauffage des locaux des entreprises. Les procédés industriels pris en compte sont principalement ceux mis en œuvre dans les aciéries, l'industrie des métaux et l'industrie chimique. Les émissions liées à l'utilisation d'engins spéciaux et aux utilisations industrielles de solvants (application de peinture, dégraissage, nettoyage à sec, imprimeries, application de colles...) sont également inventoriées ;
- les **chantiers et carrières** : les émissions de particules sont dues aux activités de construction de bâtiments et travaux publics ainsi que celles des carrières. Le secteur chantier intègre également l'utilisation d'engins et l'application de peinture ;
- le **traitement des déchets** : les installations d'incinération de déchets ménagers et industriels ainsi que les centres de stockage de déchets ménagers et de déchets ultimes et stabilisés de classe 2 sont pris en compte dans ce secteur d'activité ;
- les **secteurs résidentiel et tertiaire** : ce secteur inclut les émissions liées au chauffage des habitations et des locaux du secteur tertiaire, ainsi que celles liées à la production d'eau chaude de ces secteurs et aux installations de chauffage urbain. Les émissions liées à l'utilisation domestique de solvants sont également considérées : application de peintures, utilisation de produits cosmétiques, de nettoyeurs, etc. ;
- le **trafic routier** : les émissions sont issues de la combustion de carburant (émissions à l'échappement) et de l'évaporation de carburant (émissions de COVNM des réservoirs et du circuit de distribution du carburant) d'une part, et de l'usure des équipements (émissions de particules des freins, pneus et routes) d'autre part. La remise en suspension des particules au sol lors du passage des véhicules n'est pas prise en compte ;
- le **trafic ferroviaire et fluvial** : ce secteur comprend les émissions du trafic ferroviaire (hors remise en suspension des poussières) et du trafic fluvial ;
- les **plates-formes aéroportuaires** : les émissions prises en compte sont celles des avions et des activités au sol (hors trafic routier induit en zone publique des plates-formes). Les émissions des avions (combustion des moteurs) sont calculées suivant le cycle LTO (*Landing Take Off*) défini par l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) avec des durées adaptées aux plates-formes franciliennes. Les émissions de particules liées à l'abrasion des freins, des pneus et de la piste sont également intégrées. Les activités au sol prises en compte sont : les centrales thermiques des plates-formes aéroportuaires, les APU (*Auxiliary Power Unit*) servant à alimenter l'avion en électricité et pour la climatisation ainsi que les GPU (*Ground Power Unit*) qui sont des unités mobiles sur la plate-forme qui peuvent alimenter les avions en électricité à la place des APU ;
- le **secteur agricole** : ce secteur comprend les émissions des terres cultivées liées à l'application d'engrais (NH₃, NO et N₂O) et aux activités de labours et de moissons (particules), des engins agricoles ainsi que celles provenant des activités d'élevage et des installations de chauffage de certains bâtiments (serres...). Les émissions de particules lors des épandages sont également prises en compte ;
- les **émissions naturelles** : les émissions de COVNM de ce secteur sont celles des végétaux et des sols des zones naturelles (hors zones cultivées).

Les émissions de ces sources sont calculées à une échelle communale puis spatialisées sur une grille dont le maillage est de 1 x 1 km².

Pour la France, les émissions sont spatialisées sur une grille de 50 x 50 km² et déclinées selon les secteurs d'activité avec la nomenclature indiquée en Tableau 1 (rapportage EMEP), qui regroupe les différentes sources mentionnées précédemment, mais classées selon les secteurs économiques et énergétiques.

Tableau 1 : Nomenclature EMEP des secteurs d'activités de l'inventaire des émissions polluantes

Secteur	Description
1	Combustion dans les industries de l'énergie et de la transformation (sources fixes)
2	Installations de combustion non industrielles (sources fixes)
3	Combustion dans l'industrie manufacturière (sources fixes)
4	Processus de production (sources fixes)
5	Extraction et distribution de combustibles fossiles et d'énergie géothermique
6	Utilisation de solvants et autres utilisations de produits
7	Transport routier
8	Autres sources mobiles et engins
9	Traitement et élimination des déchets
10	Agriculture
11	Autres sources et puits

3.1.3.2 Émissions des véhicules et technologies

Le trafic routier est à l'origine de nombreux polluants de l'air (Anses 2012). Il est l'un des principaux émetteurs de particules, de carbone suie, de HAP et de NOx, en particulier dans les zones urbaines (Afsset 2009, CITEPA/Secten 2016, Karagulian et al. 2015, LCSQA and Ineris 2013).

Les particules primaires issues des transports routiers sont principalement émises par les véhicules Diesel non équipés de filtre à particules. Le niveau des émissions est très dépendant de l'âge et de la technologie du véhicule, les véhicules anciens contribuant fortement aux émissions particulaires du trafic malgré un nombre de kilomètres parcourus relativement faible (Figure 5).

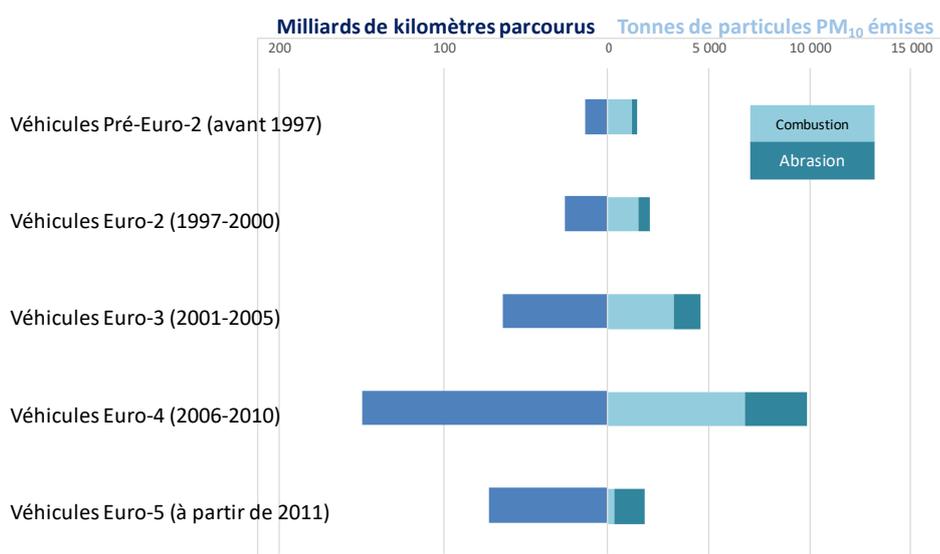


Figure 5 : Mise en perspective des kilomètres parcourus et des émissions de PM₁₀ selon les normes Euro pour les véhicules particuliers Diesel d'après l'estimation du parc national 2013 du CITEPA (CITEPA/Ominea 2016a)

La composition du Diesel et les technologies de motorisation ont évolué depuis de nombreuses années en vue de diminuer l'impact des émissions des moteurs des véhicules Diesel sur la qualité de l'air. La diminution dans les carburants de la concentration en soufre (obligatoirement inférieure à 10 mg/kg depuis 2009 en France), la mise en place de catalyseurs d'oxydation (à partir de 1996 en France) et de filtres à particules de type « *wall-flow* »¹¹ (à partir de 2000 en France avec une généralisation à partir de 2009/2010 avec la norme Euro 5) ont permis une large réduction de certaines émissions polluantes incluant les particules et les HAP totaux (phases particulaire et gazeuse) (Keyte, Albinet, and Harrison 2016). En 2016, 42 % du parc de véhicules particuliers Diesel en circulation n'est pas encore équipé d'un filtre à particules (38 % en véhicules x kilomètres) (HBEFA¹² v3.2 parc France). Les véhicules utilitaires lourds, dont la durée de vie est plus longue, restent très peu équipés en filtres à particules. Le taux d'équipement en filtres à particules des véhicules légers augmente avec l'introduction des nouveaux véhicules Euro 5 et Euro 6 dans le parc roulant et pourrait atteindre 96 % à l'horizon 2030 (Andre, Roche, and Bourcier 2014).

Le carburant et les technologies pour les moteurs essence ont également évolué. Ainsi dans les carburants essence, le plomb tétraéthyle a été interdit en tant qu'additif au carburant (à partir de 2000 en France) et la teneur en benzène a été limitée (obligatoirement inférieure à 1 % en volume depuis 2000 en France¹³). Les automobiles essence sont maintenant équipées d'un système électronique d'injection indirecte de carburant¹⁴ et de catalyseurs trois voies qui réduisent les émissions d'oxydes d'azote, de monoxyde de carbone, d'hydrocarbures imbrûlés (depuis 1993 avec la norme Euro 1). Pour améliorer leur efficacité énergétique, certains moteurs essence récents sont équipés d'un système d'injection directe de carburant dans le cylindre, ce qui peut cependant augmenter les émissions de particules.

3.1.3.3 Émissions d'hydrocarbures aromatiques polycycliques par le trafic routier

Certaines espèces d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ont une toxicité bien documentée et sont classées cancérigènes pour l'Homme (groupes 1, 2A ou 2B). Cependant, la question des émissions d'hydrocarbures aromatiques polycycliques par le trafic routier et de leur contribution à la pollution atmosphérique est finalement peu documentée et complexe compte tenu des différentes espèces réactives composant cette famille chimique et des incertitudes sur leur mesure (variabilité inter-laboratoire, problèmes de contamination, relargages, etc.) et sur leurs facteurs d'émission (variabilité de plusieurs ordres de grandeur).

Des mesures sur deux stations de la région grenobloise du 9 au 23 septembre 2011 (Polo Rehn 2013) indiquent que 5 espèces de HAP (phénanthrène, anthracène, fluoranthène, pyrène et benzo(a)anthracène) sur les 14 étudiées présentaient un enrichissement causé par la source véhiculaire et que la majorité des espèces des HAP ne présentaient pas de différence de concentrations lors de la période de pointe de trafic. Les résultats de l'approche de type PMF (« *Positive Matrix Factorization* »¹⁵) indiquent que 53 % de la masse totale en HAP légers était expliquée par le facteur « échappements du trafic » (« *traffic exhaust* ») (Polo Rehn 2013).

¹¹ Le filtre à particules de type « *wall-flow* » est le plus commun des types de filtres à particules appliqués au transport. Il est réalisé à partir d'une structure en nid d'abeilles. Cette configuration du nid d'abeilles permet, en obstruant un canal sur deux, de créer un chemin de filtration pour les gaz, en les forçant à traverser les parois poreuses des canaux.

¹² HBEFA : *Handbook Emission Factors for Road Transport*

¹³ Directive européenne n° 98/70/CE entrée en vigueur le 1^{er} janvier 2000 en France.

¹⁴ Avec le système d'injection de carburant essence, le mélange air/carburant est formé à l'extérieur du cylindre du moteur, dans le collecteur d'admission.

¹⁵ La PMF (*Positive Matrix Factorization*) (Paatero 1999, Paatero and Tapper 1994) est une technique d'analyse factorielle multivariée des moindres carrés pondérés qui prend en compte l'évolution de la concentration des espèces chimiques mesurées et rassemble ainsi dans un même facteur les fractions des espèces dont les concentrations évoluent de la même manière (projet « SOURCES », ADEME (2018)). Chaque facteur est ensuite identifié et attribué à une source (et/ou catégorie de source) en se basant sur les traceurs chimiques caractérisant chaque profil de facteur résolu et leur répartition dans celui-ci.

Les HAP légers sont majoritairement émis par les véhicules Diesel (fluoranthène, pyrène) d'après la littérature (El Haddad et al. 2009, Marr et al. 1999) même si Polo Rehn (2013) observe que les véhicules essence en émettent aussi des quantités non négligeables. En comparaison des véhicules Diesel, les véhicules essence sont décrits comme les principaux émetteurs des HAP plus lourds ((Li and Kamens 1993, Miguel et al. 1998, Rogge et al. 1993) cités dans (Keyte, Albinet, and Harrison 2016)). Le profil chimique des espèces HAP émises varie donc selon les différentes motorisations essence ou Diesel, ainsi que selon la présence ou non de système de contrôle des émissions comme le filtre à particules (FAP) et selon l'ancienneté des technologies.

Des études suggèrent l'importance de tenir compte des phases gazeuses et particulaires, considérant notamment que les concentrations de HAP en phase gazeuse relativement à la phase particulaire sont élevées dans l'air ambiant par rapport aux émissions primaires, en particulier pour les HAP de faibles poids moléculaires (Keyte, Albinet, and Harrison 2016, Polo Rehn 2013). Les HAP en phase gazeuse sont rarement mesurés en France, les espèces HAP réglementées¹⁶ plus souvent mesurées étant relativement lourdes et donc presque exclusivement présentes en phase particulaire (à l'exception du benzo(a)anthracène semi-volatil).

Aux États-Unis, une étude indique que les émissions Diesel contribuent majoritairement aux concentrations ambiantes de HAP à partir du ratio des concentrations journalières fluorène/(fluorène+pyrène) mesurées entre 1990 et 2014 sur 169 stations distribuées sur le territoire nord-américain (Liu et al. 2017). Au Royaume-Uni, une étude indique qu'en sites urbains les émissions du trafic (échappements Diesel, carburants pétroliers imbrûlés) contribuent majoritairement aux concentrations en HAP totaux (somme des 29 espèces de HAP particulaires et gazeux étudiés) à partir d'une approche PMF réalisée sur les concentrations mesurées de 2006 à 2008 sur 14 sites urbains du réseau de surveillance britannique (Jang, Alam, and Harrison 2013). Lorsque la PMF était appliquée à un jeu de données plus récent (2008-2010) concernant les HAP particulaires uniquement, les échappements du trafic contribuaient là aussi majoritairement aux concentrations de HAP particulaires sur l'année, avec une contribution significative de la combustion de charbon domestique en saison froide (Jang, Alam, and Harrison 2013).

3.2 Analyse rétrospective : la France métropolitaine

3.2.1 Contexte

La France représente une superficie de 633 208 km² dont 543 965 km² pour la métropole, et compte 65 907 160 habitants dont 64 027 958 en métropole (au 1^{er} janvier 2014). La France métropolitaine compte une densité moyenne de 116 habitants/km². La population est inégalement répartie sur le territoire et est particulièrement concentrée dans les zones urbaines où se concentrent également les émissions du trafic routier. L'Île-de-France compte 12 027 565 habitants, soit 19 % de la population métropolitaine et une densité de 1001 habitants/km² (en 2011), devant l'Auvergne-Rhône-Alpes avec 7 820 966 habitants représentant 12 % de la population et 110 habitants/km² (données 2014).

L'étude de l'Institut national de la statistique et des études économiques montre que 85 % de la population résident dans les aires urbaines qui sont des zones d'échanges intensifs entre les lieux de domicile et de travail (Figure 6) et 60 % de la population résident au sein même des pôles des grandes aires urbaines (> 800 habitants/km²) (INSEE 2011).

¹⁶ Total des 8 HAP réglementés en France (arrêté du 02/02/1998 modifié) : benzo(a)pyrène, benzo(b)fluoranthène, benzo(k)fluoranthène, indeno(1,2,3-cd)pyrène, benzo(g,h,i)pérylène, fluoranthène, dibenzo(a,h)anthracène, benzo(a)anthracène.

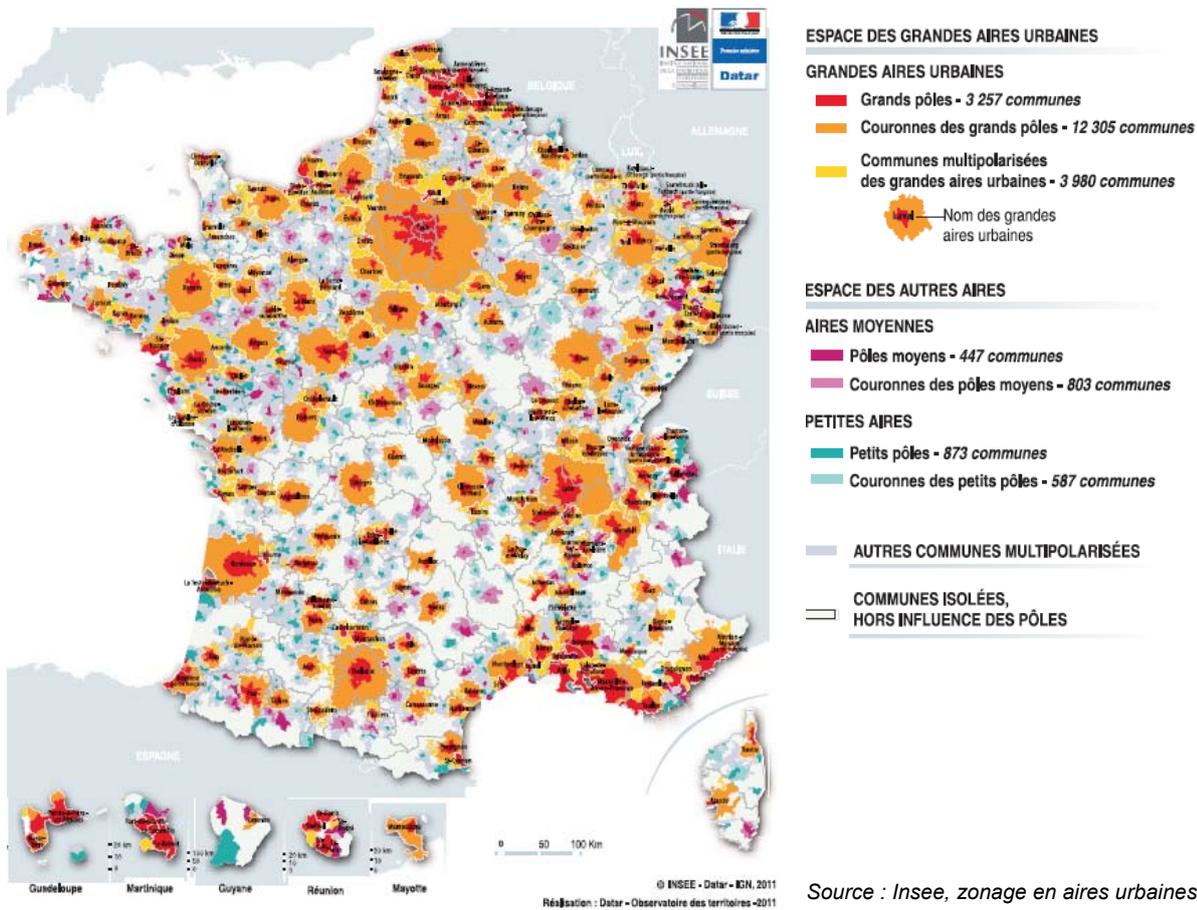


Figure 6 : Zonage en aires urbaines de la France (INSEE 2011)

Concernant l'évolution démographique, la population a augmenté de 0,5 % par an en moyenne de 2009 à 2014, ce qui reflète l'évolution de l'effectif de la population exposée (INSEE 2017). Cette croissance s'est essentiellement faite dans les grandes villes et leurs aires d'influence, dessinées par les déplacements domicile-travail de la population (Figure 7).

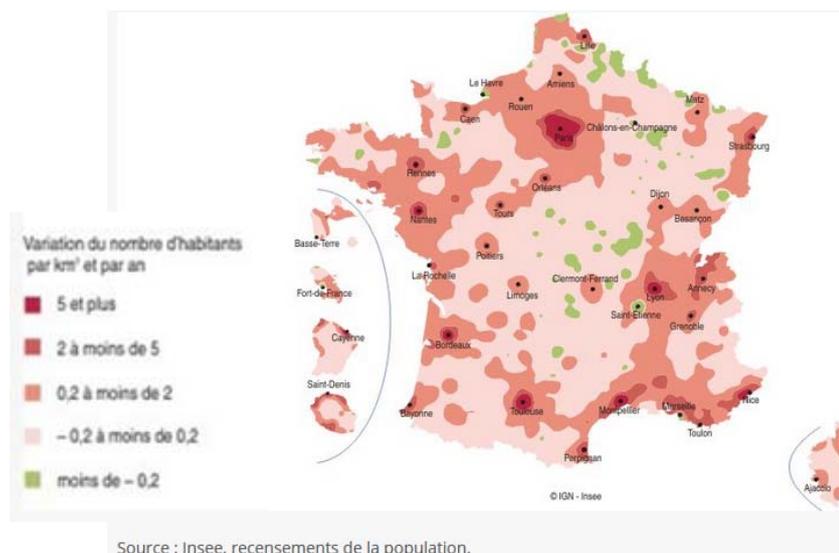


Figure 7 : Variation annuelle de la densité de la population entre 1982 et 2011 (INSEE 2014)

Concernant l'occupation des sols, le territoire national est dans une dynamique d'urbanisation en corollaire à l'augmentation démographique en zones urbaines précédemment décrite. Le rythme de croissance de la surface des terres artificialisées en métropole s'établit, entre 2006 et 2012, à +0,49 % par an. Il est nettement inférieur à celui observé entre 2000 et 2006 (+1,30 % par an). Comme le prévoyaient les études démographiques, les centres urbains et les axes de communication sont les zones qui se développent le plus. Le taux de territoires artificialisés en métropole (à concept d'artificialisation proche) s'élève à 5,6 % selon CORINE Land Cover 2012 (Figure 8) et à 9,3 % selon l'enquête par sondage Teruti-Lucas 2014. Ce taux diffère d'une région à l'autre et est le plus élevé en Île-de-France (22 % en 2012). Près de la moitié des terres artificialisées entre 2006 et 2014 sont destinées à l'habitat individuel et 16 % aux réseaux routiers.

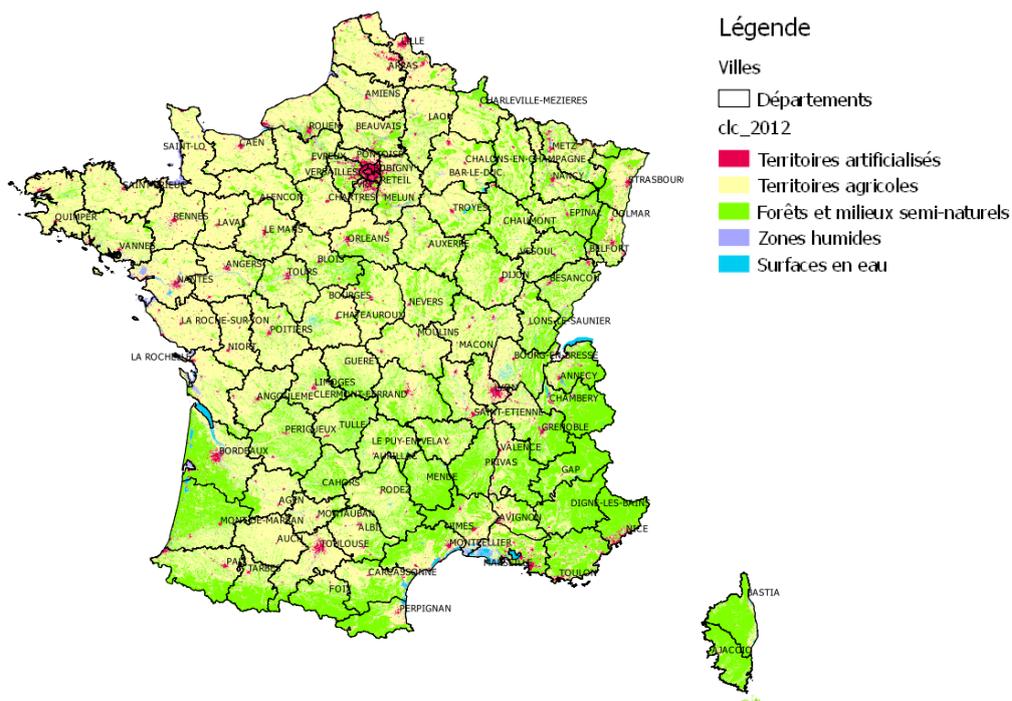


Figure 8 : Occupation des sols de la France métropolitaine selon la nomenclature Corine Land Cover 2012 (données CGDD, 2015)

3.2.2 Analyse rétrospective

3.2.2.1 Parc automobile et trafic routier en France métropolitaine

D'après les données du CITEPA (CITEPA, 2018. *Rapport OMINEA – 15^{ème} édition*), le trafic cumulé des voitures (toutes motorisations confondues : essence + Diesel + GPL + électrique + GNV, hors véhicules utilitaires légers) en France en 2016 est réalisé :

- à 98 % par des voitures aux normes Euro 2 et plus (donc équipées de pots catalytiques) ;
- à 93 % par des voitures aux normes Euro 3 et plus ;
- à 79 % par des voitures aux normes Euro 4 et plus ;
- à 41 % par des voitures aux normes Euro 5 et plus ;
- et à 6 % par des voitures à la norme Euro 6.

Le rythme de renouvellement du parc de véhicules est une donnée importante en matière de réduction des émissions de substances polluantes dans les gaz d'échappement. En 2015, 31 % des véhicules composant le parc ont plus de 10 ans et 68 % ont plus de 5 ans (CCFA 2017). Le parc est pratiquement renouvelé en une quinzaine d'années. L'âge moyen du parc en 2015 est de 8,9 ans. L'âge moyen augmente d'année en année et a été multiplié par 2,2 en 20 ans. L'âge moyen de retrait de la circulation est de l'ordre de 13 ans.

Concernant la circulation routière (en véhicules x kilomètres), elle progresse de +1,2 % par an en moyenne et à un rythme plus soutenu en 2015 (+2,2 %) et 2016 (+2,5 %) (CCFA 2017). En 2016, elle concerne aussi bien les voitures particulières (+2,8 %) que les bus et cars (+2,3 %) et les poids lourds pour le transport de marchandises (+3,2 %, première hausse après 4 années de baisse, +3,1 % pour ceux immatriculés en France et +3,4 % pour ceux immatriculés à l'étranger).

Après une diésélisation qui s'est poursuivie jusqu'en 2015 (67,4 % du parc en 2015 contre 66,7 % en 2013), pour la première fois en 2016, la part des Diesel dans le parc de véhicules légers recule (-0,3 points) (CCFA 2017). La part du Diesel demeure à 79 % de la circulation des véhicules légers immatriculés en France, contre 55 % en 2000. Concernant le parc poids lourds, composé essentiellement de véhicules Diesel, il a progressé de +0,9 % par an entre 1990 et 2002 mais recule depuis cette date de -0,6 % par an en moyenne. Avec la reprise des immatriculations en 2015 et 2016, la norme Euro VI représente près d'un quart du parc de poids lourds en 2016 contre près de 15 % en 2015 (CCFA 2016, 2017).

Les motorisations alternatives (électriques, hybrides) restent, malgré leur progression, à un niveau très limité (Andre, Roche, and Bourcier 2014). Sur l'ensemble de l'année 2016, 21 758 voitures particulières électriques ont été immatriculées en France contre 10 567 en 2014, soit une progression de 68,5 %¹⁷. En 2016, l'achat des véhicules hybrides rechargeables est en hausse : 7 482 véhicules vendus, soit près de 34 % de plus qu'en 2015.

Les Figure 9 et Figure 10 présentent l'évolution du parc roulant et du parc statique en France métropolitaine.

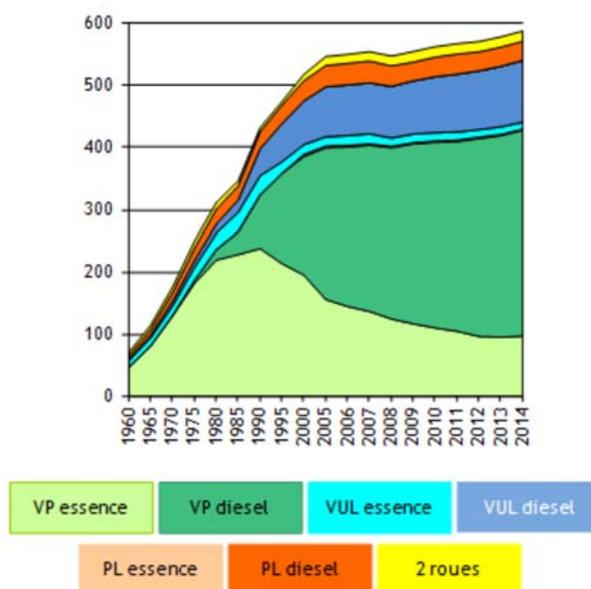


Figure 9 : Évolution du parc roulant en France métropolitaine en milliards de véhicules x kilomètres (CITEPA/Secten 2016)

¹⁷ Source : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/developpement-des-vehicules-propres>, consulté le 1^{er} février 2017

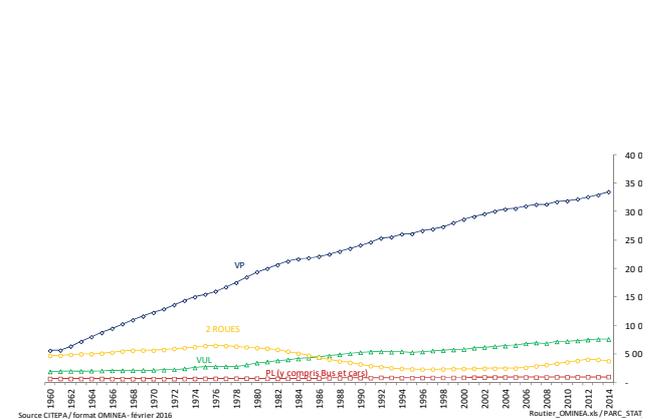
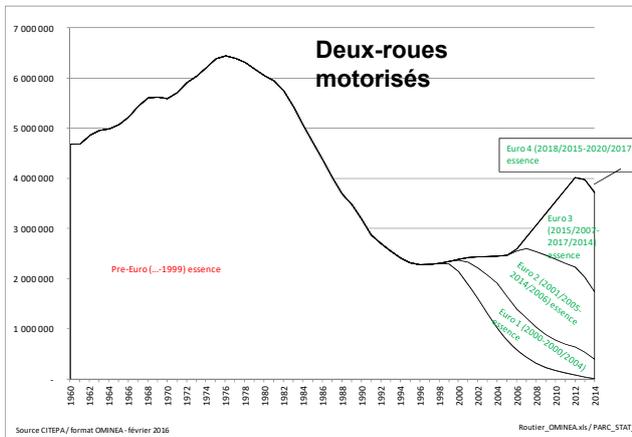
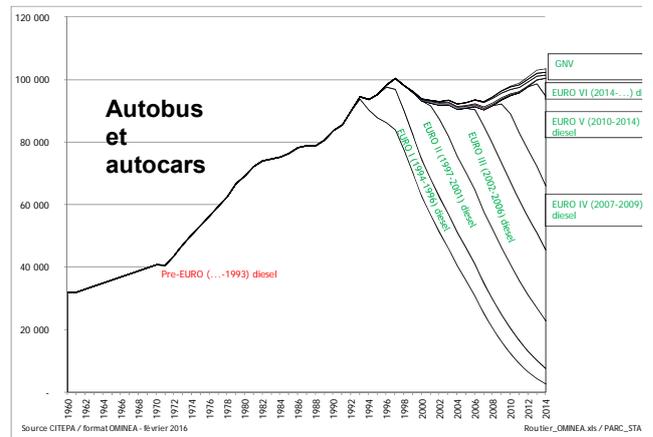
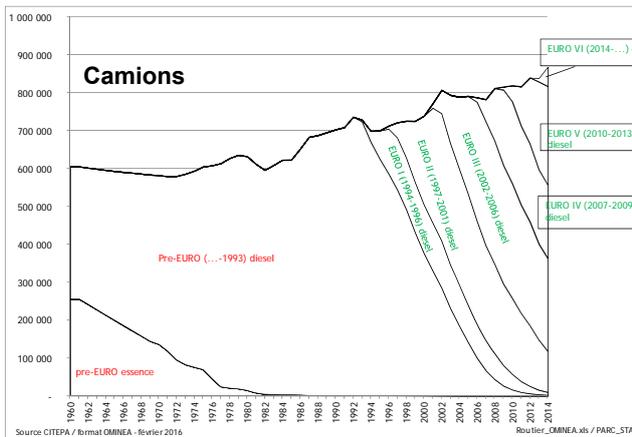
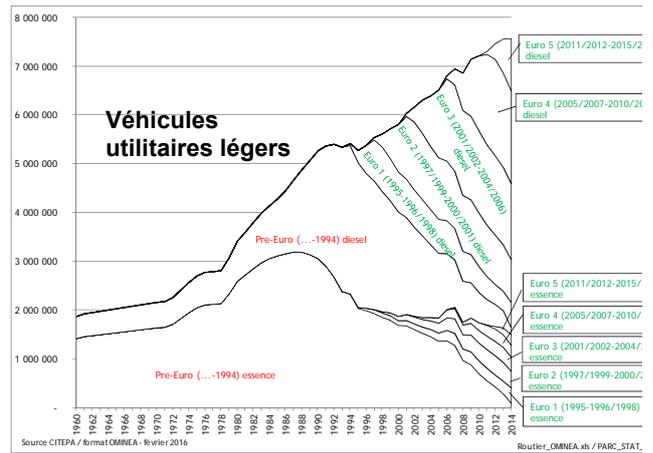
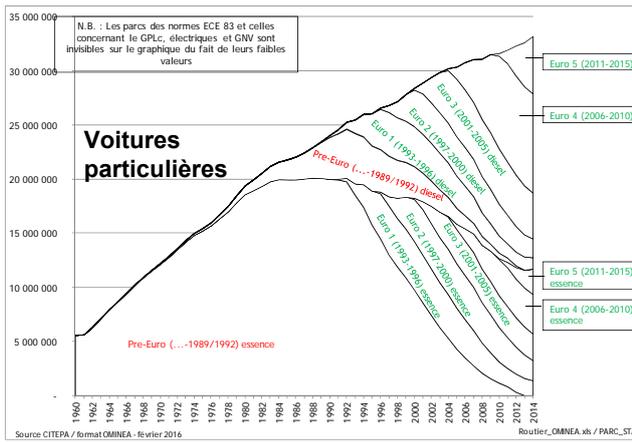


Figure 10 : Évolution du parc statique (nombre de véhicules) en France métropolitaine (CITEPA/Ominea 2016b)

En France, la part des voitures neuves équipées d'un moteur Diesel dans les immatriculations totales se situe à 52,1 % en 2016 et a diminué par rapport aux années 2005, 2010 et 2015 (CCFA 2016, 2017) (Figure 11). En Europe occidentale, après avoir progressé de 1997 à 2007, elle oscille autour de 50 % et a diminué en 2016 de plus de deux points à 49,5 % avec des volumes néanmoins augmentés de 1 % compte tenu de la vigueur de la demande. En Irlande, au Luxembourg et au Portugal, près de deux voitures neuves sur trois restent des voitures Diesel. La part du Diesel a légèrement augmenté en Italie (+1,8 points à 57 %) et a nettement baissé en Espagne (-5,8 points à 57 %).

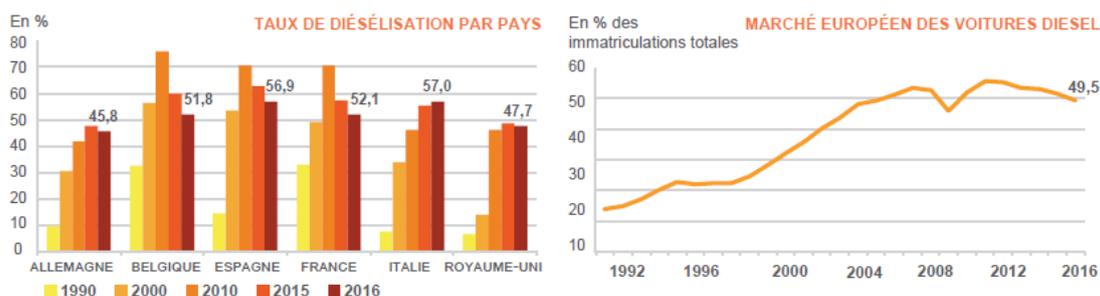


Figure 11 : Évolution du taux de diésélisation des voitures en Europe occidentale en % des immatriculations totales (CCFA 2017)

3.2.2.2 Émissions en France métropolitaine entre 1990 et 2014

Les émissions anthropiques nationales de certains polluants atmosphériques sont estimées chaque année par secteur d'activités (CITEPA/Secten 2016).

Émissions du trafic

En 2014, les transports routiers représentaient 13 % des émissions nationales de particules primaires PM_{10} , 17 % pour les $PM_{2,5}$, 50 % pour le carbone suie, 25 % pour les HAP réglementés¹⁸ et 56 % pour les NO_x (CITEPA/Secten 2016). Cependant, les émissions ne sont pas homogènes sur le territoire ; elles sont plus intenses dans les aires urbaines où résident 85 % de la population. Ainsi en région Île-de-France en 2012, le trafic routier était à l'origine de 28 % des émissions de particules primaires PM_{10} , de 35 % pour les $PM_{2,5}$, de 66 % pour le carbone suie (dont la quasi-totalité liée aux véhicules Diesel) et de 50 % pour les HAP réglementés (dont la quasi-totalité liée aux véhicules Diesel).

Évolution des émissions en France métropolitaine entre 1990 et 2014

Les émissions ont globalement baissé sur la période 1990-2014, avec toutefois de grandes disparités selon les polluants et leurs origines. L'évolution des émissions des polluants principalement liés au transport routier est détaillée ci-dessous ($PM_{2,5}$, BC, NO_x) et en Annexe 2 (PM_{10} , HAP, COVNM, CO, Pb, Cu, NH_3).

Les émissions primaires de particules PM_{10} et $PM_{2,5}$ ont diminué entre 1990 et 2014 respectivement de 52 % et 60 %. Cette baisse est essentiellement liée aux efforts de réduction et évolutions d'activité des secteurs industriels (sidérurgie et extraction du charbon notamment). Le secteur résidentiel contribue également à la réduction des émissions (effet de structure), ainsi que les transports (Figure 12 et Annexe 2).

Les émissions de **carbone suie** ont diminué de 53 % entre 1990 et 2014 pour les mêmes raisons que les PM_{10} et $PM_{2,5}$. La différence observée par rapport aux $PM_{2,5}$ s'explique par le fait que le carbone suie est émis presque exclusivement par des phénomènes de combustion (Figure 13).

¹⁸ Total des 8 HAP réglementés en France (arrêté du 02/02/1998 modifié) : benzo(a)pyrène, benzo(b)fluoranthène, benzo(k)fluoranthène, indeno(1,2,3-cd)pyrène, benzo(g,h,i)pérylène, fluoranthène, dibenzo(a,h)anthracène, benzo(a)anthracène.

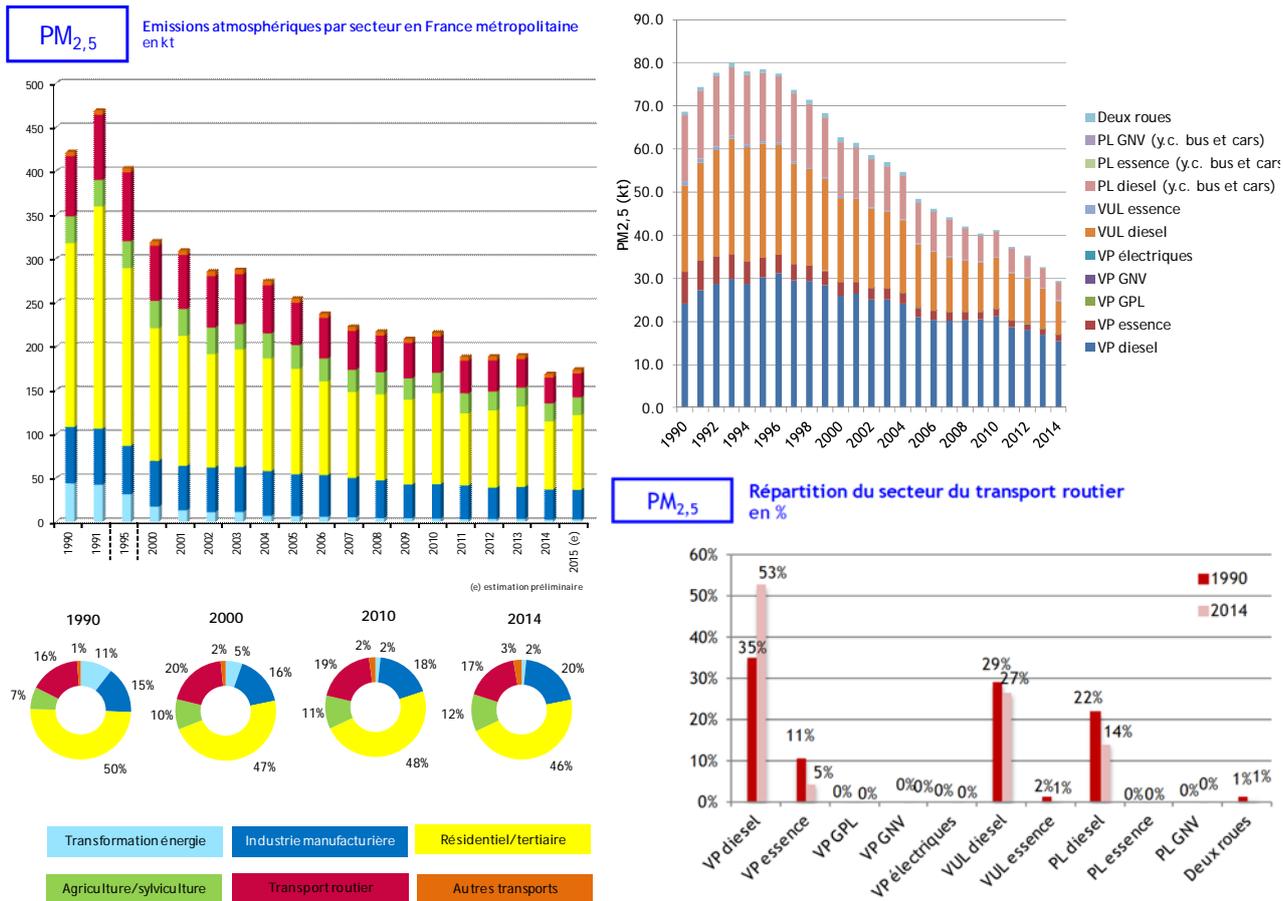


Figure 12 : Émissions atmosphériques de PM_{2,5} par secteur en France métropolitaine (gauche). Émissions du transport routier par type de véhicule/motorisation (haut droit). Répartition des émissions du transport routier en 1990 et 2014 (bas droit) (CITEPA/Secten 2016)

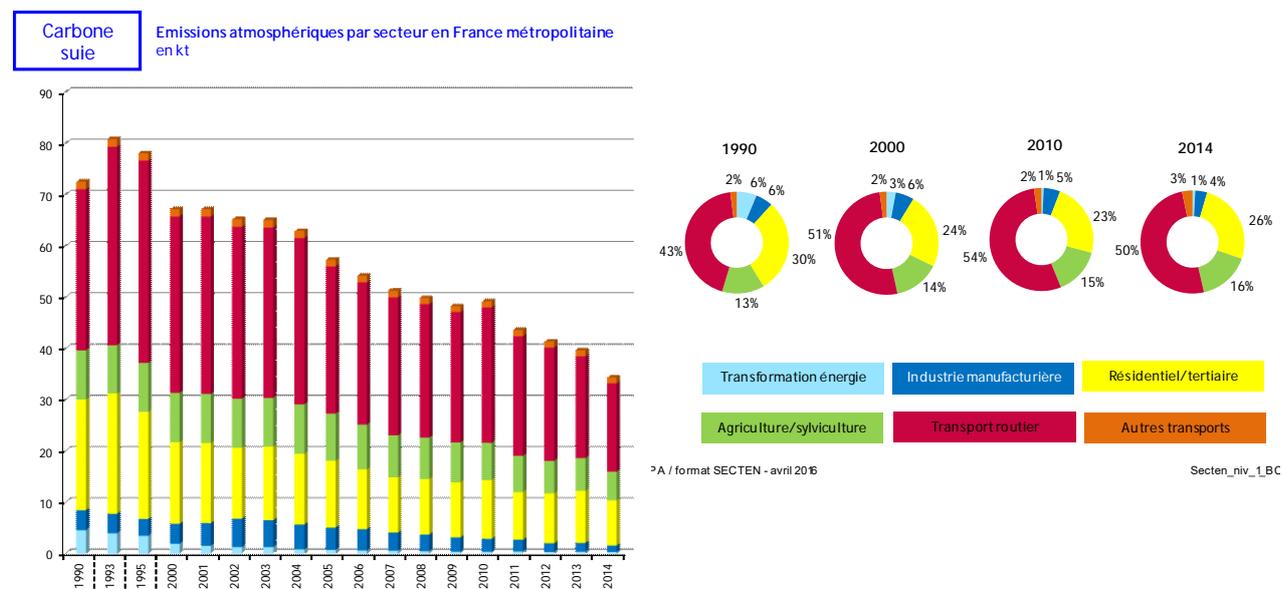


Figure 13 : Émissions atmosphériques de carbone suie par secteur en France métropolitaine. (CITEPA/Secten 2016)

Les émissions de **NOx** ont diminué de 55 % entre 1990 et 2014 (-56 % entre 1980 et 2014) à la fois en raison de la pénétration progressive des dispositifs d'épuration catalytiques sur les véhicules routiers, de l'évolution des réglementations pour les installations industrielles (GIC¹⁹, ICPE²⁰, etc.), de l'évolution structurelle du mix énergétique, et de l'intensité des activités émettrices (Figure 14).

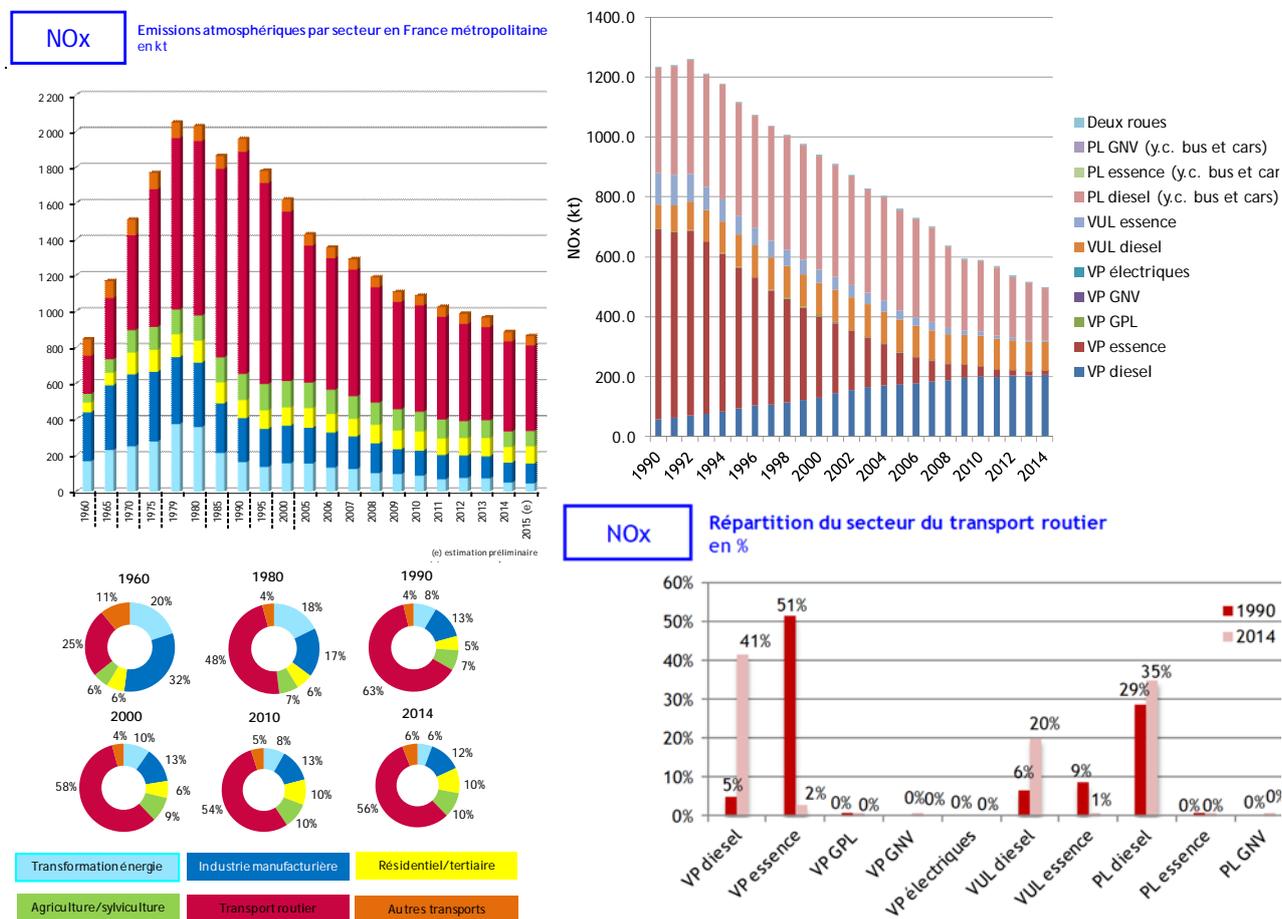


Figure 14 : Émissions atmosphériques de NOx par secteur en France métropolitaine (gauche). Émissions du transport routier par type de véhicule/motorisation (haut droit). Répartition des émissions du transport routier en 1990 et 2014 (bas) (CITEPA/Secten 2016)

Les émissions de **HAP**²¹ ont diminué de 57 % entre 1990 et 2014, à mettre principalement à l'actif du secteur résidentiel (en particulier la combustion de biomasse) qui s'explique par un renouvellement progressif des équipements utilisés. Concernant les émissions du transport routier, les véhicules Diesel sont les principaux émetteurs (Annexe 2).

Les émissions de **COVNM** ont diminué de 74 % entre 1988 et 2014 (Annexe 2). Cette baisse s'explique d'abord par la réduction de plus de 90 % des émissions du transport routier sur cette période, liée à l'équipement des véhicules à essence en pots catalytiques depuis 1993 et à la diésélisation du parc automobile (véhicules Diesel peu émetteurs de COV). Les émissions liées à la combustion de biomasse dans les équipements domestiques ont également diminué.

¹⁹ GIC : Grandes Installations de Combustion

²⁰ ICPE : Installation classée pour la protection de l'environnement

²¹ Total des 8 HAP réglementés en France (arrêté du 02/02/1998 modifié) : benzo(a)pyrène, benzo(b)fluoranthène, benzo(k)fluoranthène, indeno(1,2,3-cd)pyrène, benzo(g,h,i)pérylène, fluoranthène, dibenzo(a,h)anthracène, benzo(a)anthracène.

La réduction des émissions de **CO** atteint globalement 70 % entre 1990 et 2014 (76 % entre 1980 et 2014). Elle est principalement liée à l'équipement en pots catalytiques des véhicules à essence depuis 1993 ainsi qu'à la désélisation du parc automobile. Les améliorations apportées aux véhicules depuis plus de vingt ans étaient déjà très sensibles avant 1990, conduisant à une baisse de 94 % des émissions du monoxyde de carbone du transport routier entre 1980 et 2014.

Parmi les neufs **métaux lourds** considérés dans l'inventaire national des émissions (Pb, Cr, Cd, Hg, Zn, Ni, As, Se et Cu), tous voient leurs émissions régresser entre 1990 et 2014. Cette baisse est de plus de 65 % pour sept d'entre eux.

Les émissions de **plomb** ont diminué de 97 % par suite de l'arrêt définitif de la distribution de carburants automobiles plombés à partir de 2000 et, dans une mesure bien moindre en valeur absolue, des progrès réalisés dans les procédés industriels ainsi que l'arrêt de la production de plomb de première fusion depuis 2003.

Les émissions de **cuivre** ont légèrement diminué de près de 6 % entre 1990 et 2014 en raison d'une baisse notable de la contribution des procédés industriels. Ces réductions sont en partie compensées par les émissions provenant des secteurs des transports ferroviaires (usure des caténaires) et routiers (usure des plaquettes de frein) dont les activités (trafic) sont croissantes. Le transport routier est le secteur le plus émetteur.

Les émissions de **zinc** ont diminué de 79 % du fait de l'importante réduction des rejets industriels en particulier dans le domaine de la sidérurgie et de l'arrêt depuis 2002 de l'activité de production de zinc de deuxième fusion. Le transport routier est le secteur le plus émetteur.

Les niveaux d'émissions de **NH₃** sont assez stables entre 1980 et 2014. Le secteur de l'agriculture, dont les déjections animales et l'utilisation des engrais sont les deux principales sources avec un peu plus de 98 % des émissions, est en baisse régulière depuis 2000 malgré des pics en 2008, 2010 et 2014 du fait de conjonctures particulières. La part des émissions issue du transport routier est faible au niveau national mais peut être majoritaire en zone urbaine. Les véhicules essence en sont actuellement les principaux émetteurs ; cependant, avec la généralisation du système SCR de dépollution des moteurs Diesel (réduction des NOx par NH₃), ceux-ci pourraient également en émettre de plus en plus.

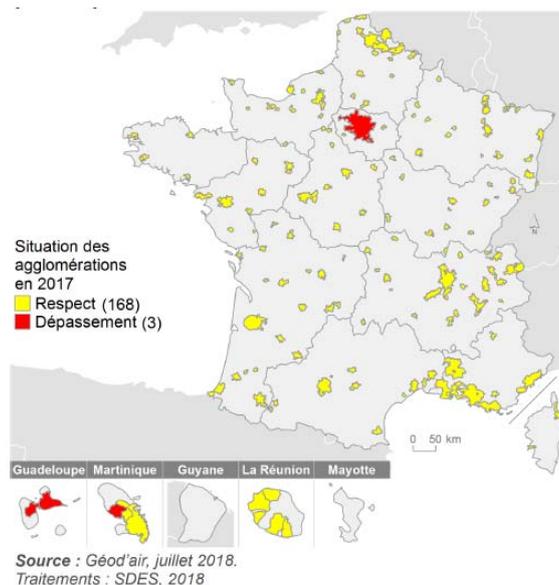
3.2.2.3 Qualité de l'air en France métropolitaine depuis 2000

Ce chapitre est essentiellement fondé sur les bilans de la qualité de l'air extérieur en France réalisés par le Commissariat général au développement durable (CGDD 2016, 2017, 2018a, b).

Concentrations de particules

En 2017, les concentrations moyennes annuelles de fond en PM₁₀ les plus importantes sont observées sur les régions parisienne, lyonnaise et en Provence-Alpes-Côte d'Azur (CGDD 2018b). Des niveaux assez élevés sont aussi constatés en régions Grand-Est et Hauts-de-France. Durant les premiers mois de l'année 2017, sous l'effet d'une situation anticyclonique avec des températures très froides associées à une faible dispersion, deux épisodes de pollution majeurs en particules sont survenus, respectivement en janvier et en février. Des épisodes de pollution sont également observés dans les outre-mer, par exemples en Guyane, Guadeloupe et Martinique du fait des transports de poussières désertiques transatlantiques provenant du Sahara.

Pour les PM₁₀, la norme journalière pour la protection de la santé humaine n'est pas respectée sur 1,6 % des sites de surveillance en 2017, soit trois sites situés à proximité du trafic routier et un en fond urbain (Figure 15). Trois agglomérations sont concernées sur les 163 ayant fait l'objet de mesures en 2017 : Fort-de-France, Paris et Pointe-à-Pitre. De plus, un site dépasse en 2017 la norme annuelle fixée pour la protection de la santé humaine, contre 2 en 2016 et en 2015 et 1 en 2014. Le site concerné est situé à Paris, se trouve à proximité du trafic routier et dépasse également la norme journalière.



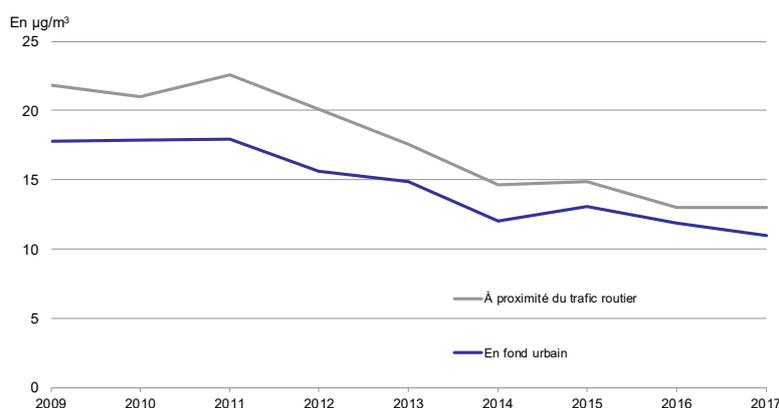
Note : normes pour la protection de la santé humaine prises en compte: norme journalière : $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à ne pas dépasser plus de 35 jours par année civile ; norme annuelle : $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne sur l'année civile.

Source : Géod'Air, juillet 2018. Traitements : SDES, 2018

Figure 15 : La situation des agglomérations françaises en 2017 vis-à-vis des normes sanitaires de PM_{10} (CGDD 2018b)

Évolution de la qualité de l'air en France métropolitaine depuis 2000

En situation de fond urbain, les concentrations moyennes annuelles en NO_2 , en PM_{10} et en $\text{PM}_{2,5}$ ont diminué, mais plus modérément que pour le SO_2 (Figure 16 et Figure 17). Ces diminutions masquent des disparités à des échelles temporelles et spatiales plus fines. À proximité du trafic routier, des tendances à la baisse sont également constatées (NO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$, benzène, CO), mais les concentrations moyennes annuelles sont 2 fois plus élevées pour le NO_2 par rapport au fond urbain et 1,2 fois pour les PM_{10} et pour les $\text{PM}_{2,5}$ (Figure 16). Dans la littérature scientifique, des campagnes de mesure en tunnel ont montré une diminution significative des concentrations de particules et de HAP totaux (phases particulaire et gazeuse) émis par le trafic depuis le début des années 90 (Keyte, Albinet, and Harrison 2016).



Note : Une modification des modalités de mesure des PM_{10} est intervenue au 1^{er} janvier 2007 et ne permet pas de comparer les années 2007-2017 avec les années précédentes.

Champ : France métropolitaine et DOM.

Source : Géod'Air, juillet 2018

Figure 16 : Évolution des concentrations moyennes annuelles en $\text{PM}_{2,5}$ à proximité du trafic routier et en fond urbain sur la période 2009-2017 (Adapté de CGDD (2018b))

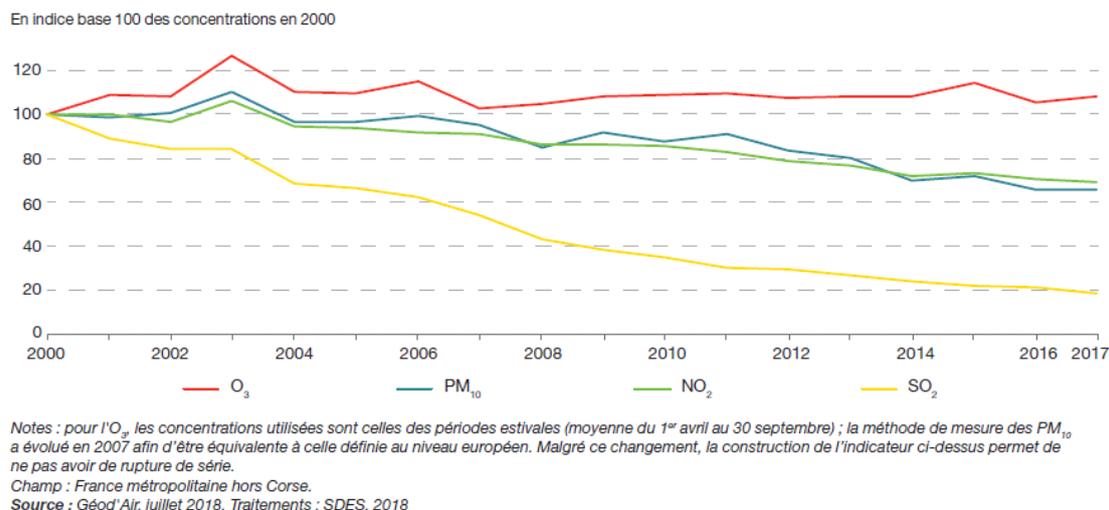


Figure 17 : Évolution des concentrations en SO₂, NO₂, O₃ et PM₁₀ entre 2000 et 2017 (CGDD 2018a)

Les diminutions des concentrations atmosphériques de différents polluants depuis 2000 sont plus faibles que celles des émissions à la source (ou émissions primaires) (Figure 18). En effet, la qualité de l'air dépend beaucoup des émissions anthropiques de polluants, mais également des réactions qui peuvent intervenir dans l'atmosphère, des émissions d'origine naturelle, ou encore des imports de pollution (transfrontaliers). De plus, les méthodes de production des données de concentration et d'émission diffèrent ainsi que leurs niveaux d'incertitudes.

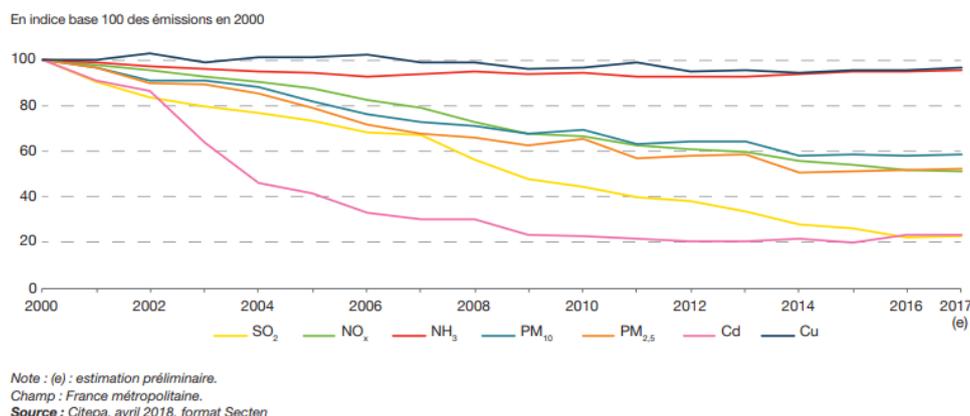
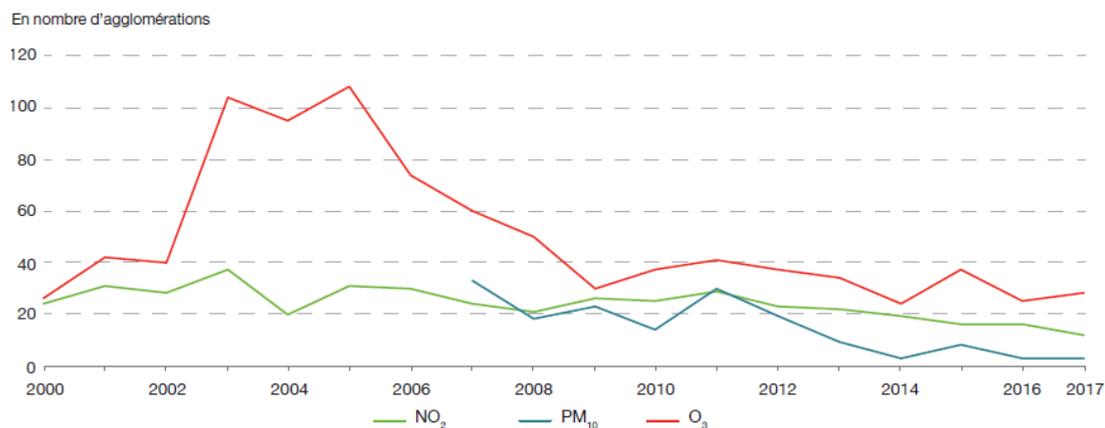


Figure 18 : Évolution des émissions en SO₂, NO_x, NH₃, PM₁₀ et Cd entre 2000 et 2017 (CGDD 2018a)

Malgré l'amélioration de la qualité de l'air, des dépassements des normes sanitaires fixées par la réglementation européenne (directives 2008/50/CE et 2004/107/CE) et des épisodes de pollution subsistent néanmoins en certains points du territoire.

Sur la période 2000-2017, le nombre d'agglomérations ne respectant pas chaque année les normes en NO₂ a diminué (Figure 19). Il est de 12 en 2017 contre 24 en 2000. Les grandes agglomérations (plus de 250 000 habitants) et, dans une moindre mesure, celles de taille moyenne (50 000 à 250 000 habitants) sont les plus concernées par ces dépassements de normes localisés majoritairement sur des stations situées à proximité du trafic routier. Pour les PM₁₀, les agglomérations les plus touchées par le non-respect des normes sont également de taille moyenne et grande. Les stations de mesure impliquées se situent à proximité du trafic routier et en fond urbain. Sur la période 2007-2017, le nombre d'agglomérations concernées a diminué.



Notes : la méthode de mesure des PM₁₀ a évolué en 2007 afin d'être équivalente à celle définie au niveau européen. Les concentrations de PM₁₀ de la période 2000-2006 ne peuvent donc pas être comparées à celles de la période 2007-2017 ; pour l'O₃, la conformité à la norme européenne se mesure en moyenne triennale.

Champ : France métropolitaine et DOM.

Source : Géod'Air, juillet 2018. Traitements : SDES, 2018

Figure 19 : Les dépassements des normes pour la protection de la santé dans les agglomérations pour O₃, NO₂ et PM₁₀ (CGDD 2018a)

3.3 Analyse rétrospective : la région Île-de-France

3.3.1 Contexte

La région Île-de-France représente une superficie d'environ 12 000 km², et est la région de loin la plus peuplée avec 12 027 958 habitants (au 1^{er} janvier 2014), soit 19 % de la population nationale, et une densité de 1 000 habitants/km² environ. Sur trente ans, la croissance de la population de l'agglomération parisienne a été deux fois plus élevée que pour l'ensemble du pays (+1,2 % par an en moyenne contre +0,5 %) (INSEE 2014) mais suit depuis 2009 le même rythme (+0,5 % en moyenne annuelle) (INSEE 2017). En effet, entre 2009 et 2014, cette croissance démographique de l'agglomération parisienne repose uniquement sur l'excédent du solde naturel, le solde migratoire étant négatif. La population progresse dans tous les départements franciliens, sauf à Paris.

Différents périmètres d'urbanisation et d'intérêt sont distingués quant à la problématique de la pollution de l'air (Figure 20, Tableau 2) :

- Paris (limites administratives) couvre un peu moins de 1 % de la superficie de l'Île-de-France mais plus de 20 % de sa population (2 347 000 hab.) ;
- la zone intra-A86 représente environ 3 % de la superficie (Paris inclus) et 41 % de la population de l'Île-de-France ;
- la « petite couronne » (PC) inclut les communes voisines fortement urbanisées. Au total le périmètre de PC couvre 6,4 % de la superficie de l'Île-de-France et compte 57 % de la population de l'Île-de-France ;
- le reste de l'Île-de-France couvre l'essentiel de la superficie (94 %) et environ 43 % de la population francilienne.

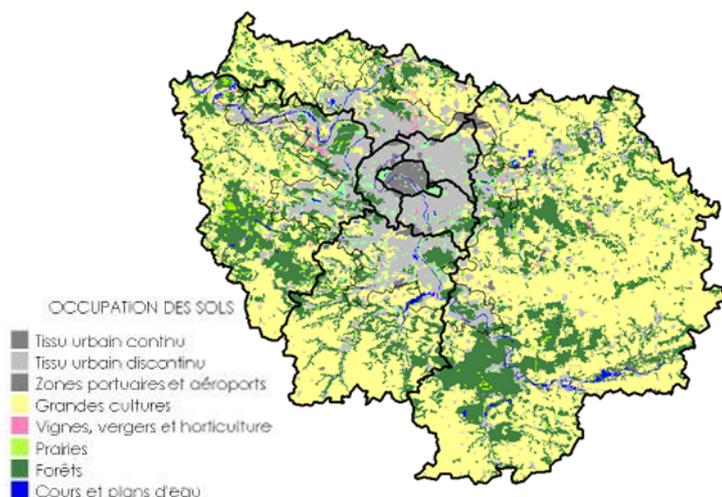


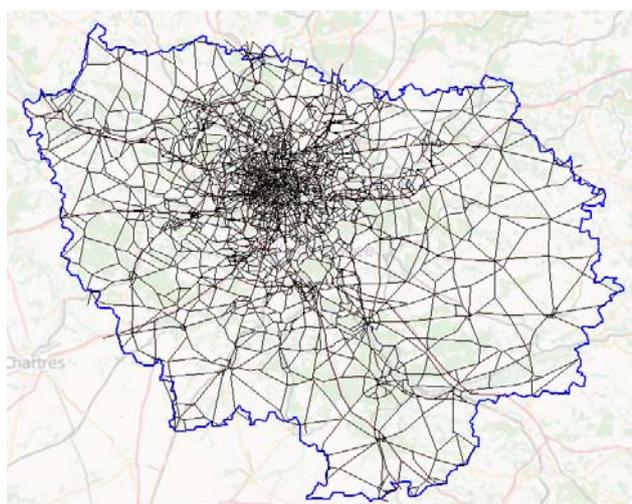
Figure 20 : Occupation du sol en Île-de-France à partir des données Corine-Land-Cover 2006

Tableau 2 : Principaux périmètres en Île-de-France et répartition des populations et réseaux routiers (estimation à partir des données de simulation)

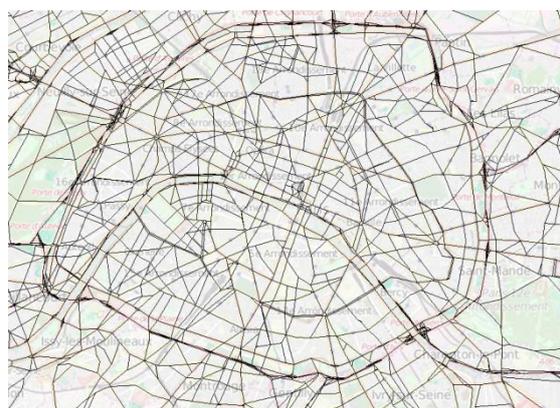
	Superficie	Population	Réseau routier
Paris	0,9 %	20,0 %	6,6 %
Intra-A86 (hors Paris)	2,3 %	21,3 %	10,4 %
Petite Couronne (hors A86)	3,2 %	15,7 %	9,5 %
Reste de l'Île-de-France et NC*	93,6 %	43,0 %	73,5 %
Ensemble de l'Île-de-France	12 068 km ²	12 Millions hab.	10 996 km

*mailles non codées

Le réseau routier principal (modélisé) représente environ 11 000 km (dont 10 % de voies autoroutières - Figure 21). Le trafic routier est analysé en permanence au moyen des nombreux points de comptage du trafic sur les grands axes.



Réseau routier modélisé à l'échelle de l'Île-de-France



Zoom sur le réseau routier modélisé parisien

Figure 21 : Réseau routier pris en compte pour le calcul des émissions liées au trafic routier (Source : DRIEA – traitement et image Airparif)

3.3.2 Analyse rétrospective

3.3.2.1 Situation actuelle

En Île-de-France, en 2012, le trafic routier est la principale source d'émission de NOx (56 % des émissions régionales) et de PM₁₀ (28 %) (Figure 22). Les autres modes de transports (trafic ferroviaire, transport fluvial et plates-formes aéroportuaires) contribuent plus faiblement aux émissions (de l'ordre de 1 % à 3 % pour chacun de ces modes).

Le deuxième secteur le plus émetteur est le secteur résidentiel et tertiaire (18 % des NOx et 26 % des PM₁₀), dont le chauffage au bois en base et en appoint reste un contributeur important aux émissions primaires de particules. La consommation résidentielle de bois de chauffage est responsable de 93 % des émissions du secteur résidentiel alors que ce combustible ne couvre que 5 % des besoins d'énergie pour le chauffage des logements (électricité et chauffage urbain inclus).

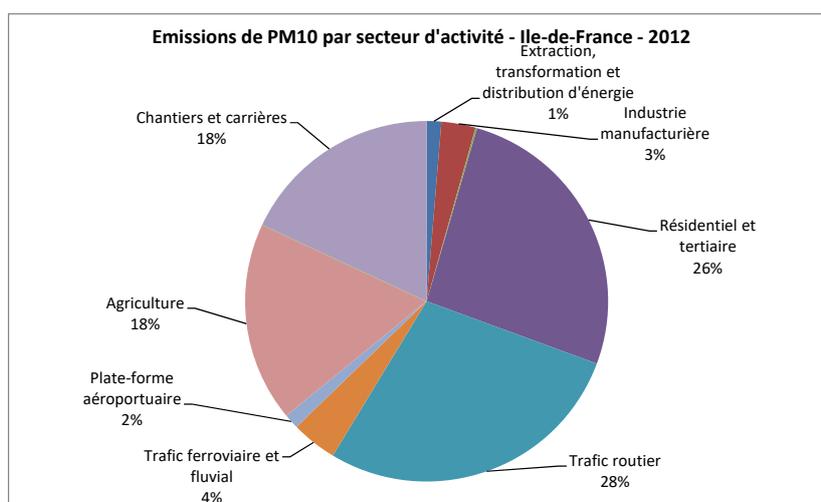


Figure 22 : Contribution par secteur aux émissions de particules PM₁₀ en Île-de-France pour l'année 2012 (Airparif 2012b)

Le secteur agricole contribue à hauteur de 18 % aux émissions de particules PM₁₀ franciliennes. Les émissions agricoles de particules proviennent essentiellement des cultures (labours, moissons, etc.) et de l'utilisation d'engins agricoles. Le secteur chantiers et carrières contribue à hauteur de 18 % aux émissions franciliennes de PM₁₀ en 2012. La plupart de ces émissions sont issues des activités des chantiers et des travaux du BTP²² avec 90 % des émissions de PM₁₀ de ce secteur. Les carrières contribuent à hauteur de 10 %.

L'industrie manufacturière représente 3 % des émissions de PM₁₀ en 2012. Les sources sont la combustion pour le chauffage, les procédés de production et l'usage d'engins spéciaux.

3.3.2.2 Évolution du trafic routier en Île-de-France

Le volume de trafic routier présente une légère tendance à la baisse entre 2000 et 2014 en Île-de-France. La Figure 23 présente le nombre et le type de déplacement en voiture particulière en 2001 et en 2010 (EGT 2010²³) et la Figure 24 concerne l'évolution de l'usage du réseau routier francilien entre 2010 et 2014 (STIF²⁴).

Le nombre de déplacements quotidiens réalisés en voiture particulière a baissé entre 2001 et 2010 (environ -5 % des véhicules x kilomètres), alors que les enquêtes précédentes indiquaient une

²² BTP : Bâtiment et Travaux Publics

²³ Enquête globale Transport N°15, Janvier 2013, http://www.omnil.fr/IMG/pdf/egt2010_voiture_bd-2.pdf

²⁴ Enquête du STIF (Syndicat des Transports d'Île-de-France) sur le PDUIF, Evaluation en continu du PDUIF, éléments à mi-parcours 2010-2015. http://www.omnil.fr/IMG/pdf/pduif_2010-2015_mel_light_2.pdf

augmentation continue. Entre 2010 et 2014, une légère baisse de l'usage des réseaux routiers franciliens est observée.

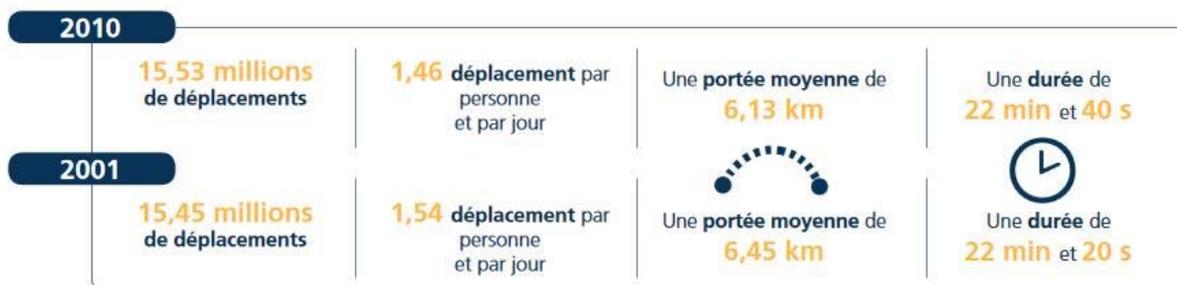


Figure 23 : Résumé concernant les déplacements en voiture particulière en Île-de-France en 2001 et 2010 – Enquête Globale Transport 2010

Usage des réseaux routiers Évolution annuelle 2014/2010	
Paris	- 2,1 %
Petite couronne	- 0,6 %
Grande couronne	- 0,2 %
Île-de-France	- 0,5 %

Figure 24 : Évolution de l'usage des réseaux routiers entre 2010 et 2014 – Données STIF à partir de données RATP, SNCF, Optile, DIRIF, départements et Ville de Paris

A l'échelle de l'Île-de-France, la part des véhicules particuliers (VP) est stable entre 2000 et 2012, soit environ 70 % du trafic total (Figure 25). En revanche, la part de véhicules particuliers Diesel a augmenté par rapport à l'essence. En 2012, elle atteint 53 % des véhicules x kilomètres, soit 70 % du trafic des VP. En 2000, les VP Diesel représentaient 35 % des kilomètres parcourus, soit environ 50 % du trafic des VP. Une diésélisation du parc des véhicules particuliers est donc observée sur la période 2000 à 2012. A noter également une hausse de la part des deux-roues motorisés (+38 % entre 2000 et 2012), concentrée en milieu urbain, et des véhicules utilitaires Diesel dans les véhicules x kilomètres parcourus. Les poids lourds voient, quant à eux, leur contribution au kilométrage parcouru baisser (-20 % entre 2000 et 2012).

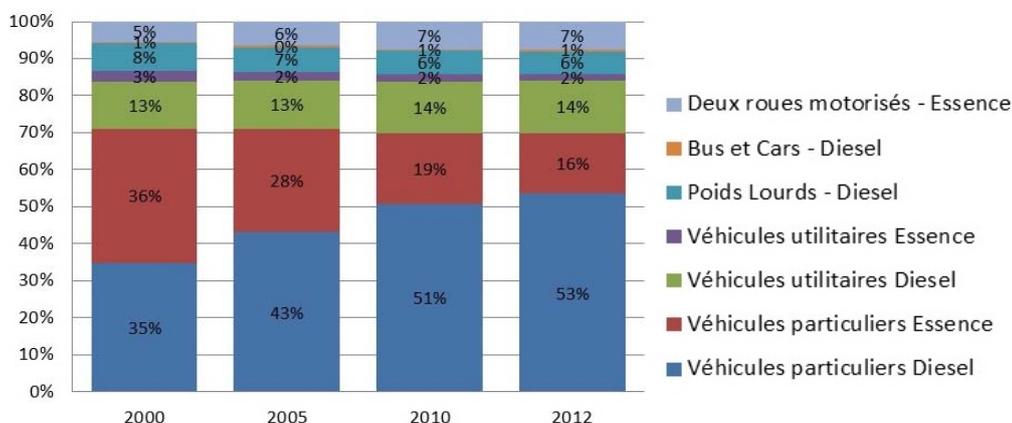


Figure 25 : Évolution de la répartition en véhicules x kilomètres du trafic routier modélisé en Île-de-France entre 2000 et 2012 – Traitement Airparif, données Ville de Paris et DIRIF

3.3.2.3 Évolution des émissions en Île-de-France entre 2000 et 2012

Entre 2000 et 2012, les émissions de PM₁₀ par le trafic ont diminué de 55 % (Figure 26) mais représentaient toujours, en 2012 (dernier inventaire disponible) 28 % des PM₁₀ émis en Île-de-France tous secteurs confondus. Les émissions de PM₁₀ des poids lourds et des véhicules utilitaires légers ont diminué respectivement de 75 % et de 71 % sur 12 ans. Les émissions de PM₁₀ des véhicules particuliers Diesel ont diminué de 60 %. Ceci s'explique par les améliorations technologiques successives apportées aux véhicules Diesel avec notamment l'apparition du filtre à particules sur quelques modèles de véhicules Euro 3 et Euro 4 puis généralisée sur les véhicules Euro 5, contrebalançant l'augmentation du trafic de ces véhicules. Les émissions dues à l'abrasion mécanique des freins, pneus et routes ont très peu diminué.

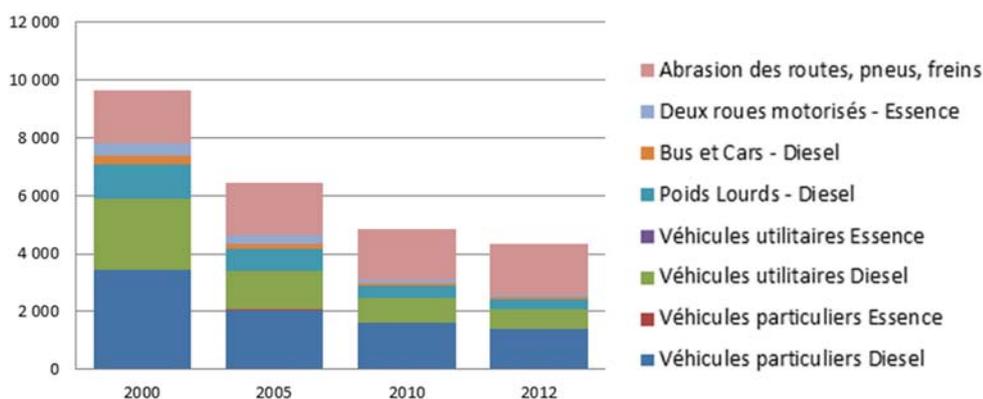


Figure 26 : Évolution des émissions de PM₁₀ du transport routier en Île-de-France entre 2000 et 2012

Le trafic routier est le principal contributeur aux émissions d'oxydes d'azote. La Figure 27 montre une diminution de 48 % des émissions du trafic routier en Île-de-France entre 2000 et 2012. Les émissions de NO_x des véhicules particuliers essence, des poids lourds et des véhicules utilitaires légers Diesel ont diminué respectivement de 93 %, 56 % et 28 % sur 12 ans. Ces baisses sont principalement dues à l'amélioration technologique des véhicules ainsi qu'à la diminution du nombre de véhicules en ce qui concerne les véhicules particuliers essence. *A contrario*, les émissions des véhicules particuliers Diesel augmentent de 43 % malgré les évolutions technologiques. Cette hausse s'explique par l'augmentation du trafic généré par ces véhicules (+51 % de véhicules x kilomètres sur la même période) au détriment des véhicules particuliers essence qui voient leurs émissions chuter de 93 % avec une baisse de trafic de 55 %.

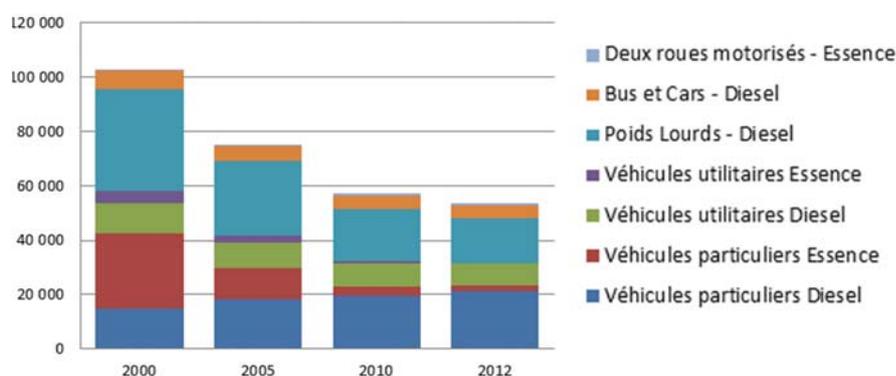


Figure 27 : Évolution des émissions de NO_x du transport routier en Île-de-France entre 2000 et 2012

Le trafic routier est le principal contributeur aux émissions de HAP en Île-de-France, avec une responsabilité majoritaire des véhicules particuliers Diesel (presque 70 %). La directive européenne 2004/107/CE du 15 décembre 2004 demande à chaque État membre de mesurer en plus du

benzo(a)pyrène, au minimum six autres HAP : benzo(a)anthracène, benzo(b)fluoranthène, benzo(k)fluoranthène, benzo(j)fluoranthène, indéno(1,2,3-cd)pyrène et dibenzo(a,h)anthracène. Pour ces polluants, il n'existe cependant pas de seuils réglementaires. En Île-de-France, Airparif mesure ces 7 HAP et également le Benzo(g,h,i)pérylène.

Entre 2000 et 2012, la somme des émissions de ces 8 HAP par le trafic augmente légèrement (7 %). Cette augmentation est principalement due à l'augmentation de la part de véhicules particuliers Diesel par rapport aux véhicules particuliers essence²⁵ (Figure 28).

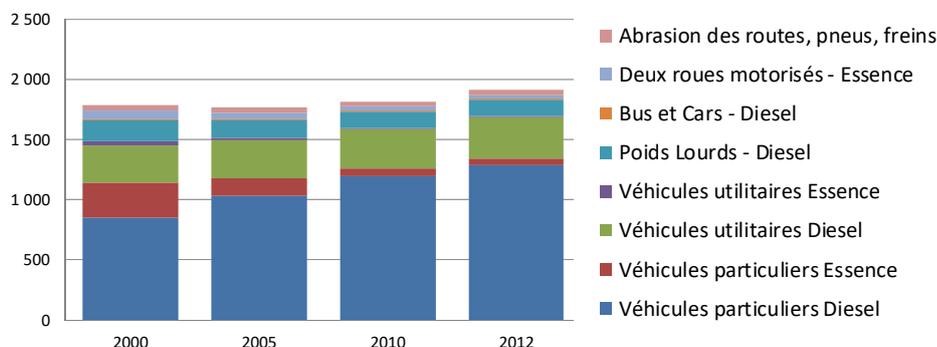


Figure 28 : Évolution des émissions de HAP (somme de 8 HAP) du transport routier en Île-de-France entre 2000 et 2012

3.3.2.4 Évolution de la qualité de l'air en Île-de-France depuis 2000

En s'affranchissant des fluctuations météorologiques interannuelles et des évolutions météorologiques, les teneurs moyennes de PM₁₀ en agglomération montrent une tendance à la baisse (Figure 29). Entre 1999-2001 et 2013-2015, ces niveaux ont ainsi baissé de -20 %. Cette décroissance des niveaux en zone urbaine est à mettre en relation avec la baisse des émissions franciliennes de particules primaires, de près de -50 % entre 2000 et 2012. Cette baisse est plus marquée sur les 3 dernières années.

La station trafic du Boulevard Périphérique Porte d'Auteuil opérée par Airparif dispose de mesures de PM₁₀ depuis 1998. La Figure 29 (haut) montre une baisse des niveaux de PM₁₀ en moyenne sur cette station de proximité au trafic routier, de l'ordre de -10 % entre 2005 et 2015. Sur cette dernière, la baisse est de l'ordre de -20 % entre 1998-2000 et 2013-2015. Cette tendance peut s'expliquer par une diminution importante des émissions de particules primaires par le trafic routier, d'environ -55 % entre 2000 et 2012, notamment liée à l'introduction progressive des filtres à particules sur les véhicules Diesel.

En s'affranchissant de ces variations météorologiques, les niveaux moyens annuels de PM_{2,5} montrent une baisse de l'ordre de -25 % entre 2000-2002 et 2013-2015 (Figure 29, bas). La baisse des concentrations en PM_{2,5} est plus marquée sur la station trafic du Boulevard Périphérique Porte d'Auteuil. Une baisse de l'ordre de 45 % est ainsi relevée entre 1999-2001 et 2013-2015. Comme pour les PM₁₀, cette baisse s'explique par la diminution des particules primaires émises à l'échappement des véhicules Diesel (environ -60 % entre 2000 et 2012). La baisse est plus importante que pour les PM₁₀ car la majorité des PM_{2,5} sont émises à l'échappement. Les particules PM₁₀ comprennent une fraction importante liée à l'abrasion de la route, des pneus et des freins ainsi qu'à la remise en suspension des particules déposées sur la chaussée.

²⁵ Les facteurs d'émissions de HAP pour les différents types de véhicules sont issus de Copert 4. Ils n'ont pas été remis à jour entre 2000 et 2012 et ne prennent en compte que la distinction Diesel / essence et les normes pre-Euros et Euros.

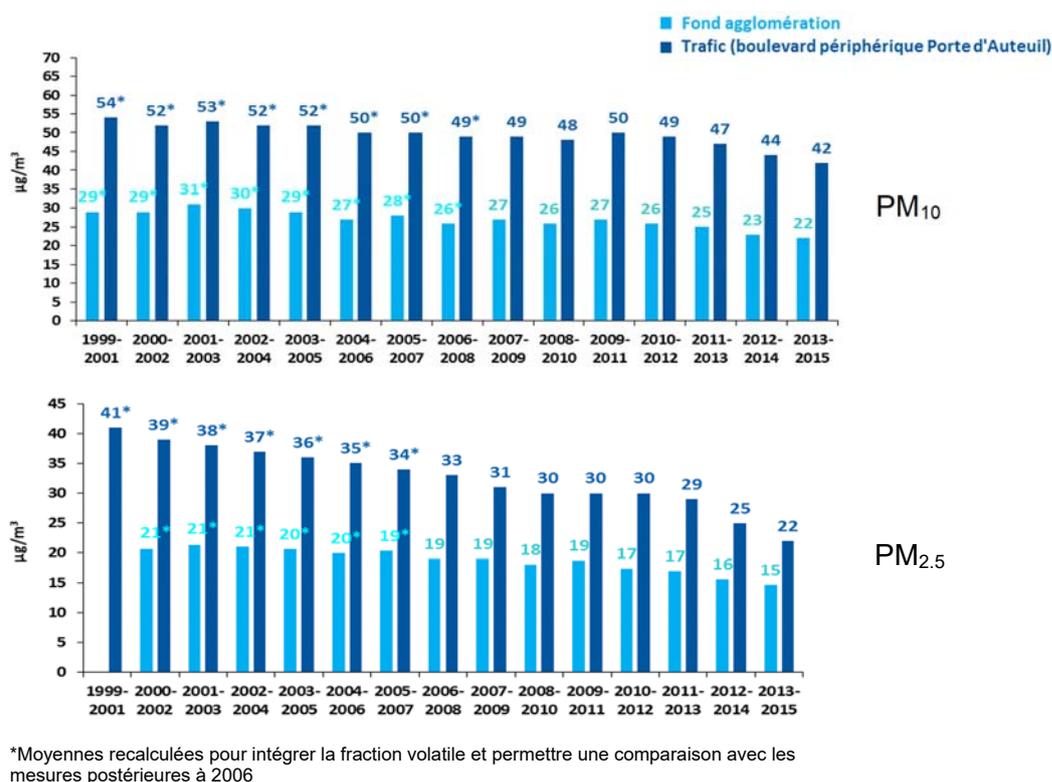


Figure 29 : Évolution des concentrations moyennes sur 3 ans en fond et en proximité du trafic en particules PM₁₀ (en haut) et PM_{2,5} (en bas), de 1999-2001 à 2013-2015 dans l'agglomération parisienne et à proximité du Boulevard Périphérique, en estimant les moyennes avant 2007 pour intégrer la fraction volatile

3.4 Conclusions

L'évolution rétrospective des émissions et concentrations de polluants a été récapitulée à partir de l'analyse de rapports d'étude antérieurs et des données d'inventaires d'émissions français avec un focus sur la source trafic routier.

3.4.1 France métropolitaine

En situation de fond urbain, les concentrations moyennes annuelles en PM₁₀, en PM_{2,5} et en NO₂ ont diminué entre 2000 et 2015, ces diminutions masquant des disparités temporelles, spatiales et sociétales. En 2015, les concentrations moyennes annuelles de fond en PM₁₀ et PM_{2,5} les plus importantes sont observées sur les régions parisienne et lyonnaise. A proximité du trafic routier, des tendances à la baisse sont également constatées (PM₁₀, PM_{2,5}, NO₂, benzène, CO) mais les concentrations sont plus élevées par rapport au fond urbain, d'un facteur 2 en concentration moyenne annuelle de NO₂ et d'un facteur 1,2 pour les PM₁₀ et pour les PM_{2,5}. Des campagnes de mesure en tunnel ont également montré une diminution significative des concentrations de particules et de HAP totaux (phases particulaire et gazeuse) émis par le trafic depuis le début des années 90.

Les diminutions des concentrations atmosphériques des différents polluants depuis 2000 ont été plus faibles que celles des émissions à la source (ou émissions primaires). En effet, la qualité de l'air dépend beaucoup des émissions anthropiques de polluants, mais également des réactions qui peuvent intervenir dans l'atmosphère, des émissions d'origine naturelle, ou encore des imports de pollution (transfrontaliers). De plus, les méthodes de production des données de concentration et d'émission diffèrent ainsi que leurs niveaux d'incertitudes.

Ainsi, les émissions primaires de particules PM₁₀ et PM_{2,5} ont diminué respectivement de 52 % et 60 % entre 1990 et 2014 en lien avec des efforts de réduction ou des évolutions d'activité dans les secteurs industriels, les secteurs résidentiels et des transports. En 2014, les transports routiers représentaient 17 % des émissions nationales de particules primaires PM_{2,5}, 50 % pour le carbone suie, 25 % pour les HAP réglementés²⁶ et 56 % pour les NOx. Les émissions ne sont cependant pas homogènes sur le territoire et sont plus intenses dans les aires urbaines où résident 85 % de la population. Les particules primaires et les HAP issus des transports routiers sont principalement émis par les véhicules Diesel, les véhicules anciens contribuant fortement aux émissions particulières du trafic malgré un nombre de kilomètres parcourus relativement faible.

Le changement de composition des carburants Diesel (teneur en soufre obligatoirement inférieure à 10 mg/kg depuis 2009 en France) et la mise en place de nouvelles technologies de dépollution (catalyseurs d'oxydation en 1996 et filtres à particules en 2000) ont permis une large réduction de certaines émissions polluantes incluant les particules et les HAP totaux (phases particulaire et gazeuse) par les véhicules Diesel en France. Cependant, 42 % du parc de véhicules particuliers Diesel en circulation n'est pas encore équipé d'un filtre à particules en 2016 (38 % en véhicules x kilomètres) (HBEFA²⁷ v3.2 parc France) et les véhicules utilitaires lourds, dont la durée de vie est plus longue, restent très peu équipés en filtres à particules.

De la même manière que pour les Diesel, l'évolution de la composition des carburants essence (en 2000, interdiction du plomb tétraéthyle et limitation de la teneur en benzène) a fortement réduit les émissions de ces polluants. La plupart des automobiles essence sont maintenant équipées de technologies de dépollution (systèmes d'injection de carburant électronique, contrôle de richesse du mélange air / carburant et catalyseurs trois voies) qui ont permis de réduire les émissions d'oxydes d'azote, de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures imbrûlés. Pour améliorer leur efficacité énergétique, les moteurs essence les plus récents sont équipés d'un système d'injection directe de carburant dans le cylindre, qui peut cependant augmenter les émissions de particules. À noter que le transport routier est le secteur le plus émetteur en zinc (pneus) et en cuivre (plaquettes de frein).

Le parc de véhicules immatriculés en France s'est accru de +0,6 % en 2015, rythme comparable aux années précédentes. La diésélisation du parc de véhicules légers se poursuit (67,4 % du parc en 2015 contre 66,7 % en 2013), mais plus lentement (+0,3 % en 2015). La part du Diesel en 2015 a représenté 79 % de la circulation des véhicules légers immatriculés en France, contre 55 % en 2000. Les motorisations alternatives (électriques, hybrides) restent à un niveau très limité.

Malgré l'amélioration de la qualité de l'air, des dépassements des normes sanitaires fixées par la réglementation européenne (directives 2008/50/CE et 2004/107/CE) et des épisodes de pollution subsistent néanmoins en certains points du territoire. Sur la période 2000-2015, le nombre d'agglomérations ne respectant pas chaque année les normes en NO₂ a diminué, 16 agglomérations en 2015 contre 24 en 2000. Les grandes agglomérations (plus de 250 000 habitants), et dans une moindre mesure celles de taille moyenne (50 000 à 250 000 habitants), sont les plus concernées par ces dépassements de normes localisés majoritairement sur des stations situées à proximité du trafic routier. Pour les PM₁₀, les agglomérations les plus touchées par le non-respect des normes sont également de taille moyenne et grande. Les stations de mesure impliquées se situent à proximité du trafic routier et en fond urbain. Sur la période 2007-2015, le nombre d'agglomérations concernées a diminué grâce à la baisse des émissions ainsi qu'à des conditions météorologiques plus favorables à la dispersion de ces polluants. En 2014, 10 pays sur 28, dont la France, présentaient des dépassements des normes pour la protection de la santé humaine fixées pour les PM₁₀, le NO₂ et l'O₃. En prenant d'autres référentiels comme les valeurs guides de qualité de l'air de l'OMS ou les normes de qualité de l'air nord-américaines (*National Ambient Air Quality Standards*), les dépassements sont encore plus nombreux.

²⁶ Total des 8 HAP réglementés en France (arrêté du 02/02/1998 modifié) : benzo(a)pyrène, benzo(b)fluoranthène, benzo(k)fluoranthène, indeno(1,2,3-cd)pyrène, benzo(g,h,i)pérylène, fluoranthène, dibenzo(a,h)anthracène, benzo(a)anthracène.

²⁷ HBEFA : *Handbook Emission Factors for Road Transport*

3.4.2 Île-de-France

En 2012, le trafic routier était à l'origine de 35 % des émissions de particules primaires $PM_{2,5}$, de 66 % des émissions de carbone suie (dont la quasi-totalité est liée aux véhicules Diesel) et de 50 % pour les HAP réglementés (dont la quasi-totalité est liée aux véhicules Diesel).

Le volume de trafic routier présente une légère tendance à la baisse entre 2000 et 2014 en Île-de-France, alors que les enquêtes précédentes indiquaient une augmentation continue. En revanche, la part de véhicules particuliers Diesel a augmenté par rapport à l'essence entre 2000 et 2012 passant d'environ 50 % à 70 % des kilomètres parcourus. À noter également une hausse de la part des deux-roues motorisés (+38 % entre 2000 et 2012) concentrée en milieu urbain et des véhicules utilitaires Diesel dans les véhicules x kilomètres parcourus. Les poids lourds voient, quant à eux, leur contribution au kilométrage parcouru baisser (-20 % entre 2000 et 2012).

Les améliorations technologiques successives, avec notamment l'apparition du filtre à particules sur les véhicules Diesel contrebalançant l'augmentation du nombre de ces véhicules, représentent un des principaux facteurs de diminution des émissions de particules. La baisse des émissions de $PM_{2,5}$ est plus importante que celle des PM_{10} . En effet, les PM_{10} résultent en plus grande proportion que les $PM_{2,5}$ des émissions hors échappement, ces dernières ayant très peu diminué (abrasion de la route, des pneus et des freins ainsi que remise en suspension des particules déposées sur la chaussée).

La diminution des émissions de particules a fortement contribué à la diminution des concentrations moyennes annuelles de PM_{10} et $PM_{2,5}$ en Île-de-France. Cette baisse est de l'ordre de 25 % entre 2000 et 2015 pour les $PM_{2,5}$ en moyenne annuelle et de 45 % en proximité du trafic entre 1999 et 2015.

A *contrario*, entre 2000 et 2012, les émissions de NO_x des véhicules particuliers Diesel ont augmenté de 43 % malgré les évolutions technologiques. Cette hausse s'explique principalement par l'augmentation du trafic généré par ces véhicules (+51 % de véhicules x kilomètres sur 2000-2012) au détriment des véhicules essence dont les émissions ont chuté de -93 % avec une baisse du trafic de 55 %.

4 Hypothèses et méthodes de travail

Ce chapitre décrit l'ensemble de l'approche (principes, outils, hypothèses et données) mise en œuvre pour la simulation des émissions et concentrations de polluants sous différents scénarios de composition du parc automobile, afin de déterminer l'impact d'options technologiques (motorisations et dépollution) des véhicules. Les résultats de ces simulations sont analysés aux chapitres suivants.

La première section (4.1) récapitule les grandes lignes de l'approche et les principales hypothèses des simulations ainsi que les scénarios retenus. Ce résumé méthodologique propose ainsi les clés d'une compréhension suffisante de l'approche, nécessaire à l'interprétation des résultats.

Une description plus détaillée des outils et méthodes est proposée dans les sections suivantes :

- Section 4.2 : les principes d'élaboration des scénarios d'évolution technologique, reposant sur une modélisation du parc automobile, et les hypothèses de chacun des scénarios ;
- Section 4.3 : les principes et données mis en œuvre pour déterminer les émissions de polluants des secteurs d'activités autres que le trafic routier, en Île-de-France et en France ;
- Sections 4.4 et 4.5 : les méthodes de calcul des émissions de polluants du trafic, pour les différents scénarios, utilisées respectivement pour l'Île-de-France et pour la France ;
- Section 4.6 : la méthode et les outils (Polyphemus) de calcul des concentrations de polluants sur ces deux territoires ;
- Section 4.7 : les éléments sur l'expression des résultats et les indicateurs.

4.1 Approche méthodologique et scénarios

L'approche consiste en la simulation des émissions et concentrations de polluants, sous différents scénarios d'évolution de la composition du parc automobile (Figure 30), ceux-ci correspondant à différentes options technologiques (politiques en faveur de nouvelles motorisations Diesel avec FAP, essence, alternatives, etc.).

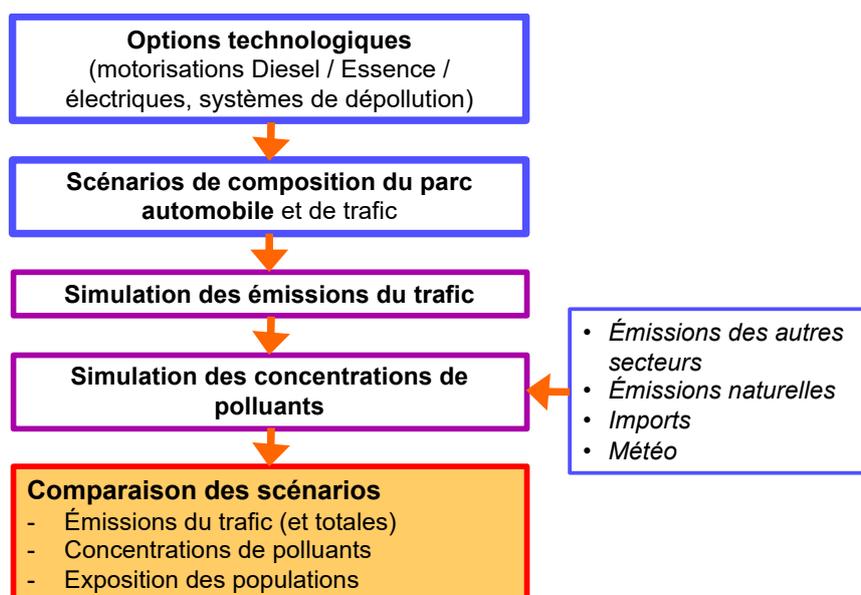


Figure 30 : Schéma de principe de l'approche

Du point de vue de la pollution particulaire, la comparaison des scénarios nécessite d'analyser non seulement les émissions de polluants du trafic mais également les concentrations qui en résultent et l'exposition des populations.

L'analyse des concentrations particulières nécessite de considérer d'une part les émissions de polluants particuliers et gazeux (certains polluants gazeux contribuant à la formation des aérosols secondaires) de l'ensemble des secteurs d'activité, ainsi que les émissions naturelles et imports de pollution des régions voisines, et d'autre part les conditions météorologiques.

Deux territoires sont considérés ici : la région Île-de-France (simulation fine des émissions du trafic routier et agrégation des émissions totales par maille de 1 km x 1 km) et la France métropolitaine (simulation à partir d'un inventaire d'émissions par maille de 50 km x 50 km). La région Île-de-France a été choisie en raison de la disponibilité des outils et données à échelle fine et de l'enjeu important de pollution, tandis que l'analyse sur le territoire national permet une représentativité élargie ainsi qu'une analyse selon les lieux et contextes.

Pour l'Île-de-France, les émissions du trafic sont simulées sur le réseau routier de l'Île-de-France (plate-forme Heaven). Avec celles des autres secteurs, elles sont agrégées par maille de 1 km² et constituent ainsi les données d'entrée d'un modèle de simulation atmosphérique (Polyphemus). Ce modèle permet de déterminer les concentrations atmosphériques des différents polluants, qui résultent de modifications physico-chimiques des composés émis (anthropiques et naturels) sous l'incidence des conditions météorologiques. La répartition géographique de la pollution simulée est croisée avec la répartition spatiale des populations approchée par leur lieu de résidence afin d'évaluer l'influence des scénarios sur l'exposition des populations.

La simulation atmosphérique sur l'Île-de-France nécessite cependant la connaissance des imports de polluants en provenance des territoires voisins. En conséquence, des simulations de la pollution atmosphérique sont réalisées aux échelles supérieures, à partir d'un inventaire des émissions tous secteurs et par maille de 50 km x 50 km, en lien avec l'occupation des sols, les émissions naturelles et les conditions météorologiques sur la France métropolitaine (qui détermine les imports vers l'Île-de-France). Une simulation sur le territoire européen permet également de déterminer les conditions aux limites du territoire national métropolitain.

Pour les différents niveaux de simulation (Europe, France, Île-de-France), de nombreuses hypothèses et données d'entrée sont maintenues invariantes entre les scénarios, afin de permettre l'analyse spécifique de l'impact lié aux seules options technologiques des parcs automobiles. Ces invariants sont notamment :

- les conditions météorologiques ;
- les populations et leur répartition géographique ;
- les émissions des secteurs d'activités autres que le trafic ;
- les volumes totaux de trafic et leur répartition spatiale et temporelle, ainsi qu'entre les catégories de véhicules (sauf pour un scénario avec diminution du trafic en urbain dense en Île-de-France) ;
- les conditions de circulation et plus généralement les comportements de mobilité et le contexte socio-économique.

Compte tenu de ces invariants, il est rappelé que ces scénarios ne peuvent être mis en regard d'autres travaux relevant de l'étude d'impact de politiques publiques.

Se reporter au chapitre 3 pour les caractéristiques des territoires et pour les contributions du trafic et des autres secteurs aux émissions de polluants, ainsi que pour l'évolution rétrospective de ces émissions et de la pollution atmosphérique.

4.1.1 Schémas de principe des simulations

Les simulations sur les territoires Île-de-France et France mettent en œuvre (Figure 31) :

- une méthode de calcul des émissions du trafic sous différents scénarios (méthodologie détaillée pour l'Île-de-France, méthodologie simplifiée à partir des inventaires d'émissions du trafic pour la France) ;
- un inventaire spatialisé des émissions des secteurs d'activité autres que le trafic (Île-de-France et France) ;
- une méthodologie de simulation atmosphérique tenant compte des émissions anthropiques et naturelles, des imports et des champs météorologiques.

Les simulations nécessitent également :

- la spécification de nombreuses hypothèses nécessaires aux simulations, notamment l'élaboration de scénarios de compositions du parc automobile, combinant différentes options de dépollution et l'application de ces scénarios sur les territoires concernés ;
- l'interprétation des résultats qui pour partie est spécifique à chaque territoire, selon la disponibilité des données (population), les simulations effectuées et les questions auxquelles celles-ci permettent de répondre.

Les polluants pris en compte dans les simulations sont :

- à l'émission, les polluants particuliers déclinés par classes de taille (PM_{10} , $PM_{2,5}$, $PM_{1,0}$, en masse et PN en nombre de particules) et selon leur nature (BC, OM), ainsi que les polluants gazeux (NO_x et NO_2 , COV, CO) qui interviennent dans la formation des aérosols secondaires et de l'ozone ;
- le CO_2 émis est également analysé en raison de l'enjeu climatique ;
- dans l'atmosphère (en concentrations), les polluants NO_2 , O_3 et les polluants particuliers déclinés par classes de taille ($PM_{2,5}$, PM_{10} et PN en nombre) et selon leur nature (BC, PM_{10} organiques et inorganiques).

Les simulations en Île-de-France permettent d'analyser en détail les émissions du trafic. Plusieurs scénarios complémentaires ont été simulés, jouant notamment sur les volumes de trafic et des restrictions selon les périmètres géographiques. Elles permettent également d'analyser géographiquement les émissions et niveaux de pollution, en relation avec la répartition des populations (lieux d'habitats).

Les simulations sur la France permettent de quantifier les évolutions sous les différents scénarios à échelle nationale, et surtout d'analyser ces évolutions pour des régions contrastées, répondant ainsi à la question de l'extension des analyses à d'autres contextes que celui de l'Île-de-France.

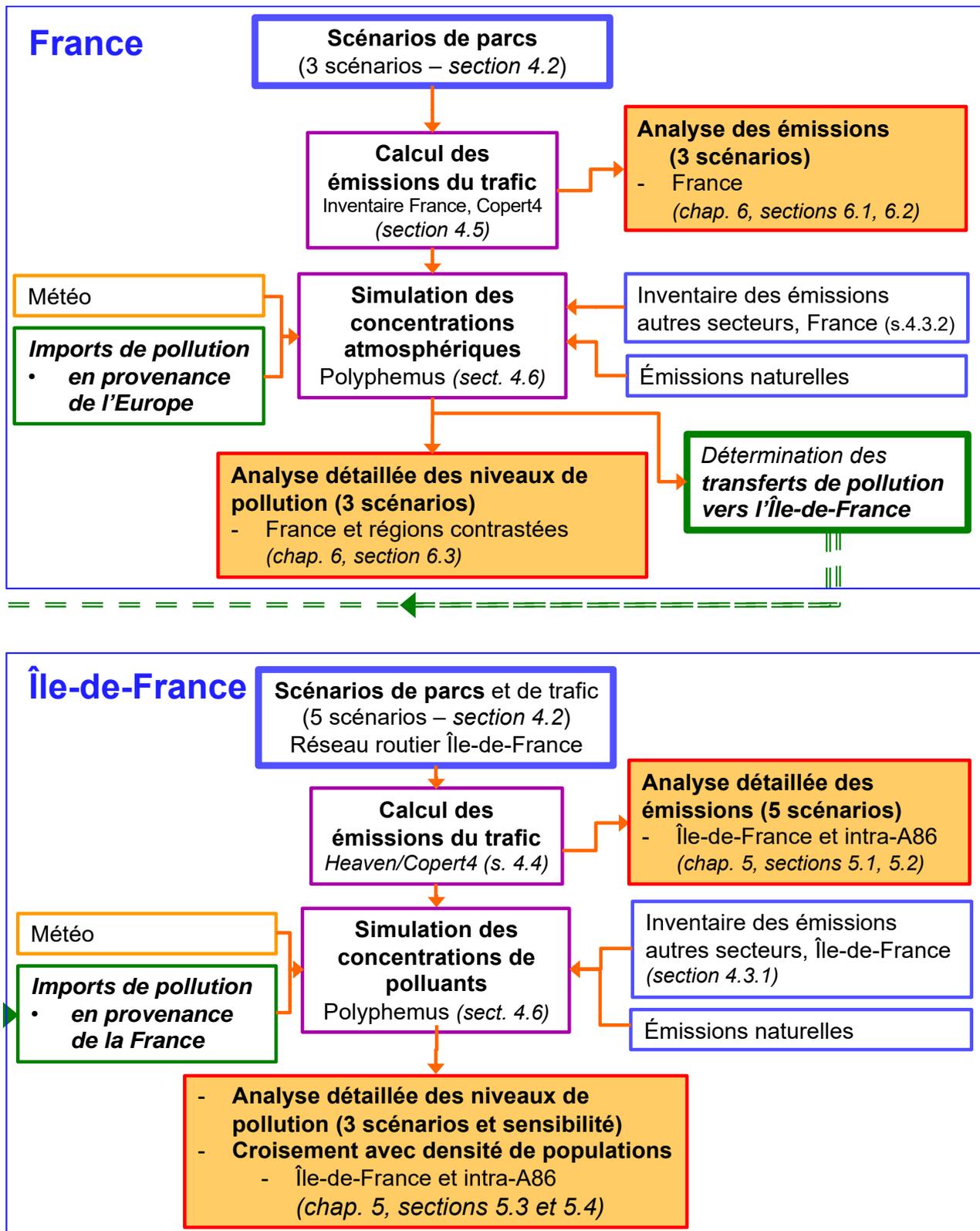


Figure 31 : Schéma conceptuel de simulation des émissions et concentrations de polluants pour la France (en haut) et pour l'Île-de-France (en bas) et renvoi aux sections correspondantes pour la description des méthodes et outils (dans ce chapitre) et pour les résultats (chapitres suivants)

4.1.2 Principales hypothèses des simulations des émissions et des concentrations de polluants

Les principales hypothèses des simulations sont récapitulées ici. Il convient de se reporter aux sections suivantes pour une description détaillée des méthodes et outils.

Simulation des émissions et concentrations de polluants - Europe :

- le calcul des concentrations de polluants sur l'Europe repose sur l'inventaire EMEP (résolution horizontale 50 km x 50 km) des émissions de polluants toutes sources anthropiques de l'année 2014 ;
- les émissions biogéniques calculées pour 2014 sont déterminées par le modèle Polyphemus à partir de l'occupation des sols de la base « *Global Land Cover* » et des champs météorologiques ;
- les champs météorologiques sont dérivés des observations du centre européen : *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*, ECMWF (année 2014) ;
- les conditions initiales et aux limites des simulations Europe reposent sur le modèle global MOZART-4 et les champs météorologiques du modèle NASA GMAO GEOS-5 (année 2014) ;
- les émissions de polluants des différents secteurs et leur répartition spatio-temporelle, les émissions biogéniques, la couverture des sols et les champs météorologiques sont invariants dans les différents scénarios.

Simulation des émissions et concentrations de polluants - France :

- le calcul des concentrations de polluants sur la France repose sur l'inventaire national établi par le CITEPA (résolution horizontale 50 km x 50 km) des émissions toutes sources anthropiques de l'année 2013, ainsi que sur les imports de pollution en provenance du domaine Europe (déterminés selon les hypothèses précédentes, France exclue) ;
- les émissions biogéniques et les champs météorologiques sont déterminés de la même manière que pour l'Europe (cf. ci-dessus) ;
- les émissions de polluants des différents secteurs (hors trafic routier) et leur répartition spatiale et temporelle, les émissions biogéniques, la couverture des sols et les champs météorologiques, de même que les conditions aux limites et les imports européens sont invariants dans les différents scénarios ;
- seules les émissions du trafic routier changent pour la France, en fonction des compositions de parcs selon les scénarios technologiques simulés. Le volume global du trafic routier national, sa répartition spatio-temporelle et sa distribution selon les catégories de véhicules (voitures, camions, etc) et selon leur taille n'évoluent pas.

Simulation des émissions, concentrations de polluants et analyse de l'exposition - Île-de-France :

- le calcul des concentrations de polluants sur l'Île-de-France repose sur l'inventaire régional établi par Airparif (résolution horizontale 1 km x 1 km) des émissions toutes sources anthropiques de l'année 2012, ainsi que sur les imports de pollution en provenance du domaine France (déterminés selon les hypothèses précédentes, Île-de-France exclue) ;
- les émissions biogéniques sont déterminées par le modèle Polyphemus à partir de l'occupation des sols de la base « *Corine Land Cover* » et des champs météorologiques ;
- les champs météorologiques ont été simulés avec le modèle WRF (*Weather Research and Forecasting*) version 3.6 (simulation pour l'année 2014) ;
- les émissions de polluants des différents secteurs (hors trafic) et leur répartition spatio-temporelle, les émissions biogéniques, la couverture des sols et les champs météorologiques sont invariants dans les différents scénarios ;
- les conditions aux limites et les imports de pollution en provenance du domaine France (hors Île-de-France) varient avec les simulations, uniquement par l'évolution des émissions nationales du trafic selon les scénarios technologiques simulés (compositions du parc automobile national) ;
- seules les émissions du trafic en Île-de-France changent, en fonction des compositions régionales du parc automobile selon les scénarios technologiques simulés. Le volume global

- du trafic régional, sa structure et sa répartition spatio-temporelle n'évoluent pas (sauf pour l'un des scénarios) ;
- l'analyse géographique conjointe des concentrations de polluants et des populations permet d'approcher l'analyse des expositions.

Remarque : globalement c'est l'année 2014 qui constitue la simulation de référence. Certaines données ne sont cependant pas disponibles pour cette année et sont approchées par une année antérieure. Ceci n'a cependant pas d'incidence sur les analyses et comparaisons de scénarios.

4.1.3 Scénarios de trafic et de composition du parc

Les scénarios d'évolution technologique des compositions du parc automobile ont été élaborés à partir des compositions actuelles du parc. La situation de référence correspond ainsi à la composition du parc automobile en circulation en 2014 pour l'Île-de-France et en 2013 pour la France (années pour lesquelles les données détaillées de parc et d'inventaires d'émissions étaient disponibles). Un modèle a été utilisé pour simuler le renouvellement des véhicules et l'évolution du parc à l'horizon 2025 selon les hypothèses suivantes :

- **Scénario FAP ou S1** : Généralisation du filtre à particules (les différentes technologies actuelles) et évolution concomitante de la réglementation en émissions (Euro) à cet horizon. Ce scénario constitue quasiment l'évolution au fil de l'eau, sans modification des équilibres entre les motorisations (essence, Diesel, électriques), ni entre les catégories et tailles de véhicules.
- **Scénario S1-2R élec** : Une variante de ce premier scénario est considérée pour étudier la sensibilité aux composés organiques volatils (COV). Cette variante consiste en l'annulation des émissions à l'échappement des deux-roues motorisés qui sont de forts émetteurs de COV (deux-roues supposés alors électriques).
- **Scénario Essence ou S2** : Recul marqué des motorisations Diesel au profit des motorisations essence pour les véhicules légers, obtenu par une hypothèse de décroissance continue des ventes de véhicules légers Diesel (de 60 % en 2014 jusqu'à 5 % en 2025), avec la même évolution réglementaire que pour le scénario FAP.

En complément de la situation de référence (année 2014), ces scénarios ont été simulés en émissions et concentrations de polluants sur l'Île-de-France (résolution fine) et sur la France.

Deux autres scénarios ont été simulés seulement en émissions sur l'Île-de-France en raison de la complexité des simulations et des temps de calcul :

- **Scénario Technologies Alternatives** : en plus de l'évolution au fil de l'eau du scénario FAP, promotion marquée de véhicules électriques sur le seul réseau routier urbain, pour toutes les catégories des véhicules (prévision de ventes en 2025 de 40 % des voitures en électriques, de 60 % des véhicules utilitaires légers, et conversion en électriques de tous les camions et autobus Euro 3 et antérieurs, et de tous les deux-roues motorisés de moins de 250 cm³), tandis que sur le reste du territoire (réseau routier rural et autoroutier) circule le parc du scénario FAP.
- **Scénario « Ambition Air »** : réduction de 20-25 % du trafic et une composition du parc similaire à celle du scénario Technologies Alternatives dans le périmètre très urbanisé intra-A86, tandis que sur le reste du territoire circule le parc du scénario FAP, sans réduction de trafic.

Le Tableau 3 récapitule ces hypothèses ainsi que les caractéristiques principales des compositions de parc qui en résultent (véhicules légers en Île-de-France) : proportions de véhicules Diesel, essence et électriques, équipement en FAP, véhicules des réglementations Euro 4 et antérieures.

Tableau 3 : Scénarios de composition du parc et leurs hypothèses

Scénario	Hypothèses		Caractéristiques - exemple de l'Île-de-France (en % trafic)
Scénarios simulés en émissions et concentrations, sur Île-de-France et France			
Référence	Année 2014	Composition actuelle du parc	73 % de véhicules légers Diesel • Dont 58 % sans FAP 27 % essence 61 % Euro 4 ou antérieurs
FAP (S1)	Généralisation du filtre à particules Diesel	Évolution « fil de l'eau » à 2025, avec : • Renouvellement du parc vers des véhicules des réglementations Euro 5 et 6, et Diesel équipés de FAP • Équilibres entre catégories de véhicules et motorisations inchangés.	73 % de véhicules légers Diesel • Dont 21 % sans FAP 27 % essence 21 % Euro 4 ou antérieurs
S1-2R élec	(sensibilité aux COV)	Idem FAP, mais deux-roues supposés électriques pour diminution des émissions de COV	
Essence (S2)	Recul des véhicules légers Diesel	Décroissance des ventes de véhicules légers Diesel au profit de véhicules essence • de 60 % en 2014 à 5 % en 2025 • Renouvellement du parc et évolution réglementaire : idem scénario FAP (S1)	43 % de véhicules légers Diesel • Dont 16 % sans FAP 56 % essence 8 % Euro 4 ou antérieurs
Scénarios simulés en émissions et sur la région Île-de-France seulement			
Technologies Alternatives	Véhicules électriques en urbain	<i>Parc urbain seulement :</i> Forte progression des véhicules électriques • 40 % des ventes de voitures et 60 % des véhicules utilitaires légers sont électriques en 2025 • 5 % seulement des ventes sont Diesel • Camions et autobus Euro 3 et antérieurs, et deux-roues < 250 cm ³ tous remplacés en électriques <i>Sur réseau rural et autoroute : Parc du scénario FAP (S1)</i>	<i>A échelle de l'Île-de-France</i> 58 % de véhicules légers Diesel • Dont 16 % sans FAP 31 % essence 11 % de véh. légers électriques 17 % Euro 4 ou antérieurs
Ambition Air	Véhicules électriques et réduction du trafic en Intra-A86	En intra-A86 : • -25 % du trafic voitures, • -20 % du trafic VUL et camions • +50 % du trafic deux-roues • +75 % du trafic bus-cars et parc du scénario Technologies alternatives <i>Hors intra-A86 : Parc du scénario FAP (S1)</i>	<i>A échelle de l'Île-de-France</i> 68 % de véhicules légers Diesel • Dont 21 % sans FAP 27 % essence 4 % de véh. légers électriques 20 % Euro 4 ou antérieurs <i>En intra-A86</i> 50 % de véhicules légers Diesel • Dont 20 % sans FAP 34 % essence 16 % de véh. légers électriques 14 % Euro 4 ou antérieurs

L'évolution des compositions de parc est réalisée par une simulation du renouvellement progressif du parc, à partir de la composition de référence (régionale ou nationale), par l'introduction annuelle de véhicules neufs et la disparition progressive des véhicules les plus anciens, jusqu'à l'horizon 2025. L'évolution technologique souhaitée est ainsi obtenue par des hypothèses sur la répartition des nouvelles immatriculations (exemple : fort recul des ventes de véhicules Diesel neufs).

En parallèle, le parc subit une évolution réglementaire : les véhicules anciens qui respectaient les normes de pollution Euro 1, 2, 3 et 4 disparaissent progressivement au profit de véhicules récents respectant les normes Euro 5 et 6.

Afin d'isoler l'effet de l'évolution technologique, la structure du parc automobile reste équivalente à celle du parc de référence. L'équilibre est ainsi maintenu entre les familles de véhicules (voitures, véhicules utilitaires légers et lourds, autobus, autocars, deux-roues motorisés) et la distribution par taille (cylindrées des moteurs des voitures et deux-roues, classes de poids des véhicules utilitaires).

Compositions moyennes du parc des véhicules légers à l'échelle de l'Île-de-France

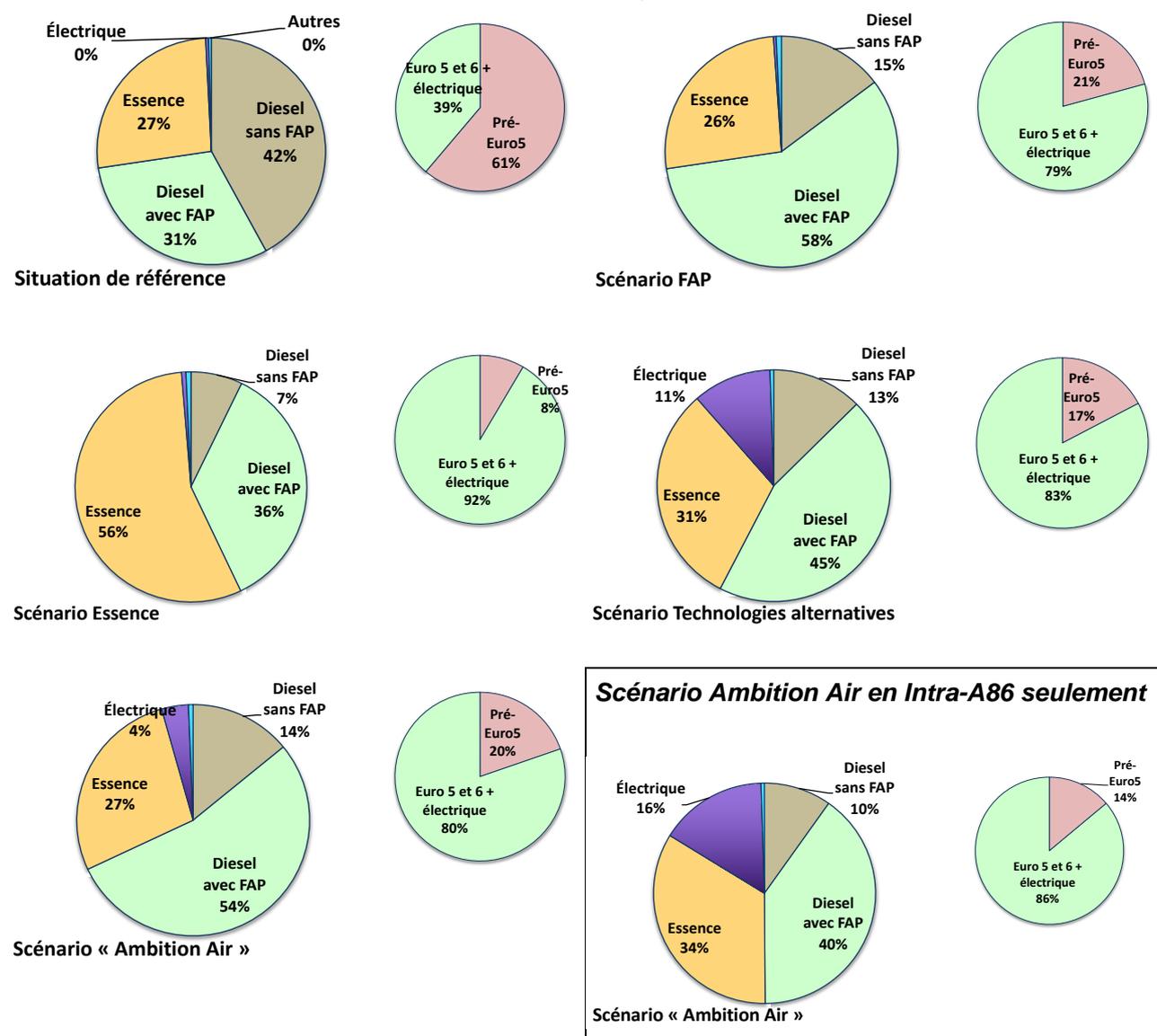


Figure 32 : Comparaisons des compositions du parc roulant en Île-de-France (en % des véhicules x km) selon les scénarios - distribution selon les motorisations et les réglementations en émissions (pré-Euro-5 et véhicules récents ou électriques), pour les véhicules légers (voitures + véhicules utilitaires légers)

La Figure 32 illustre les compositions moyennes de parc de l'Île-de-France (véhicules légers seulement) qui résultent de ces hypothèses, en tenant compte des volumes de trafic sur l'ensemble du réseau routier et des compositions spécifiques de parc s'appliquant aux réseaux urbain, rural, autoroutier et Boulevard Périphérique parisien :

- le taux de véhicules légers des réglementations Euro 5 et 6 (dont les véhicules électriques) passe de 39 % dans le scénario de référence à l'échelle de l'Île-de-France, à 80-90 % dans les scénarios « prospectifs » ;
- les véhicules légers Diesel passent de 73 % à 43 % dans le scénario Essence (S2), 58 % dans le scénario Technologies alternatives, 68 % dans le scénario Ambition Air (50 % en intra-A86) ;
- ces véhicules légers Diesel sont équipés de FAP à 80 % environ dans les différents scénarios prospectifs, contre 42 % en situation de référence ;

- les véhicules légers électriques prennent une place importante dans les scénarios Technologies Alternatives (11 % à l'échelle de l'Île-de-France) et Ambition Air (16 % en intra-A86), contre 1 % dans les autres cas.

Dans les chapitres 5 et 6 présentant les résultats des simulations sur l'Île-de-France et la France métropolitaine, les caractéristiques des compositions des parcs sont décrites ainsi que leurs émissions spécifiques de polluants (facteurs d'émissions agrégés et par catégories de véhicules).

Remarque : La quantité et la répartition spatio-temporelle du trafic et sa distribution entre les catégories de véhicules ne changent pas dans les scénarios (sauf pour le scénario Ambition Air), de même que les vitesses de circulation (valeurs détaillées sur le réseau routier Île-de-France et valeurs moyennes nationales) et les hypothèses de longueur de trajet et plus généralement d'utilisation des véhicules (qui déterminent leurs émissions de polluants).

4.2 Méthode d'élaboration des scénarios de parc automobile

4.2.1 Principes généraux de l'élaboration des scénarios

Pour répondre précisément à la question de la saisine qui est d'investiguer « l'évolution rétro-prospective des émissions de particules liées au trafic routier et l'impact des technologies de dépollution », des scénarios de parcs variant uniquement en composition (par les proportions de véhicules de différentes motorisations et technologies de dépollution) sont proposés, tandis que le trafic, la répartition modale des déplacements et les autres secteurs émetteurs sont invariants.

Les options technologiques envisagées concernent : 1- la généralisation des filtres à particules (FAP) sur les véhicules légers Diesel, 2- un recul significatif des motorisations Diesel au profit des motorisations essence, 3- la promotion de véhicules alternatifs (électriques).

Les scénarios, contrastés mais réalistes, s'inscrivent dans un « futur proche » car des prévisions plus lointaines nécessiteraient des hypothèses incertaines sur la disponibilité des énergies, l'émergence de nouvelles technologies, l'évolution des comportements individuels, etc. Des scénarios plus radicaux comme l'abandon total des véhicules à moteurs thermiques n'ont ainsi pas été considérés.

Faisabilité et approche de scénarios non technologiques

Les scénarios envisagés s'intéressent d'abord à l'évolution des technologies des véhicules, à l'exclusion de toute autre mesure ou évolution non technologique. Il ne s'agit pas ici d'un parti pris, puisque la saisine est explicitement centrée sur l'impact différencié des technologies de dépollution sur les émissions de particules par le trafic. Cette problématique est d'ailleurs en lien avec des questions très actuelles : est-ce que l'évolution des technologies Diesel va effectivement réduire la pollution particulaire ?, est-ce que le bannissement du Diesel – ou du moteur thermique – serait une solution ?, est-ce que les réglementations successives auront un impact réel ?, etc.

Les résultats des scénarios donneront donc l'ampleur des améliorations attendues pour la qualité de l'air par l'évolution des technologies des véhicules, en tenant compte cependant des nombreux effets liés aux autres secteurs polluants, aux imports nationaux, aux pollutions secondaires, etc.

Au-delà des technologies, l'évolution des mobilités et services (véhicules en partage, etc.), des comportements de mobilité ou la promotion des transports en commun et des modes doux (marche, vélo, etc.), ainsi que de nombreuses mesures s'inscrivant dans les politiques publiques (zones de restriction de circulation, plans de déplacements urbains ou d'entreprise, etc.) sont autant d'autres leviers qui peuvent influencer la qualité de l'air.

La simulation de ces mesures nécessiterait des travaux d'envergure et la sollicitation d'expertises multiples pour l'évaluation complète des mobilités et déplacements, de la répartition modale, des trafics sur les différents réseaux de transports, etc.

La simulation complète et réaliste de scénarios non technologiques n'est donc pas envisageable dans ce cadre. Cependant, afin d'apporter quelques enseignements dans ce registre, plusieurs approches sont envisagées :

- positionner les résultats des simulations de scénarios technologiques en regard de l'évolution rétrospective des émissions et de la pollution de l'air (cf. chapitres 3.2 et 3.3) ;
- positionner les résultats des simulations en regard d'autres analyses : étude d'impact de la mise en place du PDU Île-de-France, étude de faisabilité de la création de Zone d'actions prioritaires pour l'air (ZAPA), sur la base de leur documentation technique ;
- par la simulation, à partir des scénarios technologiques, mais en considérant de plus une réduction assez significative du trafic routier dans les centres urbains, ce qui permettra d'apprécier l'apport d'une telle mesure (scénario Ambition Air en Île-de-France).

4.2.2 Méthode d'élaboration des compositions de parc

Les compositions simulées de parc sont établies à partir d'un « parc de référence » auquel s'appliquent différentes transformations selon les scénarios.

Les évolutions de parcs s'inscrivent dans une « temporalité », par un renouvellement progressif du parc, sous contraintes d'hypothèses sur les nouvelles immatriculations favorisant le scénario choisi, et avec vieillissement / extinction des technologies « abandonnées », sans substitutions arbitraires de catégories de véhicules. Cette approche renforce le réalisme des scénarios.

Les transformations des compositions du parc par les scénarios sont appliquées d'une part au parc observé en Île-de-France en 2014 et d'autre part au parc national CITEPA 2013, utilisé pour les calculs d'émissions du trafic en France, celles-ci contribuant aux imports de pollution vers l'Île-de-France. Il importe en effet de ne pas créer un différentiel artificiel de pollution en limite de la région, qui serait lié à des évolutions technologiques différentes en et hors Île-de-France. Par ailleurs, la composition du parc automobile de l'Île-de-France ne peut pas être utilisée pour l'ensemble du territoire national, puisque les deux parcs Île-de-France et France diffèrent. C'est pourquoi les deux compositions de parc évoluent avec les scénarios, à partir de leur état de référence.

4.2.2.1 Données de référence et structure de la composition du parc

Les données initiales sont celles décrivant la composition du parc dit « de référence », en circulation (parc Île-de-France année 2014, parc national - France, année 2013 qui correspond également à l'inventaire européen EMEP 2013).

Ces compositions déclinent le volume de trafic (% des véhicules x kilomètres), au sein d'une famille de véhicules et selon différents paramètres technologiques et réglementaires.

Les familles de véhicules sont : les voitures particulières (VP ou PC), les véhicules utilitaires légers (VUL ou LCV), les camions (PL ou HGV), les véhicules de transports en commun (autobus-autocars ou bus/coach), les deux-roues motorisés (2R ou 2W).

Les paramètres de déclinaison du parc automobile au sein d'une famille de véhicules sont les suivants :

- les « technologies / carburants » (essence, Diesel, hybrides, électriques, gaz, etc.), auxquelles peuvent être adjoints des équipements éventuels de dépollution (FAP, SCR, EGR, etc.) ;
- la « taille » des véhicules ou des moteurs : classes de cylindrées moteur pour les véhicules légers, classes de PTAC poids total pour les véhicules utilitaires légers et lourds ;
- la classe de réglementation « émissions de polluants » (de pre-Euro puis Euro 1/I à 6/VI).

La composition du parc Île-de-France est différenciée selon les « milieux » : « urbain » ; « rural » ; « autoroute » ; « périurbain parisien » car des compositions différentes peuvent être observées

selon le type de réseau routier, tandis que le parc national est décliné selon « urbain »; « rural »; « autoroute ».

Sur chacun des tronçons du réseau routier de l'Île-de-France, des informations sont disponibles sur le volume de trafic total (horaire, journalier, annuel) et sa répartition en véhicules légers et lourds. En appliquant la déclinaison détaillée en familles de véhicules, technologies, tailles et réglementations, la répartition détaillée de la composition du parc selon les paramètres indiqués ci-dessus est connue.

La donnée de base d'une composition de parc s'exprime donc sous la forme $X_{i_{\text{Techno},i_{\text{EURO}}}}$, qui donne la proportion dans le trafic, au sein d'une famille de véhicule, de la catégorie i_{Techno} (croisant ici technologie et taille) et la catégorie réglementaire i_{EURO} .

4.2.2.2 Transformations des compositions de parc

Pour chacun des scénarios, il s'agit d'abord d'en fixer les hypothèses (exemple X % de véhicules électriques). L'évolution annuelle du parc s'obtient ensuite par les nouvelles immatriculations de véhicules, favorisant le scénario choisi, et par le vieillissement et l'extinction des technologies « abandonnées ».

Pour réaliser cette dynamique temporelle, la modélisation du parc automobile français de l'IFSTTAR (simulations des années 1980-2030) permet de simuler différentes évolutions appliquées ensuite aux compositions-types des parcs Île-de-France et France, selon les « milieux ».

Pour considérer spécifiquement certaines évolutions (FAP Diesel, véhicules essence, etc.), les catégories non concernées (hybrides, électriques, gaz, etc.) sont maintenues à leur niveau de 2014, ce qui revient à supposer qu'aucun effort n'a été fait pour en assurer la promotion.

De la même manière, les équilibres sont préservés :

- entre les familles de véhicules (pas de mutation vers les deux-roues, etc.) ;
- par classe de taille (pas d'évolution des tailles de camions, des cylindrées des véhicules, etc.) ;
- entre les différentes catégories, les technologies alternatives ne devant pas évoluer.

Les parcs évoluent uniquement en composition, au travers des seules proportions de véhicules selon leur « technologies / carburants », « taille » et « classe de réglementation Euro » pour un « milieu » donné (urbain, rural, autoroute et périphérique parisien). Le trafic et la répartition modale des déplacements, qui s'expriment en nombre de kilomètres parcourus par catégorie de véhicule selon un « milieu » donné, restent constants. Cette hypothèse de trafic constant est cependant une simplification, certaines substitutions technologiques pouvant être associées à une modification des usages du transport et du trafic, comme par exemple les véhicules électriques partagés non pris en compte. Un scénario non exclusivement technologique fait exception et permet d'appréhender la prise en compte du trafic et de la répartition modale des déplacements (section 4.2.8).

L'Annexe 3 présente une description détaillée des principes de transformation des compositions de parc au travers des différents scénarios.

4.2.3 Parcs de référence (scénario Référence ou REF)

4.2.3.1 Parc de référence pour l'Île-de-France

Le scénario de référence repose sur les compositions de parc automobile roulant (en circulation) de l'année 2014, récemment mis à jour et déclinant le trafic (en véhicules x kilomètres) entre les différentes familles de véhicules (parc roulant) et selon les caractéristiques technologiques détaillées des véhicules (parc technologique).

Les données de parc roulant et technologique nécessaires au calcul des émissions sont établies à partir d'enquêtes réalisées par la Ville de Paris (données 2014 pour Paris intra-muros et le Boulevard Périphérique), à partir de données spécifiques à l'Île-de-France pour les zones hors Paris (données

collectées lors du projet ZaParc, 2013) et à partir de données transmises par le STIF²⁸ pour le parc de bus urbains.

Distribution selon les familles de véhicules

Le parc roulant distingue les véhicules circulant selon 5 types de véhicules : véhicules particuliers (VP), véhicules utilitaires légers (VUL), poids lourds (PL), transport en commun (TC ou bus et cars) et deux-roues motorisés (2RM). Sa composition est spécifique à un type de route (urbain, Boulevard Périphérique, route et autoroute) et varie selon le type de jour (jour ouvré, samedi/veille de jour férié et dimanche/jour férié) et chacune des 24 heures de la journée.

Le parc roulant de référence est construit sur la base d'enquêtes réalisées à intervalles réguliers par la Ville de Paris en différents points de Paris et du Boulevard Périphérique (enquêtes réalisées en 2014). Ailleurs, le parc roulant est construit à partir des données de comptages SIREDO (Soins, Innovation, Recherche, en oncologie de l'Enfant, de l'adolescent et de l'adulte jeune) fournies par la DiRIF (Direction des routes Île-de-France) sur les routes nationales et autoroutes franciliennes.

La Figure 33 présente le parc roulant utilisé pour caractériser la composition du trafic parisien les jours ouvrés.

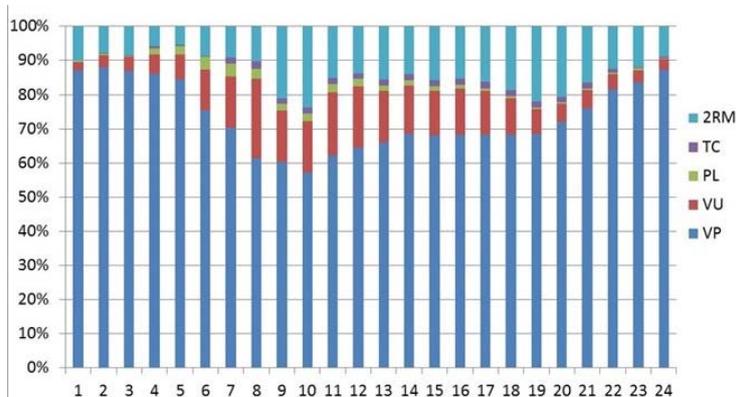


Figure 33 : Parc roulant des jours ouvrés (JO) sur les axes parisiens selon les heures de la journée (année 2014)

Le parc roulant sur les routes et les autoroutes est différent du parc urbain : il est caractérisé par une part de véhicules particuliers et de deux-roues motorisés sensiblement plus faible (respectivement de l'ordre de 65 % et moins de 5 % en moyenne) et par une part de véhicules utilitaires légers et surtout de poids lourds (de 12 à 15 % en moyenne) plus importante.

Déclinaison technologique du parc de référence

Pour les cinq types de véhicules (VP, VUL, PL, TC et 2RM), la connaissance de la composition « technologique » du parc roulant, en termes de carburant, de norme Euro et de puissance du moteur (PTAC pour les PL et les TC) est indispensable pour calculer précisément les émissions de polluants atmosphériques qui varient en fonction des véhicules.

La caractérisation des parcs technologiques de référence (2014) aux échelles de Paris et de l'Île-de-France (2014) s'appuie sur plusieurs sources de données, notamment l'enquête plaques réalisée par la Mairie de Paris en novembre 2014 pour le parc parisien. La comparaison avec les différents parcs disponibles à l'échelle nationale montre des différences significatives et confirme l'intérêt fort de disposer de parcs « locaux ». Les parcs technologiques de l'Île-de-France sont ainsi déclinés en fonction du type de route : urbain, route, autoroute et périphérique en corrigeant les parcs nationaux à partir des enquêtes locales.

Les voitures particulières (VP) sont majoritairement Diesel (66 %). Les véhicules essence représentent 31 % du parc roulant tandis que les véhicules hybrides et électriques ne constituent

²⁸ STIF : Syndicat des Transports d'Île-de-France devenu IDFM (île de France mobilité)

que 3 % des véhicules particuliers (Figure 34). Le parc technologique des VP est le plus récent (35 % respectant les normes Euro 5 et 6).

Les véhicules utilitaires sont majoritairement des véhicules Diesel de norme Euro 4 (60 % de la flotte). Environ un quart de ces véhicules sont de normes Euro 3 ou de normes antérieures et seulement 13 % de ces véhicules sont de norme Euro 5.

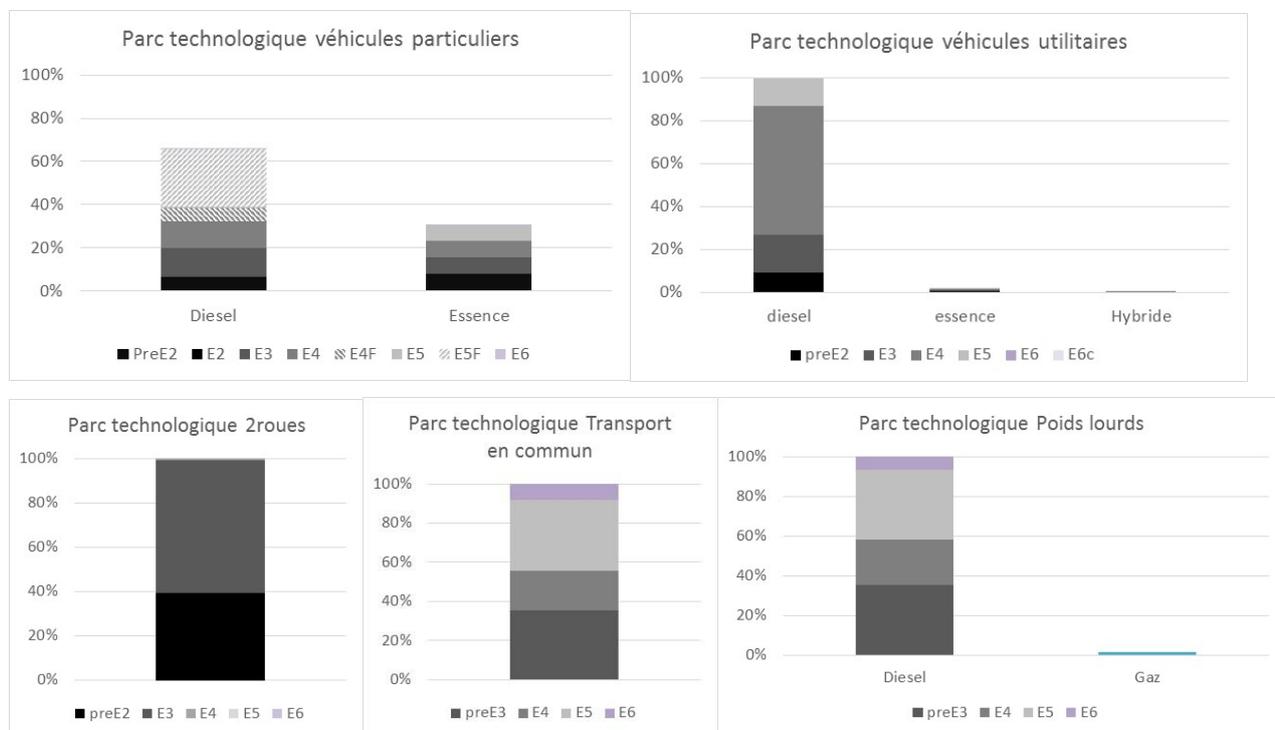


Figure 34 : Part du kilométrage parcouru selon les technologies au sein de l'ensemble des VP, des TC, des VUL, PL et 2RM en Île-de-France en 2014

Les deux-roues motorisés sont uniquement des véhicules essence. Une part importante d'entre eux (environ 40 %) est de norme Euro 2 ou de normes antérieures, 60 % sont de norme Euro 3 et seulement 1 % de norme Euro 4.

Concernant les transports en commun et les poids lourds, environ 60 % du parc roulant est de norme Euro IV ou antérieure, les 40 % restants se divisant en normes Euro V (environ 35 % dans les deux cas) et Euro VI (environ 5 % dans les deux cas).

4.2.3.2 Parc de référence pour la France métropolitaine

Pour la France métropolitaine, la composition du parc est celle des inventaires nationaux d'émissions du trafic routier, ainsi que des rapports aux instances européennes et onusiennes.

Le parc national comptabilise les véhicules ayant effectué une prise de carburant en France et non pas seulement les véhicules immatriculés en France. Une description détaillée de la méthodologie de calcul du parc de référence se trouve en Annexe 9. Le principe est d'estimer le nombre de véhicules ayant fait une prise de carburant (parc stat (#)) en fonction des consommations de carburants (consommations calées essence, gazole), des consommations unitaires et des kilométrages annuels moyens issus de la CCTN²⁹ par type de véhicules et par motorisation. La répartition par norme appliquée à ces nombres de véhicules est celle du parc de véhicules immatriculés en France (OPALE³⁰).

²⁹ CCTN : Commission des Comptes des Transports de la Nation

³⁰ OPALE : Ordonnancement du Parc Automobile en Liaison avec les Émissions

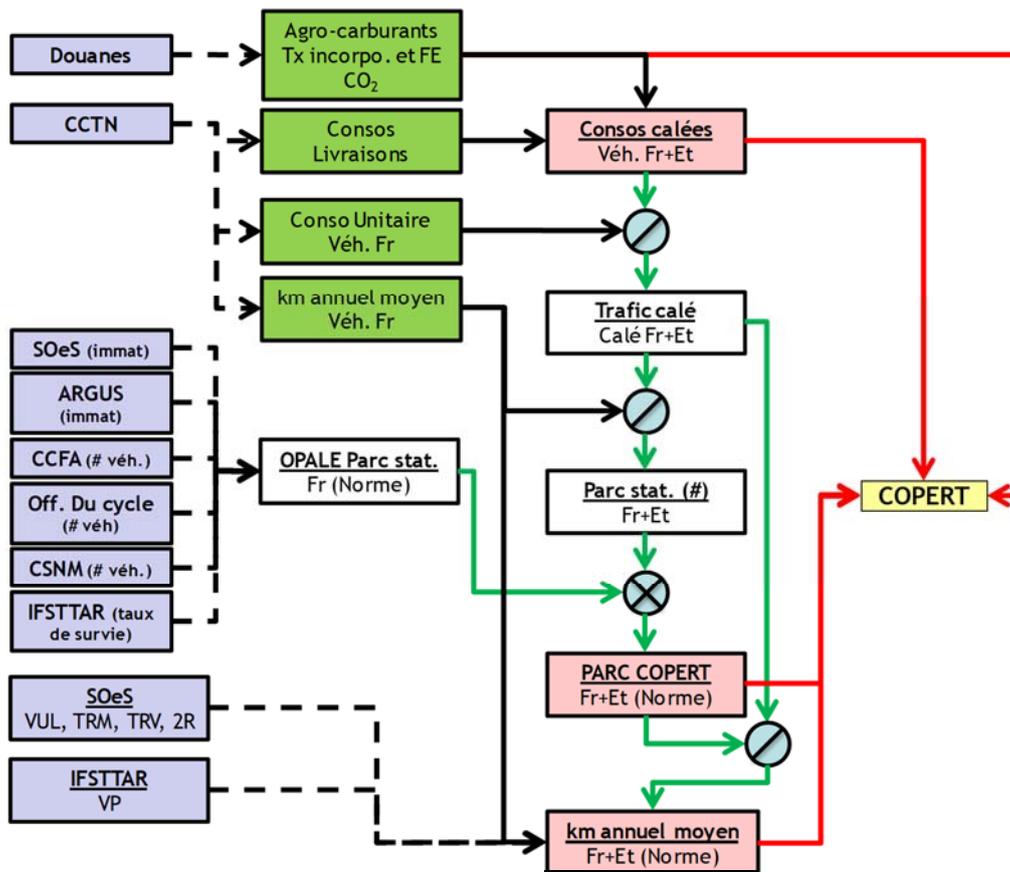
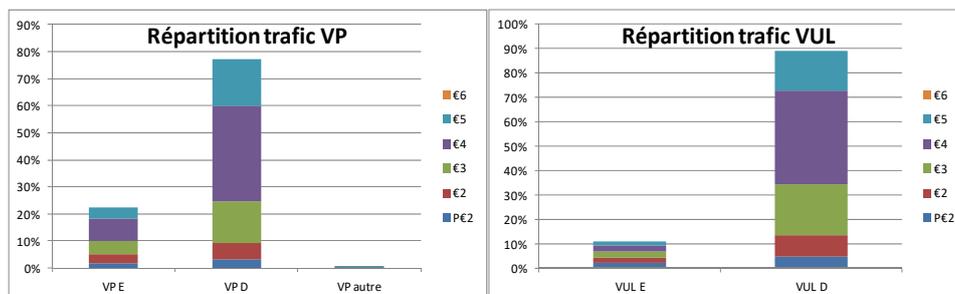


Figure 35 : Logigramme du processus d'estimation des données de composition de parcs et de distribution du trafic nécessaires au calcul des émissions selon la méthodologie COPERT4

Les voitures particulières (VP) sont en majorité Diesel (77 %). Les véhicules essence représentent 23 % du parc roulant tandis que les autres motorisations ne constituent que 0,4 % des véhicules particuliers (Figure 36). Les véhicules utilitaires légers (VUL) sont principalement Diesel (89 % de la flotte) et 41 % des VUL sont de normes Euro 3 ou antérieures. Seulement 18 % de ces véhicules sont de norme Euro 5. Les deux-roues motorisés (uniquement essence) se répartissent entre normes Euro 2 et antérieures (environ 42 %) et Euro 3 (58 %).

Concernant les transports en commun et les poids lourds, 59 % du parc roulant est de norme Euro IV ou antérieure, les 41 % restants se divisant en normes Euro V (39 %) et Euro VI (2).



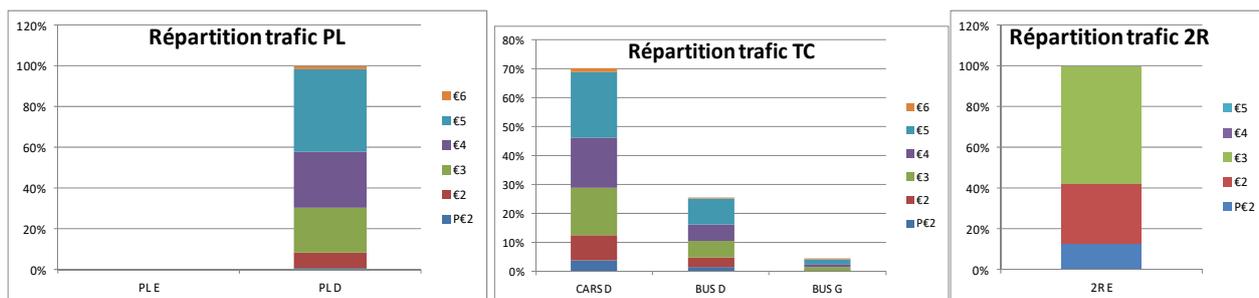


Figure 36 : Répartition du trafic selon les technologies au sein de l'ensemble des VP, des VUL, des PL, des TC et des 2RM en France en 2013

4.2.4 Scénario FAP (ou S1) - forte proportion de filtres à particules sur les véhicules Diesel

L'objectif de ce scénario (FAP ou S1, notamment dans les figures) est d'évaluer l'effet du seul filtre à particules Diesel sur les émissions de particules du trafic et la pollution particulaire.

4.2.4.1 Formulation des hypothèses

Dans la composition du parc Île-de-France 2014, les voitures Diesel représentent entre 63 % et 72 % du trafic des voitures particulières, selon les milieux (types de réseau routier).

Avec le renouvellement en cours des véhicules, par les réglementations Euro 5 et Euro 6, le taux de 45 % du trafic des voitures particulières Diesel effectué par des voitures équipées de FAP en 2014 passerait à plus de 95 % effectué par des VP Diesel équipés en 2025, selon les simulations IFSTTAR. Les véhicules utilitaires légers (fortement diésélisés) seront également fortement équipés en FAP à cet horizon (entre 60 et 80 % selon les milieux, contre 6 à 32 % en 2014).

Cette évolution quasiment « au fil de l'eau » constitue en conséquence un scénario satisfaisant d'équipement fort en FAP. Elle est donc prise telle quelle comme hypothèse de ce scénario FAP (S1).

Toutes les catégories de véhicules restent à leur niveau 2014 dans les compositions de parc en circulation de l'Île-de-France et nationale. Seules les réglementations Euro sont incrémentées au rythme de ce renouvellement entre 2014 et 2025.

4.2.4.2 Compositions du parc du scénario FAP (S1)

Le Tableau 4 illustre l'évolution par le scénario FAP (S1) de la composition du parc automobile (voitures et véhicules utilitaires légers) circulant en milieu urbain de l'Île-de-France. Les équilibres entre technologies (essence, Diesel et alternatives) sont maintenus (64 % de voitures particulières et 97 % de véhicules utilitaires légers Diesel, respectivement 31 % et 2 % de motorisations essence). Une forte évolution vers les réglementations Euro 5 et 6 (31 % des voitures et 32 % des VUL pour le scénario de référence contre 57 % et 82 % respectivement dans le scénario FAP (S1)) est observée. Le taux de véhicules Diesel équipés de FAP passe donc de 58 % à 88 % pour les voitures particulières et de 33 à 84 % pour les VUL.

Les compositions détaillées pour les différents milieux (urbain, rural, autoroute et Boulevard Périphérique parisien) et leur évolution par les différents scénarios sont en Annexe 4 (Île-de-France, urbain, rural, autoroute et Boulevard Périphérique parisien) et Annexe 10 (France).

Tableau 4 : Compositions du parc roulant urbain Île-de-France, voitures particulières et véhicules utilitaires légers, scénarios de référence (2014) et FAP (S1)

Voitures particulières		Composition urbaine		Véh. utilitaires légers		Composition urbaine	
		Référence (2014)	scénario FAP (S1)			Référence (2014)	scénario FAP (S1)
VEH_FUEL	Législation			VEH_FUE	Législation		
				L			

PC-Diesel	Pre-Euro_4	14,4	4,5	LCV-Diesel	Pre-Euro_4	25,0	2,2
	Euro_4	12,6	3,2		Euro_4	40,4	13,4
	Euro_4_FAP	6,5	0,0		Euro_4_FAP		
	Euro_5	29,8	16,8		Euro_5	32,2	8,4
	Euro_6	1,2	20,3		Euro_6	0,0	36,6
	Euro_6c	0,00	19,2		Euro_6c	0,0	36,6
Total PC-Diesel		64,5	64,0	Total LCV-Diesel		97,6	97,2
% de Diesel équipés de FAP		58,1	88,0	% de Diesel avec FAP		33,0	84,0
PC-Autres		4,8	5,5	LCV-Autres		0,7	0,8
PC-essence		30,7	30,5	LCV-essence		1,7	1,9
Total		100,0	100,0	Total		100,0	100,0

4.2.5 Variante : Scénario FAP (S1) avec deux-roues électriques (ou S1-2R élec)

À Paris, les émissions de COV influencent la formation des polluants secondaires en raison d'un ratio COV/NOx faible (régime chimique limité en COV, cf. section 5.3 du chapitre 5). Les COV étant très peu émis par les véhicules, mis à part les deux-roues, un scénario où les deux-roues sont électriques est également étudié pour analyser l'impact sur les concentrations de polluants secondaires dans les zones très urbanisées.

Ce scénario a été construit sur la base du scénario FAP (S1), par simple annulation des émissions liées à la combustion du trafic des deux-roues sur l'ensemble de l'Île-de-France. Les compositions de parc sont donc inchangées pour toutes les catégories de véhicules, sauf pour les deux-roues motorisés supposés tous électriques.

4.2.6 Scénario Essence (ou S2) - recul fort des motorisations Diesel des véhicules légers au profit d'essence

Il s'agit ici de déterminer l'influence d'un fort repli des technologies Diesel au profit des motorisations essence. Par simplification, ce scénario pourra être appelé Essence ou S2, bien qu'il ne s'agisse pas d'une exclusion complète des véhicules Diesel.

Cette évolution se fait en privilégiant les immatriculations neuves de véhicules essence, le parc se renouvelant par ailleurs avec les évolutions réglementaires (contraignant notamment l'équipement des véhicules Diesel en FAP).

Au même horizon 2025 et avec une hypothèse de forte restriction progressive des immatriculations Diesel, le parc automobile évolue vers un repli marqué du Diesel.

4.2.6.1 Formulation des hypothèses

L'hypothèse de décroissance à 10 % d'immatriculations Diesel en 2025 (contre environ 60 % en 2014) pour les voitures particulières et les véhicules utilitaires conduit à passer d'un équilibre Diesel-essence de 70-30 % en 2014 (ensemble des véhicules légers) à 42-58 % à horizon 2025. **Une hypothèse plus forte de décroissance à 5 % des immatriculations Diesel en 2025 permet d'atteindre un équilibre de 37-63 % encore plus contrasté (repli de 33 % du trafic Diesel)** (Tableau 5).

L'hypothèse à 5 % est retenue. Les autres technologies (hybrides, électriques, gaz) restent à leur niveau 2014. Les classes de tailles (cylindrée des moteurs, PTAC des véhicules lourds) sont préservées. L'évolution réglementaire est identique à celle du scénario FAP (S1).

Tableau 5 : Compositions du parc roulant urbain Île-de-France, véhicules légers, scénario de référence (2014) et sous différentes hypothèses de décroissance des immatriculations Diesel à 2025

	Référence (2014)	Hypothèse : décroissance d'ici 2025 des immatriculations Diesel à	
		10 % des véhicules neufs	5 % des véhicules neufs
Diesel VP	65 %	35,0 %	29,5 %
Diesel VUL	97 %	79,6 %	78,6 %
Diesel Véhicules légers	69,8 %	41,6 %	36,9 %
essence Véhicules légers	30,2 %	58,4 %	63,1 %
Écart Diesel Véh. légers		-28,0 %	-33,0 %

4.2.6.2 Compositions du parc du scénario Essence (S2)

Le Tableau 6 illustre les évolutions de la composition du parc des voitures particulières et des véhicules utilitaires légers dans ce scénario Essence (S2), lorsque celui-ci est appliqué à la composition initiale de référence du parc Île-de-France circulant en milieu urbain. Les voitures particulières passent de 65 % dans le scénario de référence à 30 % dans le scénario Essence (S2) et les VUL Diesel de 98 % à 79 %, respectivement, tandis que les motorisations essence progressent de 31 à 64 % (voitures) et de 2 à 21 % (VUL).

Dans le même temps, ces véhicules évoluent vers les réglementations Euro 5 et 6 comme précédemment. Cette évolution est plus marquée que dans le scénario FAP (S1, 95 % de voitures Euro 5 et 6, contre 86 %), car le scénario Essence (S2) implique un plus fort renouvellement de véhicules (élimination de nombreux Diesel au profit de voitures essence neuves).

Tableau 6 : Compositions du parc roulant urbain Île-de-France, véhicules particuliers et utilitaires légers, scénario de référence (2014) et scénario Essence (S2, fort repli des immatriculations Diesel)

Voitures particulières		Composition urbaine (%)		Véhicules utilitaires légers		Composition urbaine (%)		
VEH_FUEL	Législation	Référence (2014)	scénario Essence (S2)	VEH_FUEL	Législation	Référence (2014)	scénario Essence (S2)	
PC-Diesel	Pre-Euro_4	14,4	1,6	LCV-Diesel	Pre-Euro_4	25,0	1,5	
	Euro_4	12,6	1,1		Euro_4	40,4	9,1	
	Euro_4_FAP	6,5	0,0		Euro_5	32,2	18,2	
	Euro_5	29,8	12,4			Euro_6	0,0	24,9
	Euro_6	1,2	7,5			Euro_6c	0,0	24,9
	Euro_6c	0,0	6,9			Somme Diesel	97,6	78,6
Somme Diesel		64,5	29,5	Somme Diesel		97,6	78,6	
PC-Autres		4,8	6,6	LCV-Autres		0,7	0,9	
PC-essence	Pre-Euro_4	12,7	0,6	LCV-essence	Pre-Euro_4	1,0	0,0	
	Euro_4	8,2	0,0		Euro_4	0,4	0,0	
	Euro_5	9,0	17,8		Euro_5	0,3	4,3	
	Euro_6	0,8	24,0		Euro_6	0,0	8,2	
	Euro_6c	0,0	21,5		Euro_6c	0,0	8,2	
Somme essence		30,8	63,8	Somme essence		1,7	20,6	
Total		100,0	100,0	Total		100,0	100,0	

4.2.7 Scénario Technologies Alternatives - Promotion marquée des motorisations alternatives (électriques)

Ce scénario est motivé par les évolutions déjà observées vers des motorisations alternatives (gaz et électricité), notamment la promotion de technologies peu polluantes en zone urbaine.

La prise en compte de motorisations au gaz (GNV en zone urbaine, GNC pour les camions et autocars et le transport à longue distance) nécessite de documenter les facteurs d'émission de polluants, ceux-ci étant insuffisamment couverts par les méthodologies de calcul. Des travaux expérimentaux récents (quelques véhicules au gaz) montrent des niveaux d'émission assez similaires à ceux des motorisations Diesel actuelles. L'hypothèse d'évolution vers des motorisations au gaz a donc été abandonnée, compte tenu du peu de données d'émissions et du faible enjeu par

rapport aux scénarios précédents. Ce scénario a donc été réorienté exclusivement sur la promotion de véhicules électriques, en zone urbaine.

4.2.7.1 Formulation des hypothèses

Les hypothèses retenues sont les suivantes :

- à l'horizon 2025 et pour l'urbain, 40 % des immatriculations des voitures particulières et 60 % de celles des véhicules utilitaires légers sont électriques (contre moins de 1 % en 2014), au détriment des motorisations Diesel et essence ;
- tous les camions et autobus des réglementations Euro III et antérieures sont remplacés par des véhicules électriques ;
- tous les deux-roues motorisés de moins de 250 cm³ (cyclomoteurs, scooters et motos de petites cylindrées) sont remplacés par des deux-roues électriques ;
- hors zone urbaine, le parc du scénario FAP (S1) est conservé, c'est à dire un parc avec une évolution réglementaire (et technologies de dépollution) assez marquée à l'horizon 2025.

4.2.7.2 Compositions du parc du scénario Technologies alternatives

Pour l'Île-de-France, ce scénario se traduit par une évolution de la composition du parc en urbain (réseau routier urbain de Paris et des agglomérations et Boulevard Périphérique parisien) : pour les voitures 26 % des véhicules x kilomètres passent en électrique, 16 % pour les véhicules utilitaires légers, 19 % pour les camions, 15 % pour les autobus et autocars et 53 % pour les deux-roues motorisés (Tableau 7).

Tableau 7 : Compositions du parc roulant urbain Île-de-France, véhicules légers, scénarios de référence (2014) et Technologies Alternatives (promotion des motorisations électriques en urbain)

Voitures particulières		Composition urbaine (%)		Véhicules utilitaires légers		Composition urbaine (%)		
VEH_FUEL	Législation	Référence (2014)	scénario Techn. Alter.	VEH_FUEL	Législation	Référence (2014)	scénario Techn. Alter.	
PC-Diesel	Pre-Euro_4	14,4	1,8	LCV-Diesel	Pre-Euro_4	25,0	1,6	
	Euro_4	12,6	1,3		Euro_4	40,4	9,8	
	Euro_4_FAP	6,5	0,0		Euro_5	Euro_5	32,2	9,7
	Euro_5	29,8	8,7			Euro_6	0,0	26,8
	Euro_6	1,2	8,2			Euro_6c	0,0	26,8
	Euro_6c	0,0	7,7			Somme Diesel	97,6	74,8
Somme Diesel		64,5	27,6					
PC-essence	Pre-Euro_4	12,7	1,9	LCV-essence	Pre-Euro_4	1,0	0,0	
	Euro_4	8,2	0,0		Euro_4	0,4	0,0	
	Euro_5	9,0	7,2		Euro_5	0,3	1,2	
	Euro_6	0,8	17,1		Euro_6	0,0	3,7	
	Euro_6c	0,0	15,8		Euro_6c	0,0	3,7	
	Somme essence		30,8		47,0	Somme essence	1,7	8,7
Véh. électriques		0,9	26,2			0,3	16,2	
Autres		3,9	4,2			0,4	0,4	
Total		100,0	100,0	Total		100,0	100,0	

Dans le même temps, un recul des motorisations Diesel est observé (en milieu urbain, Tableau 7), de 65 à 27 % pour les voitures particulières et de 98 à 75 % pour les VUL, tandis que les motorisations essence progressent de 31 à 47 % pour les voitures particulières et de 2 à 9 % pour les VUL. Ces évolutions s'appliquent également sur le Boulevard Périphérique parisien.

Par contre, sur le réseau routier rural et autoroutier, les compositions de trafic propres au scénario FAP (S1) sont retrouvées (évolution réglementaire pour toutes les catégories de véhicules mais sans changement des motorisations et quasi-généralisation des FAP pour les Diesel).

4.2.8 Scénario Ambition Air - Diminution du trafic et promotion des véhicules électriques dans la zone urbanisée intra-A86

L'objectif de ce scénario est « d'aller au-delà » des seules évolutions technologiques des véhicules et d'imaginer des hypothèses permettant d'atteindre des objectifs ambitieux de qualité de l'air, voire des objectifs « climat ».

Ce scénario a été construit en s'appuyant sur les potentiels (déclinés par catégories de véhicules) de réduction des émissions de polluants et de gaz à effet de serre des scénarios précédents (FAP ou S1, Essence ou S2, Technologies Alternatives, sans réduction de trafic) et en appliquant différentes hypothèses de réduction de trafic aux véhicules individuels (voitures) et utilitaires, compensée cependant par les transports en communs et deux-roues, en vue d'accroître les gains en émissions et gaz à effet de serre. Ces hypothèses de réduction de trafic et de substitution de motorisations principalement vers des véhicules électriques ne sont cependant appliquées qu'à la zone fortement urbanisée intra-A86. En dehors de ce périmètre, le trafic est inchangé et c'est le parc du scénario FAP (S1) qui circule (évolution au fil de l'eau à 2025).

Un scénario COP21 (réduction des émissions de gaz à effet de serre du trafic, par un facteur 2 par rapport à la situation de référence 2014) a été également construit et évalué de cette manière. Il nécessitait cependant l'introduction forte de biocarburants (plus de 20 %) et ne donnait pas d'améliorations très significatives en émissions par rapport au scénario ci-dessus. Compte tenu du manque d'informations sur les émissions liées aux biocarburants, ce scénario n'a pas été retenu.

4.2.8.1 Formulation des hypothèses

Les hypothèses de réduction de trafic retenues pour ce scénario s'appliquent au territoire très urbanisé intra-A86 comme suit :

- le « niveau d'accessibilité / mobilité » des personnes est maintenu à son niveau actuel (nombre de passagers x kilomètres), en diminuant le trafic en véhicules particuliers (en moyenne 1,05 passagers par voiture) et en augmentant les transports en commun (autobus en moyenne 30 passagers par véhicule) et les deux-roues (priviliégiant les véhicules électriques) ;
- le trafic des voitures est ainsi réduit de 25 %, tandis que les trafics des deux-roues et autobus augmentent de 50 et 75 % ;
- les trafics des VUL et camions sont également restreints de 20 % (sans compensation) ;
- le parc des véhicules circulant en intra-A86 est celui du scénario Technologies Alternatives c'est-à-dire avec une forte proportion de véhicules électriques.

En dehors du périmètre intra-A86, le trafic est inchangé et c'est le parc du scénario FAP (S1) qui circule (évolution au fil de l'eau à 2025).

4.2.8.2 Compositions du parc du scénario Ambition Air

Ce scénario n'a pas été généré par une simulation du renouvellement du parc et il n'a pas été simulé en émissions au moyen de la chaîne de calcul. En effet, il a pu être directement calculé par affectation des parcs des autres scénarios et de leurs émissions sur les mailles du territoire et par réduction / augmentation des trafics des différentes catégories de véhicules selon les hypothèses précédentes. Le Tableau 8 récapitule les hypothèses de ce scénario.

Tableau 8 : Hypothèses et compositions du parc roulant du scénario « Ambition Air » (réduction du trafic et promotion des motorisations électriques en urbain / intra-A86)

	Évolution par rapport au scénario de référence (2014)	Hypothèses de réduction / compensation du trafic	Compositions de parc
En intra-A86	Réduction trafic Maintien du niveau de mobilité des passagers (100 % des pass.x km) Promotion des véhicules électriques et évolution réglementaire	<ul style="list-style-type: none"> • - 25 % du trafic voitures • +50 % trafic deux-roues • +75 % trafic bus/cars • - 20 % du trafic VUL • - 20 % du trafic camions 	Parc Technologies Alternatives (forte promotion des véhicules électriques, voitures, camions et deux-roues)
Hors ce périmètre	Trafic inchangé Évolution réglementaire	Trafic inchangé pour toutes les catégories de véhicules	Parc FAP (S1) (forte proportion de Diesel avec FAP et évolution réglementaire de toutes les catégories de véhicules)

4.3 Émissions de polluants des secteurs d'activités autres que le trafic

La simulation de la pollution atmosphérique nécessite de considérer l'ensemble des émissions de polluants anthropiques et naturelles.

Dans le cadre de ces travaux, les émissions des secteurs d'activités autres que le trafic sont considérées comme ne variant pas dans les différentes simulations. Elles sont estimées à partir des inventaires territoriaux annuels et décrites dans cette section.

Les émissions du trafic sont quant à elles calculées en fonction des scénarios de compositions de parc et selon des approches décrites aux sections suivantes.

4.3.1 Inventaire des émissions en Île-de-France

Pour l'Île-de-France, c'est l'inventaire des émissions pour l'année 2012 qui est utilisé (dernier inventaire calculé).

Il convient de noter que les HAP et métaux lourds n'ont pas été pris en compte dans les simulations pour différentes raisons : 1- les facteurs d'émissions sont pauvres et le plus souvent réduits à des proportions de la consommation de carburant ou des émissions de particules ; 2- leur prise en compte dans les simulations des concentrations de polluants relève soit de processus très simples (composés inertes) soit de phénomènes complexes voire insuffisamment documentés.

Les émissions des secteurs d'activité autres que le trafic ont été calculées sur la région Île-de-France pour l'année 2012^{31,32}. Cet inventaire francilien des émissions intègre l'ensemble des données d'entrée primaires et facteurs d'émissions disponibles pour l'année 2012. Il repose principalement sur les méthodes de calcul des émissions actualisées en 2012 à l'échelle nationale par le Pôle de Coordination des Inventaires Territoriaux (PCIT) créé par l'arrêté du 24 août 2011, relatif au SNIEBA³³. Ce pôle, dont les travaux ont été validés par le Ministère en charge de l'environnement, est composé des AASQA³⁴, du CITEPA et de l'INERIS.

Les émissions sont calculées sur l'ensemble de l'Île-de France à une échelle communale puis spatialisées sur une grille dont le maillage est de 1 x 1 km².

³¹ Bilan des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en Île-de-France pour l'année 2010 et historique 2000/2005. Méthodologie et résultats. <http://www.airparif.fr/pdf/publications/inventaire-emissions-idf-2010-rapport-130731.pdf>

³² Inventaire régional des émissions en Île-de-France. Année de référence 2012. Éléments synthétiques. <http://www.airparif.fr/pdf/publications/inventaire-emissions-idf-2012-150121.pdf>

³³ SNIEBA : Système National d'Inventaires d'Émissions et de Bilans dans l'Atmosphère

³⁴ AASQA : Associations Agréées pour la Surveillance de la Qualité de l'Air

La Figure 37 représente la spatialisation à l'échelle de l'Île-de-France des émissions de NO_x, COVNM et PM₁₀.

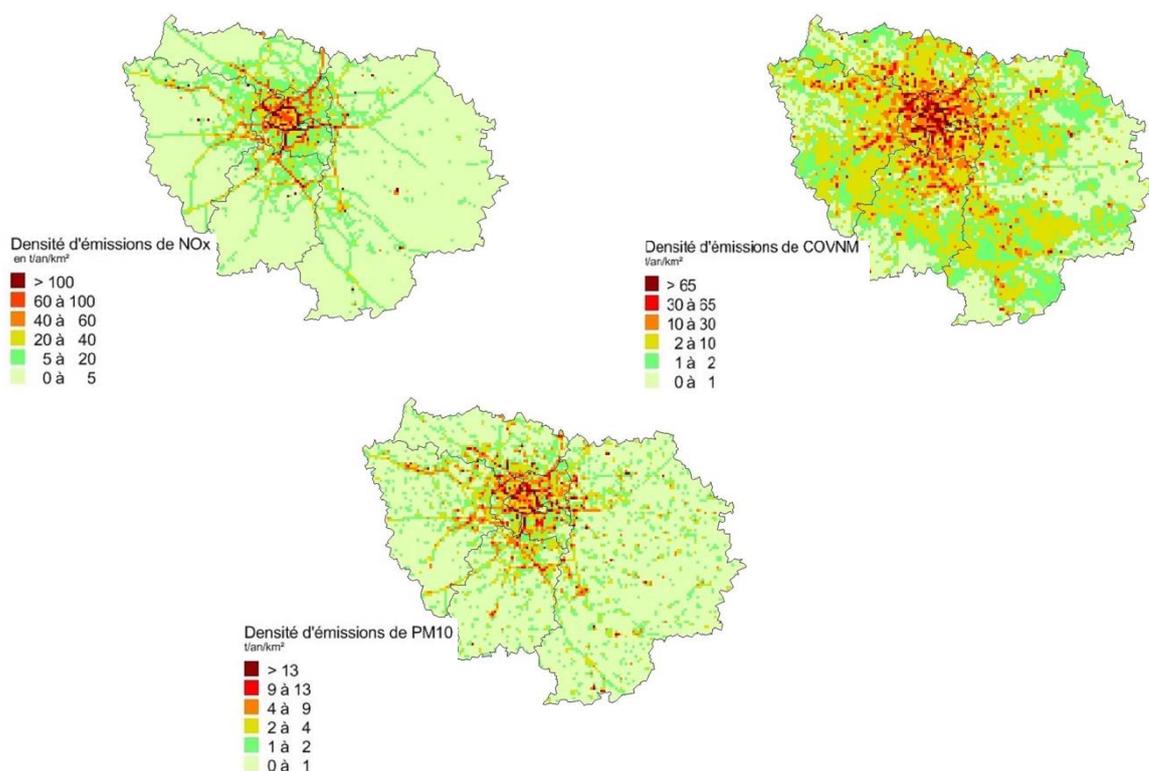


Figure 37 : Cartographie des émissions de NO_x, COVNM et PM₁₀ en Île-de-France pour l'année 2012

4.3.2 Inventaires des émissions pour la France

Les émissions sectorielles au niveau national utilisées pour le calcul des concentrations au niveau de la France sont celles de l'année 2013, issues de la soumission 2016 de l'inventaire national³⁵.

Ces émissions sectorielles ne concernent que les émissions de CO, COVNM, NH₃, NO_x, PM₁₀, PM_{2,5}, PM_{coarse} et SO_x. Les facteurs d'émission utilisés pour le calcul des émissions du transport routier sont détaillés en Annexe 11.

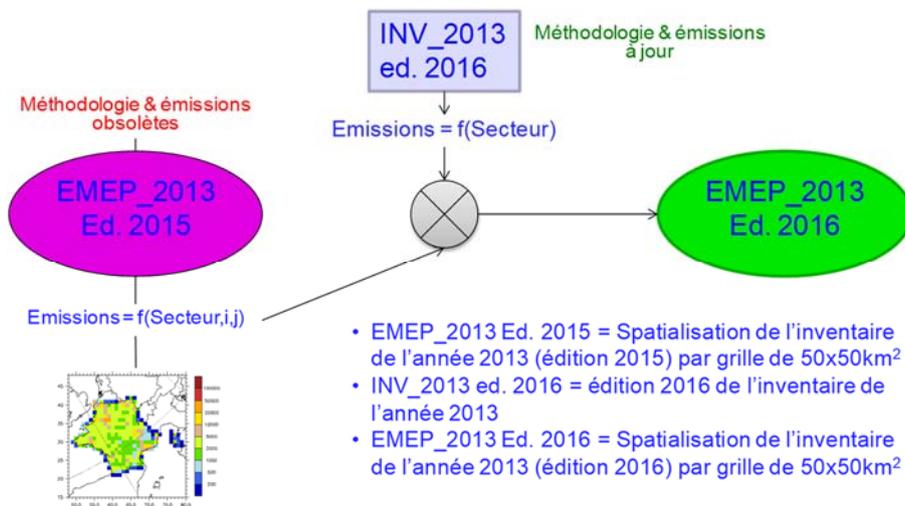
Les méthodologies de calcul des émissions sont disponibles dans le rapport méthodologique OMINEA correspondant à la soumission 2016³⁶.

Les émissions ont ensuite été spatialisées en utilisant la spatialisation 50 x 50 km² de l'année 2013 correspondant à la soumission 2015 de l'inventaire national³⁷. Entre les deux soumissions, plusieurs changements méthodologiques ont eu lieu (comme le passage aux lignes directrices du GIEC 2006, la mise à jour de facteurs d'émission, etc.) (Figure 38).

³⁵ CITEPA, édition mars 2016. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France métropolitaine, format CEE-NU

³⁶ CITEPA, 2016. Rapport OMINEA – 13^{ème} édition

³⁷ http://webdab1.umweltbundesamt.at/scaled_country_year.html?cgiproxy_skip=1



emep_2015	NMVOC	NOX	SOX
S6	318 008	3	-
S7	106 419	530 194	826
S8	69 239	167 017	3 070
S10	2 505	979	158
Total	758 380	989 520	218 785

emep_2016	NMVOC	NOX	SOX
S6	314 088	890	1
S7	65 667	516 212	825
S8	47 978	161 650	2 964
S10	1 628	3 535	271
Total	697 277	965 876	217 193

2016/2015	COVNM	NOX	SO2
S6	0.99	293.59	190.03
S7	0.62	0.97	1.00
S8	0.69	0.97	0.97
S10	0.65	3.61	1.71
Total	0.92	0.98	0.99

Évolutions pour les secteurs S6 Solvants, S7 Transport routier, S8 Autres sources mobiles et engins, S10 Agriculture

Figure 38 : Principe de spatialisation de la soumission 2016 de l'inventaire 2013 et principales évolutions entre les soumissions 2015 et 2016

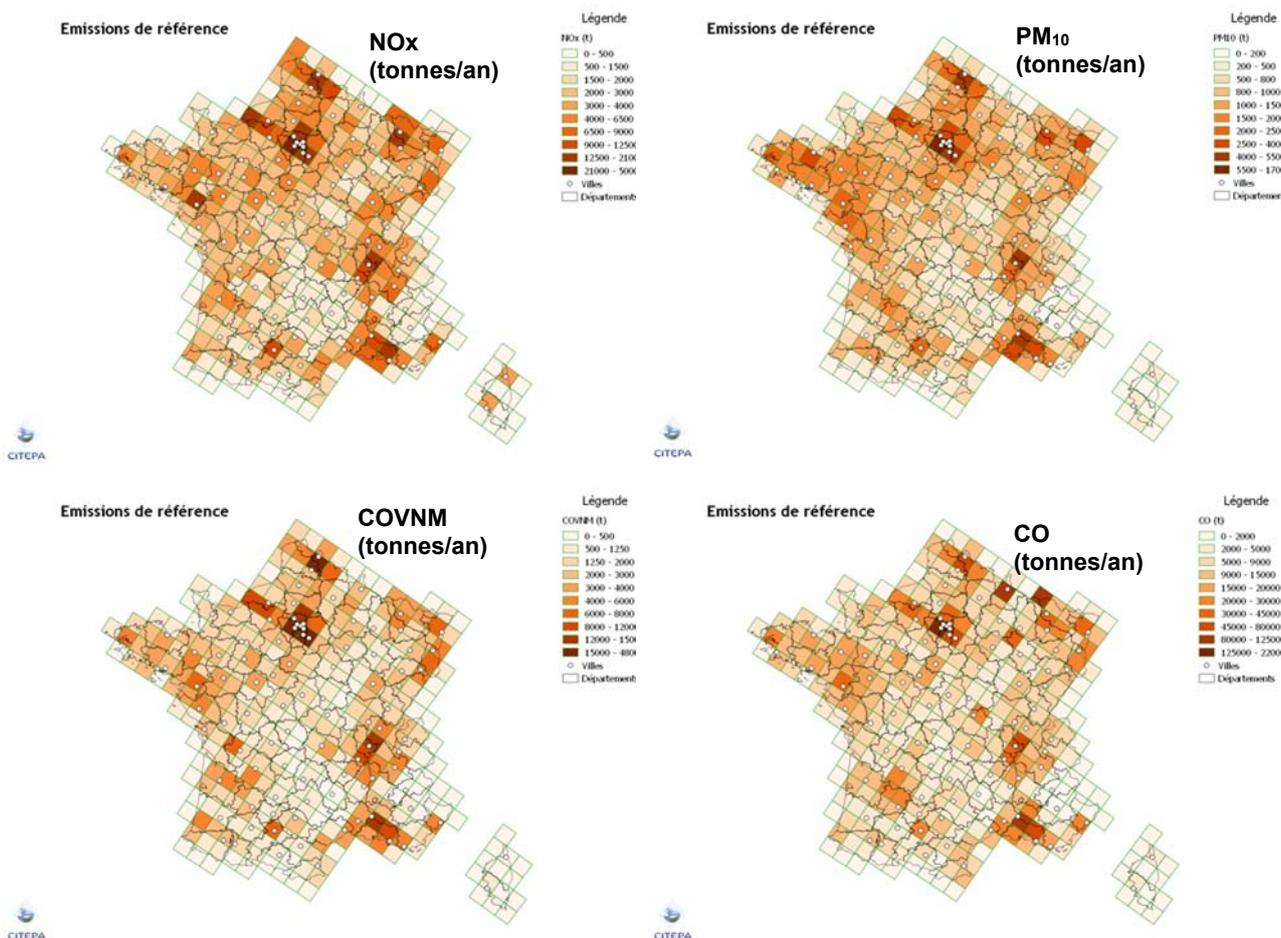


Figure 39 : Représentation cartographique de l'inventaire national des émissions de polluants de l'année 2013 (et situation de référence) - Cas des NOx, PM10, COVNM et CO

La Figure 39 illustre la spatialisation des émissions pour les NOx, PM₁₀, COVNM et CO de l'année 2013 (émissions du scénario de référence). Les émissions des autres polluants sont présentées en Annexe 12, ainsi que leur évolution avec les scénarios FAP (S1) et Essence (S2). Les principales sources d'émissions de NOx (~75 %) sont le transport routier, l'agriculture/forêt/pêche et le résidentiel. Les émissions sont donc élevées dans les villes, autour des grands axes routiers ainsi que dans les plaines agricoles.

Les principales sources de PM₁₀ (~75 %) sont le résidentiel, la gestion du fumier, le transport routier, les carrières et mines et les sols agricoles. Les émissions de PM₁₀ sont donc également fortes dans les villes, sur les grands axes routiers ainsi qu'en région Bretagne (élevages).

Pour les COVNM, les contributeurs principaux (~75 %) sont le résidentiel, les solvants domestiques, l'application de revêtements, le transport routier, les impressions et les industries alimentaires. Les émissions sont donc fortes dans les milieux urbanisés.

Enfin, le CO est principalement émis (~75 %) par le résidentiel, la métallurgie et le transport routier, c'est-à-dire dans les agglomérations et dans le nord de la France.

4.4 Émissions de polluants du trafic routier – Île-de-France

Le système HEAVEN de calcul des émissions du trafic routier est basé sur un modèle de trafic alimenté en temps quasi réel par des comptages de la Ville de Paris et de la DIRIF. Celui-ci est le fruit du projet européen HEAVEN³⁸ (2000-2003). Les émissions sont estimées par la chaîne de calcul développée par Airparif et décrite dans la Figure 40.

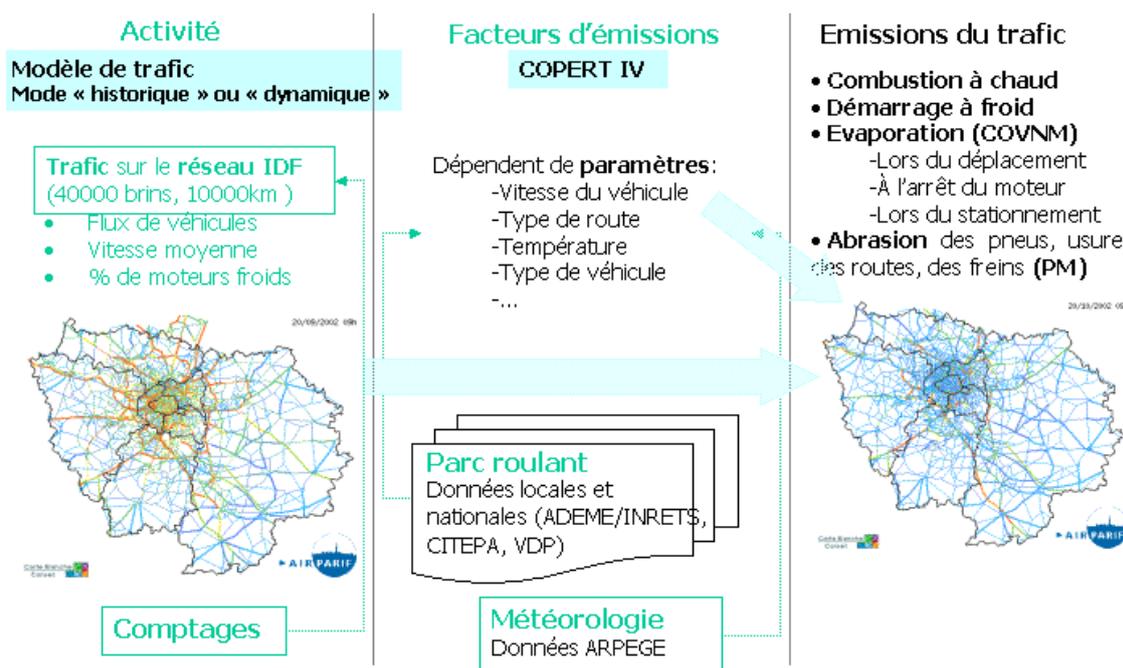


Figure 40 : Schéma de principe de l'évaluation des émissions routières dans le système HEAVEN

Le modèle calcule le débit tous véhicules confondus, la vitesse, la durée de trajet entre deux nœuds du réseau et la part de moteur froid pour chaque heure de la journée. Le calcul des vitesses est réalisé au niveau du modèle de trafic, en se basant sur des courbes débit-vitesse dépendant de la capacité de chaque brin du réseau routier et de sa typologie. Ce calcul de vitesse présente des

³⁸ <http://www.AIRPARIF.asso.fr/page.php?rubrique=modelisation&article=heaven>.

incertitudes (connaissance partielle des paramètres du réseau routier, des conditions réelles de circulation...).

La récupération horaire des comptages réalisés sur l'Île-de-France permet de caler Heaven Traffic et donc de pallier les éventuelles divergences de celui-ci.

Le modèle calcule le trafic routier sur près de 41 000 brins ce qui représente près de 10 000 km de voies sur les 37 000 km du réseau Île-de-France. Il peut être alimenté par près de 500 boucles de comptages dans Paris intra-muros et par près de 250 en dehors.

Heaven Traffic permet d'alimenter la chaîne de calcul des émissions liées au trafic routier Heaven Émissions.

Le calcul des émissions prend en compte le nombre de véhicules circulant sur les portions d'axes pour chaque heure, leur vitesse, la part des véhicules circulant avec un moteur froid, la répartition en grandes catégories de véhicules sur les différents types d'axes en fonction de l'heure³⁹, la composition technologique du parc roulant⁴⁰ et la température ambiante.

À partir des sorties horaires du modèle de trafic et des paramètres cités ci-dessus, l'application de facteurs d'émission adaptés permet de déduire les émissions horaires du trafic routier en Île-de-France pour chaque axe composant le réseau routier modélisé.

Les facteurs d'émissions moyens du trafic routier en Île-de-France, par type de véhicules et par norme technologique, ont été dérivés des calculs d'émission de l'Île-de-France par agrégation des émissions et trafics sur l'ensemble du réseau routier. Ils sont donnés en Annexe 6 et Annexe 7 pour les différents scénarios de composition du parc.

4.4.1 Méthode de calcul des émissions et facteurs d'émission

Les facteurs et fonctions d'émissions de la méthodologie EMEP/EEA COPERT 4 v11.3 sont utilisés pour le calcul des émissions en masse à un pas de temps horaire. Concernant les émissions à l'échappement des particules en nombre, les facteurs d'émissions sont issus du HBEFA 3.2 (*Handbook of Emission Factors*).

Les facteurs d'émission des différents modèles utilisés en Europe (Copert, HBEFA, Versit+, etc.) sont issus de mesures effectuées sur banc à rouleau, les véhicules testés reproduisant des cycles de conduite représentatifs. D'autres données d'émission sont acquises à bord de véhicules en circulation, avec des systèmes portables de mesure d'émissions (PEMS). Dans les deux cas, les données et facteurs d'émissions reflètent bien les émissions réelles des véhicules, au travers de conditions de tests proches de celles rencontrées dans le trafic. Les valeurs limites réglementaires ou les émissions mesurées sur les cycles réglementaires (i.e. NEDC) ne sont généralement pas utilisées pour l'élaboration des facteurs d'émission en raison de leur faible représentativité.

Pour les particules, les émissions liées à la combustion sont considérées se produire sous forme de PM_{2,5}. La répartition entre PM_{2,5} et PM_{coarse} de l'abrasion (i.e. les particules de diamètre compris entre 2,5 et 10 µm) est celle préconisée par la méthodologie COPERT 4 (Tableau 9).

Concernant les émissions de COV par évaporation de carburant, une distinction est faite entre l'évaporation du véhicule en roulage (*running losses*), l'évaporation après arrêt du moteur (*hot soak*) et celle du véhicule en stationnement (*diurnal losses*). Concernant cette dernière, elle ne peut être prise en compte que de manière globale à l'échelle de l'Île-de-France, car les véhicules en stationnement ne peuvent pas être spatialisés avec les outils Heaven. Elles ne sont donc calculées qu'agrégées sur la région. En conséquence, elles ne seront pas prises en compte dans les analyses

³⁹ Il s'agit du parc roulant de véhicules : évolution horaire de la part relative de chaque catégorie de véhicules (sur l'ensemble des véhicules x kilomètres parcourus pendant l'heure considérée), pour les jours ouvrés, samedis et dimanches, et pour chaque type d'axe (centre-ville, urbain dégagé, autoroute, ...). Les catégories de véhicules considérées sont les suivantes : VP = voitures particulières ; VUL = véhicules utilitaires légers ; PL = poids lourds ; TC = bus et cars ; 2R = deux-roues motorisés.

⁴⁰ Il s'agit, pour chacune des grandes catégories de véhicules du parc roulant, de la part relative de chaque type de véhicules, les types étant définis par l'âge (la norme), la puissance ou le tonnage, la motorisation des véhicules.

territoriales (intra-A86, Paris, etc.), ni pour le calcul des concentrations de PM à l'échelle de l'Île-de-France.

Tableau 9 : Répartition des émissions liées à l'abrasion selon la taille des particules (Source COPERT 4)

Classe de taille de particules	Fraction de masse des particules		
	Abrasion des pneus	Abrasion des freins	Abrasion des routes
TSP	1,00	1,00	1,00
PM ₁₀	0,60	0,98	0,50
PM _{2,5}	0,42	0,39	0,27

4.4.2 Estimation des flux de trafic routier sur le réseau francilien

Le réseau et le trafic routier franciliens sont modélisés sous la forme de 40 000 tronçons de voie, sur lesquels sont estimés les trafics de véhicules, en flux et vitesses moyennes horaires, par catégories de véhicules (voitures particulières, véhicules utilitaires légers de moins de 3,5 tonnes de PTAC, camions, autobus et autocars, deux-roues motorisés).

4.4.2.1 Modèle et données de trafic

Un modèle de trafic génère les flux de véhicules sur le réseau routier sur la base d'enquêtes sur les habitudes de déplacement des franciliens (Enquête Globale Transport) ; pour le scénario de référence, le trafic est calé à l'aide de données de comptages horaires fournies par la Mairie de Paris pour l'année 2014. Environ 500 points de comptage du trafic en Île-de-France permettent d'obtenir une image précise du trafic horaire sur les 10 650 km du réseau routier modélisé (ou 20 000 km en intégrant les deux sens de circulation).

En mode prospectif, le trafic routier a été considéré similaire à celui du scénario de référence.

4.4.2.2 Répartition temporelle des trafics

La répartition horaire des trafics et de leurs émissions est réalisée en s'appuyant sur des profils de trafic (des flux de véhicules et des vitesses) à différentes échelles temporelles (mois, semaine, journée) et spatiales (Paris intra-muros, Boulevard Périphérique, routes et autoroutes).

Ces profils ont été établis à partir de données transmises par la Direction de la Voirie et des Déplacements (DVD) de la Mairie de Paris⁴¹ pour le trafic parisien et du Boulevard Périphérique et la Direction des routes d'Île-de-France (DiRIF)⁴² pour les routes en dehors de la Capitale et les autoroutes.

La Figure 41 présente à titre d'exemple les profils mensuels (a) et hebdomadaires (b) des flux de véhicules obtenus pour chacune des quatre zones considérées, à savoir Paris intra-muros, le Boulevard Périphérique, les autoroutes et les axes routiers en dehors de Paris.

Pour les quatre zones, un minimum de trafic routier est observé en août, au cœur de la période estivale. Les profils hebdomadaires de Paris intra-muros et du Boulevard Périphérique montrent une baisse de trafic le samedi (respectivement -10 à -15 % et -3 %) et encore plus le dimanche (respectivement -20 % et -5 %). La baisse maximale de trafic sur les routes et autoroutes est observée le samedi (-50 à -60 %), le trafic du dimanche étant légèrement plus élevé sur ces zones.

⁴¹ Source : bilan des déplacements 2014.

⁴² Autoroutes et routes : profil mensuel d'après les données autoroutes de la DiRIF avec quelques données de vitesse. Pour un même axe, le calcul a été fait à partir de plusieurs points de comptage. Pour les routes nationales, les données de la N118 dans les deux sens et de la N13, seules données mises à disposition, ont été utilisées.

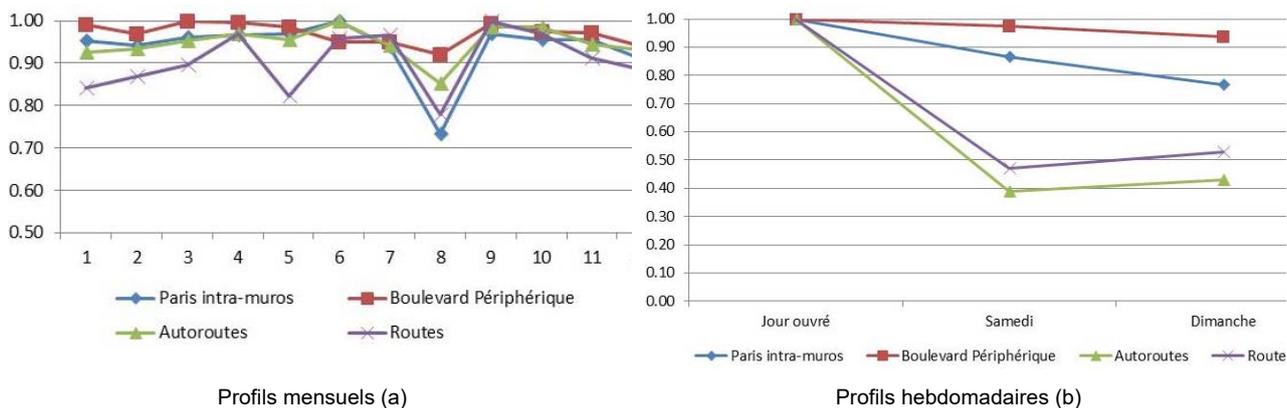


Figure 41 : Profils mensuels (a) et hebdomadaires (b) du trafic routier, par zone (Paris intra-muros, Bd Périphérique, autoroutes et routes)
Source : Airparif (données DRIEA, DiRIF et Mairie de Paris)

À partir de ces profils mensuels, hebdomadaires et horaires, il est possible de reconstituer le trafic routier horaire (flux de véhicules et vitesses) pour n'importe quelle heure de l'année, sur tout type d'axe situé dans Paris ou non.

4.4.3 Composition du parc automobile en Île-de-France

Pour une évaluation précise de l'impact des scénarios, Airparif s'est appuyée sur les données franciliennes de composition du parc automobile les plus récentes : enquêtes réalisées par la Ville de Paris (données 2014 pour Paris intra-muros et le Boulevard Périphérique), données spécifiques pour les zones hors Paris (projet ZaParc, 2013) et données du STIF⁴³ pour le parc de bus urbains. Pour la situation de référence, la composition du parc francilien a été décrite en section 4.2.3. Il s'agit du parc technologique défini pour l'année 2014 qui sera combiné aux niveaux de trafic estimés pour la même année.

Pour les autres scénarios, les compositions de parc ont été établies conformément à l'approche décrite en section 4.2.1. Ces compositions sont décrites en Annexe 4 (selon le réseau routier) et Annexe 5 (agrégées sur l'Île-de-France).

4.5 Émissions de polluants du trafic routier – France métropolitaine

Pour calculer les émissions des scénarios au niveau national, les facteurs d'émissions des normes ont été moyennés à partir des facteurs d'émissions utilisés pour les projections 2035 des émissions du scénario AME_2014⁴⁴.

Les émissions sont ensuite obtenues en multipliant ces facteurs d'émission par les trafics estimés suivant les différents scénarios. Elles sont attribuées au secteur 7 (section 4.3.2), puis spatialisées sur la grille EMEP 50 x 50 km² (Figure 42).

Comme pour la référence, ces émissions sectorielles ne concernent que les émissions de CO, COVM, NH₃, NO_x, PM₁₀, PM_{2,5}, PM_{coarse} et SO_x. Les facteurs d'émission utilisés pour le calcul des émissions du transport routier sont détaillés en Annexe 11.

⁴³ STIF : Syndicat des Transports d'Île-de-France devenu IDFM (Île-de-France mobilité)

⁴⁴ <http://www.developpement-durable.gouv.fr/scenarios-a-l-horizon-2020-2030.html> : http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Synthese_scenarios_2014-15_mis_en_ligne.pdf

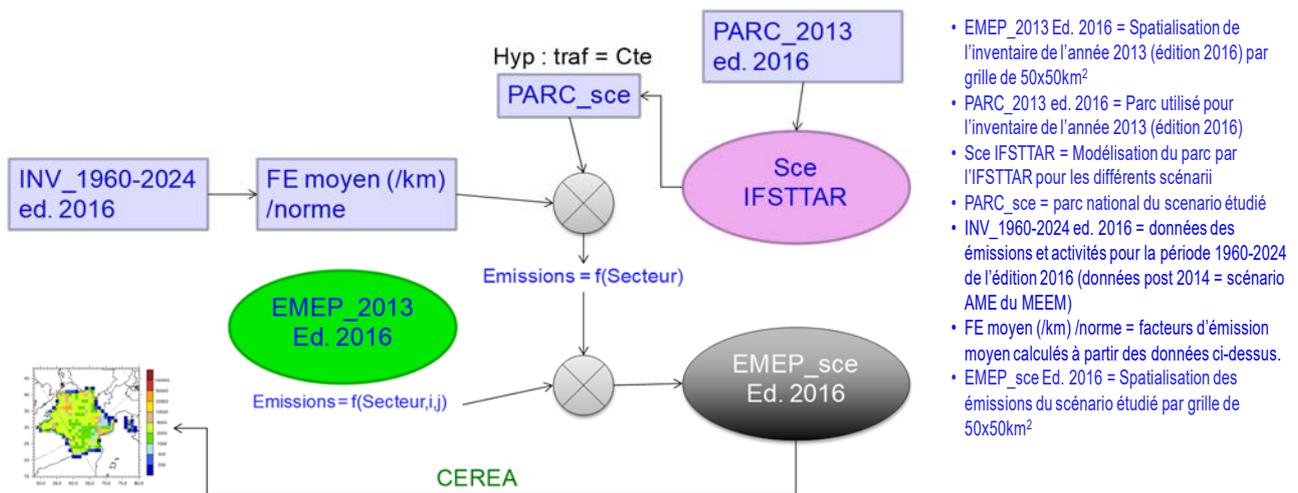


Figure 42 : Principe de spatialisation des émissions des différents scénarios sur la grille EMEP

La Figure 43 illustre la spatialisation des différences absolues et relatives des émissions de SO_x et de NH₃, des scénarios FAP (S1) et Essence (S2) entre eux et par rapport aux émissions de la situation de référence. Les autres polluants et leur évolution avec ces deux scénarios sont donnés en Annexe 12.

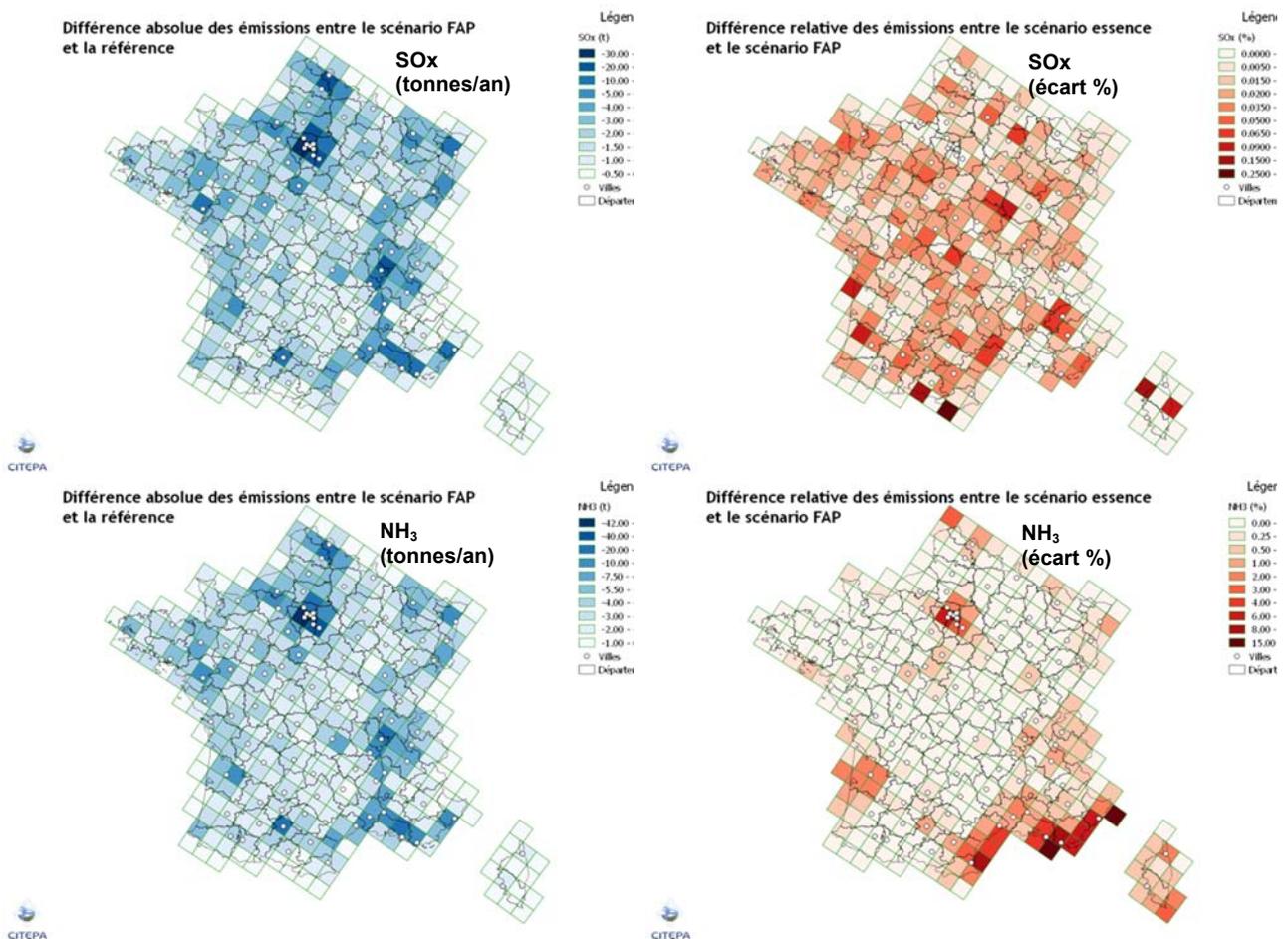


Figure 43 : Représentation cartographique des différences absolues (gauche) et relatives (droite) des émissions de polluants entre le scénario FAP (S1 - forte proportion de véhicules Diesel équipés de filtres à particules) et la situation de référence - Cas des SO_x et NH₃

Les émissions de SO_x varient peu entre les différents scénarios et les émissions de référence car le taux de soufre n'évolue pas. Les différences sont uniquement liées à l'amélioration des consommations unitaires des véhicules (proportionnalité de l'émission de SO_x et de la consommation, par le contenu du carburant en soufre). Les émissions de NH₃ varient peu lorsque leur niveau total est élevé en raison du faible poids des émissions du trafic (NH₃ est principalement lié à la gestion du fumier, donc en zones agricoles). Elles varient plus là où les émissions totales de référence sont faibles (plus forte importance des émissions du trafic).

4.6 Simulation des concentrations de polluants

Les simulations ont été réalisées avec Polyphemus, qui est une plate-forme de modélisation de la qualité de l'air et du transport atmosphérique incluant plusieurs modèles (gaussien, eulérien) et des outils d'assimilation de données et de modélisation inverse (Mallet et al. 2007). Le modèle de qualité de l'air eulérien Polair3D/Polyphemus fournit les champs de concentrations d'espèces gazeuses et particulaires sur un domaine discrétisé en mailles. Pour les particules, le modèle fournit leur distribution en taille et leur composition chimique par classe de tailles.

4.6.1 Présentation du modèle de qualité de l'air Polair3D/Polyphemus

Polyphemus a été fréquemment utilisé pour modéliser l'accumulation et le transport de pollution des échelles urbaine à continentale (Abdallah, Sartelet, and Afif 2016, Real and Sartelet 2011, Sartelet, Hayami, and Sportisse 2007b, Sartelet et al. 2012, Sartelet et al. 2007a, Zhang et al. 2013). Polyphemus a été utilisé pour modéliser la pollution atmosphérique sur l'Île-de-France, en comparaison avec des données d'observation, notamment dans le cadre de la campagne de mesures MEGAPOLI (Couvidat et al. 2013, Kim et al. 2013, 2015, Royer et al. 2011, Wang et al. 2014, Zhu et al. 2016b, Zhu et al. 2016a).

Les modèles de qualité de l'air comme Polyphemus sont composés d'une série de modules qui représentent les processus physiques et chimiques qui régissent les concentrations de polluants dans l'atmosphère. Cependant, de nombreux processus sont nécessairement simplifiés ou paramétrés, notamment à cause de la limitation des ressources informatiques. La dispersion correspond au transport par les vents et au mélange provoqué par la turbulence. Dans Polyphemus, les champs météorologiques sont obtenus par un modèle météorologique indépendant, tel que celui du centre européen ou le modèle WRF (*Weather Research Forecast*). Les effets des particules sur la météorologie sont négligés. Les processus chimiques prennent en compte la phase gazeuse, la phase aqueuse, la phase particulaire avec l'évolution dynamique de la distribution en taille des particules, ainsi que les interactions entre les différentes phases, comme les réactions hétérogènes de certaines espèces gazeuses à la surface des particules. Les processus de dépôt éliminent les polluants de l'atmosphère et les transfèrent vers d'autres milieux.

4.6.1.1 Modélisation des espèces gazeuses

Certains polluants sont primaires, i.e. ils sont directement émis, et d'autres sont secondaires, i.e. ils sont formés par réactions physico-chimiques dans l'atmosphère. Des polluants secondaires tels que l'ozone (O₃) et certains précurseurs de particules sont formés en phase gazeuse par la dégradation des composés anthropiques et biogéniques : oxydes d'azote (NO_x, somme des NO et NO₂) et composés organiques volatils (COV). Dans la couche limite, un oxydant clé est le radical hydroxyle (OH), en raison de sa concentration relativement élevée et parce qu'il réagit avec la plupart des espèces traces. La formation et la destruction d'O₃ ont beaucoup été étudiées, en raison de l'impact de l'O₃ sur la santé et de son lien avec la capacité d'oxydation de l'atmosphère (par exemple la photo-dissociation d'O₃ conduit à la production de radicaux OH). Elles dépendent de l'importance relative des NO_x et des COV. Un mécanisme chimique qui traite explicitement la formation d'oxydants nécessiterait plusieurs millions de réactifs et de produits et encore plus de réactions (Aumont, Szopa, and Madronich 2005). Les mécanismes chimiques sont donc simplifiés pour minimiser les temps de calculs. Des mécanismes à structures groupées (les composés organiques chimiques sont divisés en espèces « modèles » en fonction des types de liaisons carbone) ou à

espèces groupées (un composé organique particulier ou une espèce de substitution est utilisé pour représenter plusieurs composés organiques d'une même classe (par exemple alcanes, alcènes et aromatiques) sont souvent utilisés. Dans cette étude, un mécanisme à structures groupées (Carbon Bound 05(Yarwood 2005)) a été utilisé (Kim, Sartelet, and Seigneur 2011). Les constantes cinétiques de photolyse sont calculées avec le schéma de photolyse FASTJ (Wild, Zhu, and Prather 2000). Elles sont multipliées par un coefficient d'atténuation qui permet de paramétrer l'impact des nuages sur les taux de photolyse.

4.6.1.2 Modélisation des espèces semi-volatiles, en phases particulaire et aqueuse

Les particules sont formées d'un mélange complexe de poussières, de carbone suie (BC pour *Black Carbon*), de composés inorganiques (principalement sodium, sulfate, ammonium, nitrate, chlorure) et de composés organiques (OM pour *organic matter*). Leurs tailles varient de quelques nanomètres à plusieurs micromètres.

Selon une campagne de mesure de la composition chimique des particules réalisée par Airparif⁴⁵ sur une période d'un an (2009-2010) sur l'Île-de-France, les composés carbonés représentent 40 à 65 % de la masse totale des PM_{2,5} et les composés inorganiques de 25 à 45 %. Les composés organiques et inorganiques des particules sont en grande majorité secondaires.

Dans cette étude, la dynamique des aérosols est modélisée avec SCRAM (*Size-Composition Resolved Aerosol Model* ; Zhu, Sartelet, and Seigneur (2015)), qui prend en compte les processus de coagulation et de condensation/évaporation. Les particules sont discrétisées en sections avec 6 classes de taille de diamètres : [0,01 - 0,0398 µm], [0,0398 - 0,1585 µm], [0,1585 - 0,4 µm], [0,4 - 1,0 µm], [1,0 - 2,5 µm], [2,5 - 10 µm]. La modélisation de la condensation/évaporation utilise le modèle thermodynamique ISORROPIA (Nenes, Pandis, and Pilinis 1999) pour les composés inorganiques et H₂O (Hydrophilic/Hydrophobic Organic model ; Couvidat et al. (2012)) pour les composés organiques. Un équilibre thermodynamique est supposé entre les composés en phases gazeuse et particulaire. Au fur et à mesure que les particules croissent/rétrécissent par condensation/évaporation, les limites des sections en taille évoluent. Or, pour des raisons numériques, dans les simulations en trois dimensions, il est nécessaire de garder des sections de diamètres limites constants. Le schéma utilisé pour redistribuer le nombre et la masse des particules sur les sections après condensation/évaporation est l'algorithme du diamètre mobile (*Moving diameter*) : il permet de conserver le nombre et la masse des particules en permettant au diamètre moyen des sections d'évoluer. Pour les mailles dont la teneur en eau liquide dépasse une valeur critique (la valeur par défaut est de 0,05 g/m³), la maille est supposée contenir un nuage et la chimie en phase aqueuse se met en place : des gouttelettes de nuage se forment sur des particules activées (de diamètre supérieur à 0,7 µm (Strader et al. 1998). La chimie en phase aqueuse est résolue avec le modèle VSRM (*variable size-resolved model* ; Fahey and Pandis (2003)).

Les paramétrisations utilisées pour modéliser les vitesses de dépôt sec des gaz et des particules, le lessivage sous et dans les nuages sont détaillées dans (Sartelet et al. 2007a).

4.6.2 Paramètres et données d'entrée des simulations

Afin d'étudier l'évolution des concentrations de polluants sur l'Île-de-France et la France sous les différents scénarios, des simulations imbriquées (domaines Europe, France et Île-de-France) ont été réalisées (Figure 44). Les concentrations sur l'Europe ont été simulées pour l'année 2014 (entre le 1^{er} janvier et le 31 décembre). Ces concentrations ont servi de conditions initiales et limites aux simulations sur la France (du 4 janvier au 31 décembre), qui ont elles-mêmes servi de conditions initiales et de conditions aux limites aux simulations sur l'Île-de-France (entre le 8 janvier et le 31 décembre). Les simulations ont été réalisées avec 14 niveaux verticaux : [0 – 30 m], [30 – 60 m], [60 – 100 m], [100 – 150 m], [150 – 200 m], [200 – 300 m], [300 – 500 m], [500 – 750 m],

⁴⁵ «Origine des particules en Île-de-France», septembre 2011, <http://www.airparif.asso.fr/pdf/publications/rapport-particules-110914.pdf>

[750 m – 1 km], [1 – 1,5 km], [1,5 – 2,4 km], [2,4 – 3,5 km], [3,5 – 6 km], [6 – 12 km]. Le domaine Île-de-France couvre l'ensemble de la région parisienne (de 1,35°E à 3,55°E et de 48,00°N à 49,50°N) avec une résolution horizontale de 0,02° x 0,02°. Le domaine France s'étend de 5,0°E à 10,0°E et de 41°N à 52°N avec une résolution horizontale de 0,1° x 0,1°. Le domaine Europe s'étend de 14,75°E à 34,75°E et de 35,25°N à 69,75°N avec une résolution de 0,5° x 0,5°. Les conditions initiales et aux limites de la simulation sur l'Europe ont été obtenues à partir du modèle global MOZART-4 et les champs météorologiques du modèle NASA GMAO GEOS-5⁴⁶ (Emmons et al. 2010).

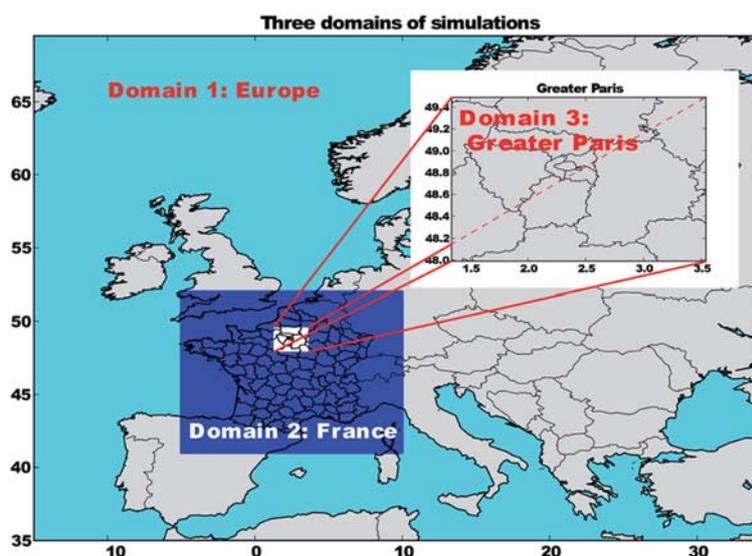


Figure 44 : Carte des trois domaines utilisés pour les simulations

Concernant les données de couverture de l'utilisation des sols, la base de données utilisée est « Global Land Cover 2000 » (GLC2000) (Commission Européenne, Joint Research Center, 2003⁴⁷), avec 23 catégories de types de sol.

Pour les simulations sur l'Europe et la France, les champs météorologiques des réanalyses du centre européen (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*, ECMWF), qui ont pour résolution spatiale 0,25° x 0,25°, sont interpolés sur les grilles de Polyphemus. Pour les simulations sur l'Île-de-France, la météorologie a été simulée avec le modèle WRF (*Weather Research and Forecasting*) version 3.6 (Skamarock et al. 2008) et la base de données d'occupation des sols Corine (Kim et al. 2013).

Les émissions de sels marins ont été estimées avec la paramétrisation de Jaeglé et al. (2011). Les émissions biogéniques ont été estimées avec le modèle MEGAN (*Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature*, Guenther et al. (2006)). Sur l'Europe, les émissions anthropiques pour les gaz et les particules ont été obtenues de l'inventaire d'émissions EMEP (Vestreng 2003), qui a pour résolution horizontale 50 km x 50 km. Pour la simulation France, ces émissions sont utilisées pour les pays autres que la France. Les émissions anthropiques sur la France sont celles du CITEPA (section 4.3.2 et Annexe 12), et les émissions du trafic varient selon les scénarios de composition du parc (compositions décrites en Annexe 10, facteurs d'émission en Annexe 11).

Les inventaires d'émissions fournissent les émissions de NO_x, COV (composés organiques volatils), CO, SO_x, NH₃, PM₁₀ et PM_{2,5}. Ces émissions sont ensuite spéciées en espèces modèles : NO, NO₂ et HONO pour les NO_x ; SO₂ et H₂SO₄ pour les SO_x ; les différentes classes de COV pour les COV

⁴⁶ <http://www.acom.ucar.edu/wrf-chem/mozart.shtml>

⁴⁷ <http://bioval.jrc.ec.europa.eu/products/glc2000/glc2000.php>

totaux émis ; composés organiques, BC et poussières pour les particules. Pour le trafic, cette spéciation est modifiée pour chacun des scénarios, afin de prendre en compte les spécificités du parc automobile de chacun des scénarios. Par exemple, les COV émis sont spéciés selon Theloke and Friedrich (2007), qui permet à la spéciation de dépendre de la motorisation (Diesel, essence). En effet, les véhicules essence émettent plus de composés aromatiques que les véhicules Diesel. Une partie de ces composés aromatiques forment notamment des aérosols organiques secondaires. La spéciation des NOx varie également selon les scénarios. Elle est calculée selon la répartition du parc automobile selon le guide EMEP (Ntziachristos et al. 2013). Le Tableau 10 montre les spéciations utilisées pour les NOx pour les différentes simulations pour le trafic. Ces spéciations varient peu, bien que la proportion de NO₂ dans le scénario Essence (S2) est légèrement plus faible à cause du recul des véhicules Diesel. Pour les particules, la spéciation est définie selon les types de véhicules, en utilisant les rapports EC/PM_{2,5} et OM/EC du guide EMEP (Ntziachristos et al. 2013).

Tableau 10 : Spéciations des NOx en % utilisées pour les différentes simulations

Spéciation des NOx	Référence	Scénario FAP(S1)	Scénario Essence (S2)
NO	73,2	74,1	75,0
NO ₂	26	25,1	24,1
HONO	0,8	0,8	0,8

Le Tableau 11 montre les spéciations utilisées pour les particules pour les différentes simulations pour le trafic. Bien que l'échappement n'émette que BC et OM, une partie des émissions sont spéciées en poussières, car les facteurs d'émissions utilisés pour les PM_{2,5} prennent partiellement en compte la re-suspension. Les émissions en nombre sont calculées à partir des émissions massiques des particules, de leurs compositions et du diamètre moyen de chaque section en taille. Pour ce calcul, les particules sont supposées sphériques.

Tableau 11 : Spéciations des particules en % utilisées pour les différentes simulations

Spéciation des particules	Référence	Scénario FAP(S1)	Scénario Essence (S2)
BC*	60,9	57,4	49,9
OM	19,9	14,6	17,9
Poussières	19,2	28,0	32,2

* Spéciation en carbone suie (BC) définie en utilisant les rapports EC/PM_{2,5}, le carbone élémentaire (EC) et le carbone suie (BC) étant supposés équivalents (voir note de bas en section 3.1.3.1).

Pour la simulation Île-de-France, les émissions sont celles des simulations France sur la partie du domaine qui est hors Île-de-France et celle d'Airparif (section 4.4) sur l'Île-de-France. Contrairement aux émissions sur la France, les émissions en nombre sont fournies par l'inventaire d'émissions sur l'Île-de-France. Les émissions hors trafic correspondent à celles de l'inventaire Airparif de l'année 2012. Cependant, la répartition mensuelle des émissions du secteur résidentiel est spécifique à l'année 2014. Les émissions trafic ont été obtenues à partir du parc routier de l'année 2014. Les émissions des grandes sources ponctuelles sont réparties verticalement selon leur secteur d'activité et les préconisations d'EMEP (la hauteur d'émission n'étant pas dans l'inventaire utilisé, la hauteur et la sur-hauteur des émissions de ces sources ne sont pas calculées).

La formation des aérosols organiques secondaires (AOS) dépend des émissions de polluants, et plus particulièrement des émissions de COV (composés organiques volatils), ainsi que des COSV (composés organiques semi-volatils).

Ces émissions diffèrent par leur importance et leur composition selon la motorisation (Diesel versus essence) et les technologies de dépollution (principalement la présence ou non d'un filtre à particules sur les véhicules Diesel). Les émissions de COV sont fournies dans les inventaires d'émission et la spéciation des COV qui dépendent notamment de la motorisation sont disponibles. Cependant, les émissions de COSV ne sont pas fournies dans les inventaires d'émission, mais elles participent de manière significative à la formation de particules organiques. Par conséquent, les émissions de

COSV doivent être estimées. Pour les différentes simulations, les émissions de COSV ont été obtenues en multipliant par 2,5 les émissions des composés organiques primaires (Kim et al. 2016, Zhu et al. 2016a). Cependant, comme la mesure des émissions des OM dépend de la température, l'utilisation d'un rapport COSV/NMHC est préconisé dans des publications récentes (Zhao et al. 2015, 2016), où NMHC représente les hydrocarbures non méthaniques. Une étude de sensibilité sera faite à ce sujet.

4.7 Expression des résultats, indicateurs

Compte tenu :

- de la complexité de la pollution atmosphérique et des nombreux phénomènes sous-jacents,
- de la difficulté à comparer des scénarios d'évolution quant à leur incidence réelle,
- et des fréquentes confusions entre émissions, concentrations, valeurs seuils réglementaires ou guides, expositions aiguës ou chroniques, etc.,

il est apparu indispensable de rationaliser l'expression des résultats et les indicateurs retenus pour répondre aux objectifs de cette saisine. Cette section récapitule quelques éléments en vue d'en justifier la formulation.

L'objectif des travaux est d'étudier l'évolution des émissions de particules du trafic et l'impact de différentes technologies. La réponse à cette question nécessite de considérer les concentrations particulières résultant des différentes sources de polluants particulaires et gazeux (impliqués dans la pollution particulaire) et leurs impacts selon leurs niveaux et l'exposition des populations.

L'approche retenue simule les émissions du trafic et dans certains cas les concentrations de polluants, sous différents scénarios de composition du parc automobile déclinant diverses technologies (motorisation, dépollution), sur différents territoires (la région Île-de-France, la France et différentes régions contrastées), et sur une période d'une année, notamment pour tenir compte de phénomènes liés aux conditions climatiques. Les simulations permettent par ailleurs d'estimer les valeurs horaires et journalières d'émissions et de concentrations.

La comparaison des scénarios revient donc à comparer sur les territoires étudiés d'une part les émissions du trafic, d'autre part les concentrations de polluants qui en résultent.

La problématique sous-jacente des impacts sanitaires a plusieurs implications en vue d'une comparaison pertinente des résultats et scénarios. Il faut ainsi :

- dépasser les comparaisons de « valeurs moyennes » ou intégrées à l'échelle des territoires, pour considérer plus spécifiquement les lieux où les populations résident ;
- ne pas considérer uniquement des niveaux moyens de concentrations, mais aussi leur variabilité temporelle et notamment les dépassements de seuils de qualité de l'air recommandés pour protéger la santé ;
- considérer différentes périodes au cours de l'année, plus ou moins propices au développement de pollutions en fonction des conditions météorologiques et des niveaux des émissions naturelles et anthropiques.

4.7.1 Polluants retenus

Pour les émissions, sont investiguées celles des particules (PM_{10} , $PM_{2,5}$ et particules en nombre PN), de leurs composés (carbone suie BC et matière organique OM), ainsi que celles des composés organiques volatils (COV) et des oxydes d'azote (NOx) qui régissent la formation des oxydants impliqués dans la formation d'aérosols secondaires organiques et inorganiques. La fraction de dioxyde d'azote (NO_2) dans les oxydes d'azote est également regardée, car elle influence la formation d' O_3 d'une part, et parce que NO_2 est aussi un précurseur de composés inorganiques des particules. Les émissions d'ammoniac (NH_3) sont également analysées car impliquées dans la formation d'aérosols secondaires inorganiques. Enfin, les émissions de dioxyde de carbone (CO_2) sont investiguées en raison de l'enjeu climatique.

Pour les concentrations, les particules (PM₁₀, PM_{2,5} et particules en nombre PN) et leurs composés (BC, PM₁₀ inorganiques, PM₁₀ organiques)⁴⁸ sont investigués ainsi que l'O₃ et le NO₂ qui sont des polluants réglementés avec des impacts documentés sur la santé publique, mais également des oxydants ayant un rôle dans la formation d'aérosols secondaires.

4.7.2 Écarts en émissions et en concentrations

Pour quantifier l'influence des scénarios prospectifs sur les niveaux des émissions des polluants, le différentiel a été calculé entre les valeurs d'émissions annuelles simulées avec chacun des scénarios prospectifs (horizon 2025) et celles simulées avec le scénario de référence (2014). Ce différentiel s'exprime en pourcentage de variation par rapport au scénario de référence. À titre indicatif, les valeurs absolues des émissions annuelles sont également présentées. Le différentiel a également été calculé entre scénarios prospectifs afin de quantifier l'influence relative d'un scénario par rapport à un autre, en particulier pour les scénarios FAP (ou S1, généralisation du filtre à particules), Essence (ou S2, promotion des motorisations essence des véhicules légers) et S1 – 2R élec (FAP + deux-roues électriques).

Le même principe de calcul différentiel est utilisé pour quantifier l'influence des scénarios sur les niveaux de concentrations atmosphériques des polluants à partir des valeurs de concentrations simulées et exprimées en moyenne annuelle. Des calculs ont également été réalisés à partir des concentrations moyennes mensuelles afin de rendre compte des disparités saisonnières, liées notamment aux caractéristiques météorologiques. Enfin, le 98^{ème} percentile des concentrations horaires simulées par le scénario de référence (P98 réf⁴⁹, Tableau 12) est retenu arbitrairement comme seuil statistique pour évaluer l'impact des scénarios prospectifs sur les plus fortes concentrations horaires.

Tableau 12 : Seuils P98 réf - 98^{ème} percentile des concentrations horaires simulées par le scénario de référence (en µg/m³ sauf pour le nombre de particules en nombre/cm³)

	Particules						NO ₂	O ₃
	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM ₁₀ Inorg	PM ₁₀ Org	BC	Nombre		
IdF	30	28	17	6	1	43316	36	126
France	36	35	20	9	1	8513	16	130

4.7.3 Niveaux de concentrations PM_{2,5} versus valeurs guides OMS

Des seuils pour quantifier l'influence des scénarios sur les niveaux de concentrations en PM_{2,5} ont également été utilisés et ont été définis comme suit dans la suite du rapport (Tableau 13) :

- **seuil long terme (VG-OMS_{LT})** établi à partir de la valeur guide annuelle de qualité de l'air ambiant de l'OMS pour les PM_{2,5}. Ce seuil est comparé à des concentrations exprimées en moyenne annuelle ;
- **seuil court terme (VG-OMS_{CT})** établi à partir de la valeur guide journalière de qualité de l'air ambiant de l'OMS pour les PM_{2,5}. Ce seuil est comparé à des concentrations exprimées en moyenne sur 24 heures.

Tableau 13 : Seuils VG-OMS_{LT} et VG-OMS_{CT} utilisés pour les concentrations PM_{2,5} (en µg/m³)

	Valeur	Source
Seuil long terme (VG-OMS_{LT})	10 (moy-1 an)	Valeur Guide OMS annuelle (OMS 2006)
Seuil court terme (VG-OMS_{CT})	25 (moy-24h à ne pas dépasser plus de 3 jours/an)	Valeur Guide OMS journalière (OMS 2006)

⁴⁸ Les concentrations simulées des composés correspondent techniquement à la fraction PM₁₀. En pratique, la quasi-totalité de ces composés est dans la fraction PM_{2,5} car celle-ci représente la quasi-totalité de la surface de condensation.

⁴⁹ Par définition de P98 réf, 2 % des concentrations horaires simulées sur le territoire (Île-de-France ou France) avec le scénario de référence ont une valeur supérieure à P98 réf.

Les résultats exprimés en proportion de mailles d'un territoire où la concentration atmosphérique en PM_{2,5} simulée est supérieure à la valeur guide de l'OMS ne correspondent pas aux résultats d'un calcul d'impact sanitaire de la pollution atmosphérique par les PM_{2,5} exprimés en nombre attendu de décès prématurés, de pathologies ou d'années de vie perdues. Pour estimer cet impact, des paramètres supplémentaires devraient être intégrés comme la relation exposition-risque (bien qu'elle soit indirectement intégrée dans l'élaboration de la valeur guide de l'OMS) et la mortalité (ou morbidité) de la population exposée. Les résultats permettent cependant de situer les niveaux de concentrations simulés par rapport au référentiel sanitaire que constituent les valeurs guides de qualité de l'air ambiant de l'OMS.

À noter *en aparté* que :

- les PM_{2,5} font partie des polluants pour lesquels l'OMS a engagé en 2016 une mise à jour de ses valeurs guides dont les résultats ne sont pas attendus avant 2020 ;
- des associations entre l'exposition aux concentrations de PM_{2,5} et la mortalité et morbidité respiratoires ont été mises en évidence à des niveaux inférieurs aux valeurs guides de l'OMS établies en 2005 (Anses 2017) ;
- la valeur limite en moyenne annuelle applicable au sein de l'Union européenne et en France de 25 µg/m³ (20 µg/m³ à partir du 1^{er} janvier 2020) est supérieure à la valeur guide OMS de 10 µg/m³ en moyenne annuelle, et sur une base journalière il n'existe aucune norme⁵⁰ de l'Union européenne ou française alors qu'il existe une valeur guide OMS. Il existe à l'étranger des normes plus proches des valeurs guides de l'OMS (Tableau 14).

Tableau 14 : Synthèse des normes de qualité de l'air ambiant en PM_{2,5} (adapté de Anses (2017))

Polluants	Normes UE/FR	Normes plus ambitieuses à l'étranger	Normes complémentaires à l'étranger
PM _{2,5}	UE/FR : VL de 25 µg/m ³ en moy. annuelle depuis 2015 UE/FR : IEM de 20 µg/m ³ depuis 2015 FR : IEM de 11,2 µg/m ³ en 2025 et de 10 µg/m ³ en 2030 FR : VC de 20 µg/m ³ en moy. annuelle FR : OQ de 10 µg/m ³ en moy. annuelle	Une dizaine de pays appliquent une norme plus basse en moyenne annuelle : les valeurs vont de 8 à 15 µg/m ³ .	Environ une trentaine de pays appliquent une norme en moyenne journalière : les valeurs vont de 25 à 350 µg/m ³ .

VL : valeur limite⁵¹ ; VC : valeur cible⁵² ; OQ : objectif de qualité⁵³ ; IEM : indicateur d'exposition moyenne⁵⁴

Aucun seuil n'a été retenu pour les PM₁₀ compte tenu de l'écart statistique observé entre les concentrations simulées et les concentrations mesurées (section 5.3.1), et ce malgré l'existence de valeurs guides de qualité de l'air ambiant. Aucun seuil n'a été retenu pour les autres indicateurs particuliers (PM₁₀ organiques, PM₁₀ inorganiques, PM₁₀ carbone suie, PN) compte tenu de l'absence de valeurs guides de qualité de l'air ou d'autres valeurs de référence pour ces indicateurs. Aucun seuil n'a été retenu pour NO₂ et O₃ compte tenu des écarts statistiques observés entre les

⁵⁰ Le terme « Normes de qualité de l'air ambiant » fait référence à la réglementation française notamment aux articles L221-1 et R.221-1 du code de l'environnement. Il englobe différents types de valeurs réglementaires qui sont appliquées pour différents polluants atmosphériques et pour différents pas de temps. Ces normes proviennent notamment de la transposition des directives européennes.

⁵¹ « Valeur limite » : un niveau de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère fixé sur la base des connaissances scientifiques à ne pas dépasser dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs de ces substances sur la santé humaine ou sur l'environnement dans son ensemble (*Article R 221-1 du code de l'environnement*)

⁵² « Valeur cible » : un niveau de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère fixé dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine ou sur l'environnement dans son ensemble, à atteindre, dans la mesure du possible, dans un délai donné (*Article R221-1 du code de l'environnement*).

⁵³ « Objectif de qualité » : un niveau de concentration de substances polluantes dans l'atmosphère à atteindre à long terme, sauf lorsque cela n'est pas réalisable par des mesures proportionnées, afin d'assurer une protection efficace de la santé humaine et de l'environnement dans son ensemble (*Article R221-1 du code de l'environnement*).

⁵⁴ « Indicateur d'exposition moyenne » : une concentration moyenne à laquelle est exposée la population et qui est calculée pour une année donnée à partir des mesures effectuées sur trois années civiles consécutives dans des lieux caractéristiques de la pollution de fond urbaine répartis sur l'ensemble du territoire (*Article R221-1 du code de l'environnement*).

concentrations simulées et les concentrations mesurées (section 5.3.1) ; ces indicateurs ne constituant par ailleurs pas l'objectif principal de l'étude ciblant les particules.

4.7.4 Résultats globaux et locaux, et variabilité temporelle

Les résultats à l'échelle de tout le territoire (Île-de-France ou France) peuvent masquer de fortes hétérogénéités spatiales et ne pas répondre à des enjeux fortement localisés (concentration des populations dans les agglomérations). Il est important en conséquence d'exprimer les comparaisons des scénarios à l'échelle du territoire mais aussi en analysant leur variabilité géographique et en considérant les zones à enjeu sanitaire.

De la même manière, les résultats agrégés sur une année ne rendent pas compte de la variabilité temporelle, notamment de périodes critiques conduisant à des pics de pollution, en raison de niveaux élevés d'émissions (combustion en hiver par exemple) et/ou de conditions météorologiques défavorables.

Il est donc proposé d'exprimer / comparer les résultats des différents scénarios comme suit :

- évaluation des quantités totales annuelles émises sur les territoires étudiés, pour chacun des polluants d'intérêt (particulaires, précurseurs ou impliqués dans les différentes pollutions), par le trafic et l'ensemble des autres secteurs, ainsi que des niveaux moyens de concentrations qui en résultent ;
- le trafic et ses émissions de polluants n'étant pas répartis de manière uniforme sur le territoire de l'Île-de-France, différents périmètres seront également considérés, en lien avec les populations qui les habitent (Paris, zones urbanisées intra-A86 ou petite couronne, reste du territoire de l'Île-de-France). Les résultats peuvent également être exprimés par zones-types, selon des classes de densité de population ;
- des représentations cartographiques présentent la distribution des concentrations simulées selon les scénarios (en pourcentage de variation ou en valeur absolue) sur les mailles du territoire (Île-de-France et France) pour une interprétation plus précise de la variabilité spatiale ;
- l'influence des scénarios sur différentes périodes « critiques » de l'année et plus généralement la variabilité temporelle des émissions et concentrations sera finalement recherchée.

4.7.5 Résultats en nombres de personnes exposées

Sur l'Île-de-France, la distribution des nombres de personnes selon les concentrations des divers polluants auxquels elles sont exposées, apporte un éclairage complémentaire de la comparaison des scénarios. Cette distribution rend compte en effet de la répartition géographique des concentrations et des populations. Des diminutions de concentrations même limitées dans les zones de faibles superficies mais à forte densité de population peuvent être plus appréciables que des gains plus élevés sur de grands territoires faiblement peuplés.

4.7.6 Intensité relative d'émission

Plusieurs scénarios ne sont simulés qu'en émissions de polluants et uniquement sur l'Île-de-France, en raison de la lourdeur des calculs de concentrations. Il serait en conséquence utile d'apprécier les résultats au travers d'indicateurs portant uniquement sur le trafic et ses émissions.

De manière similaire à l'approche DPSIR⁵⁵ (*Driving forces, Pressures, States, Impacts, Responses*) de l'évaluation environnementale, qui tente de traduire une relation causale locale entre émissions (la pression) et impacts, la « pression » du trafic sur l'environnement peut être considérée en

⁵⁵ Air pollution in Europe 1997, EEA, <https://www.eea.europa.eu/publications/92-9167-059-6-sum>

rapportant l'émission d'un polluant P_i à la superficie (émissions/m²). Une intensité d'émission est ainsi définie pour chacun des polluants considérés.

Cette intensité surfacique d'émission varie considérablement d'un polluant à l'autre et selon les lieux. En conséquence, il est proposé de considérer l'intensité surfacique d'émission à l'échelle de l'Île-de-France et pour le scénario de référence comme une « valeur de référence » pour la région. En rapportant l'intensité surfacique d'un territoire de l'Île-de-France à cette valeur de référence, l'intensité relative d'émission de ce territoire peut être estimée. L'évolution de l'intensité d'émission relative des territoires peut ensuite être estimée en exprimant l'intensité relative d'émission dans les différents scénarios par rapport à cette référence.

5 Scénarios technologiques prospectifs en Île-de-France

Ce chapitre analyse les simulations des émissions et concentrations de pollutions réalisées sur la région Île-de-France, en situation de référence (REF, année 2014) et pour les différents scénarios de renouvellement et d'évolution des compositions technologiques du parc automobile français. Les scénarios suivants ont été simulés en émissions et en concentrations de polluants :

- **situation de référence** (émissions en 2014 de polluants du parc automobile et des autres secteurs) ;
- **scénario FAP (S1)** avec une généralisation progressive de l'équipement des véhicules Diesel en filtres à particules à l'horizon 2025 et parallèlement avec l'évolution des catégories réglementaires Euro (autres secteurs et conditions inchangées) ;
- une variante du scénario FAP ou **S1 – 2R élec**, dans laquelle les deux-roues motorisés (principaux émetteurs de COV) sont considérés comme électriques (annulation de leurs émissions à l'échappement) ;
- **scénario Essence (ou S2)** avec une promotion marquée des motorisations essence des véhicules légers au même horizon et avec la même évolution réglementaire.

Les scénarios suivants ont été simulés en émissions seulement :

- **scénario Technologies Alternatives** avec une proportion importante de véhicules électriques en urbain seulement (sur le réseau routier urbain et Boulevard Périphérique) ; sur les autres réseaux (routiers et autoroutiers) circule le parc du scénario FAP (S1) ;
- **scénario Ambition Air** avec une réduction d'environ 20 % du trafic dans la zone fortement urbanisée intra-A86, où circule le parc du scénario Technologies Alternatives (forte proportion de véhicules électriques) ; en dehors de cette zone, le scénario Ambition Air rejoint le parc du scénario FAP (S1).

Ce chapitre compare d'abord les compositions de parc automobile et les émissions spécifiques (ou facteurs d'émission) du trafic selon les différents scénarios, qui sont les paramètres principaux de variation des simulations.

Il décrit ensuite les émissions totales du trafic, identifiant les principaux enjeux, puis leur évolution par les scénarios. Pour les scénarios de référence, FAP (S1), S1 – 2R élec et Essence (S2), l'évolution des émissions totales de l'ensemble des secteurs d'activité est analysée, ainsi que celle des concentrations de polluants qui en résultent. Un croisement spatial des populations avec les concentrations permet finalement de quantifier l'évolution de l'exposition.

5.1 Parcs et émissions spécifiques du trafic selon les scénarios

5.1.1 Composition du parc automobile en Île-de-France selon les scénarios

Le Tableau 15 décrit la composition moyenne représentative du parc en circulation en Île-de-France, obtenue en pondérant les différentes compositions (urbain, Boulevard Périphérique, rural, autoroutier) par les volumes de trafics auxquels elles s'appliquent. La part de chacune des catégories de véhicules dans le trafic total de l'Île-de-France est indiquée. Ainsi les véhicules légers (voitures et véhicules utilitaire légers) représentent une très forte proportion du trafic (86 %), suivis par les deux-roues motorisés (8 %, 10 % dans le scénario Ambition Air). Les camions ne représentent que 5 % et les autobus / autocars moins de 1 %.

Tableau 15 : Comparaisons des compositions moyennes du parc automobile en circulation en Île-de-France selon les différents scénarios

Véhicules	Sous-catégories	En %	En % pour les scénarios de composition du parc			
		Référence	FAP (S1)	Essence (S2)	Technologies Alternatives	Ambition Air
Véhicules légers (voitures et véhicules utilitaires légers VUL)	Diesel (dont hybrides)	73	73	43	58	68
	dont % avec FAP	42	80	83	78	79
	Essence (dont hybrides)	27	26	56	31	28
	dont % Pré-Euro 5 % Euro 5 et 6	61 39	21 79	9 91	19 81	20 80
	Électrique	0,4	0,4	0,6	10,9	3,7
	Autres	0,4	0,7	0,7	0,5	0,7
	% du trafic total dont Voitures VUL	86 71 15	86 71 15	86 71 15	86 71 15	86 71 15
Camions	Diesel	99	99	99	97	98
	Électrique	0,1	0,1	0,1	2,3	0,9
	% Euro 5 et 6	43	83	83	85	84
	% du trafic total	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3
Autobus / autocars	Diesel	99	99	99	99	99
	Électrique	-	-	-	15	6
	% Euro 5 et 6	49	90	90	97	92
	% du trafic total	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8
Deux-roues motorisés	essence	100	100	100	59	80
	Électrique	0,0	0,0	0,0	42	18
	% Euro 5 et 6	0,0	54	54	54	54
	% du trafic total	7,8	7,8	7,8	7,8	9,4
Réduction de trafic : -4 % à échelle Île-de-France, -15 % en intra-A86						X

Les cases colorées marquent les principales évolutions entre les différents scénarios.

Il convient de noter les points suivants :

- le scénario FAP (S1) double l'équipement des véhicules légers Diesel en filtres à particules et renouvelle tout le parc vers les réglementations Euro 5 et 6 (globalement de 40 à 80 % environ) ;
- le scénario Essence (S2) inverse l'équilibre Diesel - essence des véhicules légers de 73-27 % à 43-56 %. Cette importante mutation technologique nécessite un plus fort renouvellement du parc (augmentation des ventes de véhicules neufs ; au profit des essence), qui amplifie globalement l'évolution vers les réglementations Euro 5 et 6 (de 39 à 91 %) ; *a contrario*, le parc des véhicules légers Diesel se renouvelle moins et vieillit ;
- comparés au scénario Essence (S2), les scénarios qui promeuvent les véhicules électriques induisent un moindre renouvellement des véhicules conventionnels (Diesel et essence) et conduisent à des taux relatifs plus faibles de véhicules respectant les réglementations les plus récentes (Euro 5 - 6) ou de Diesel équipés de FAP ;
- le scénario Ambition Air ne s'applique qu'en Intra-A86 et se traduit globalement par une moindre pénétration (à l'échelle de l'Île-de-France) des véhicules électriques que le scénario Technologies Alternatives, qui lui s'appliquait au trafic sur tout le réseau urbain en général (y compris hors Paris et A86). Le scénario Ambition Air apparaît ainsi de moindre portée à l'échelle de l'Île-de-France. Par contre il est assorti d'une réduction de trafic en intra-A86, ce qui peut lui donner une efficacité « locale ».

5.1.2 Émissions spécifiques (par km) du trafic selon les scénarios

Les Tableau 16 (polluants gazeux) et Tableau 17 (polluants particulaires) récapitulent les facteurs d'émission moyens du trafic, pour l'ensemble des véhicules d'une part et pour les seuls véhicules légers (voitures et véhicules utilitaires légers) d'autre part. Ces derniers sont en effet les plus sensibles aux hypothèses des scénarios retenus.

Tableau 16 : Facteurs d'émission moyens du trafic, polluants gazeux, sur l'ensemble de l'Île-de-France selon les scénarios

Famille de Véhicules	Facteurs d'émissions de combustion et évaporation (COV)					NH ₃ en mg/km
	CO ₂ en g/km	Total_COV en mg/km	NOx en mg/km	NO ₂ en mg/km	Ratio NO ₂ / NOx	
Tous véhicules						
Référence	208	158	804	186	23,2 %	9,27
FAP (S1)	187	103	376	90	23,9 %	5,94
Essence (S2)	188	119	305	68	22,3 %	7,70
Technologies Alternatives	169	77	308	72	23,5 %	5,86
Ambition Air	182	99	356	83	23,4 %	5,82
Île-de-France						
Intra-A86	169	110	276	59	21,4 %	5,44
Véhicules légers (voitures + véhicules utilitaires légers)						
Référence	183	91	586	176	30,1 %	10,16
FAP (S1)	160	51	311	92	29,4 %	6,19
Essence (S2)	162	69	229	66	28,9 %	8,23
Technologies Alternatives	144	51	257	74	28,8 %	6,18
Ambition Air	155	51	294	86	29,2 %	6,18
Île-de-France						
Intra-A86	143	52	219	62	28,5 %	6,29

Tableau 17 : Facteurs d'émission moyens du trafic, polluants particulaires, sur l'ensemble de l'Île-de-France selon les scénarios

Famille de Véhicules	Facteurs d'émissions de combustion et abrasion (sauf Nb de particules)					
	PM ₁₀ ou PM en mg/km	PM _{2,5} en mg/km	PM _{1,0} - en m/km	BC - en mg/km	OM en mg/km	Nombre de particules/km
Tous véhicules						
Référence	66,3	53,7	40,4	20,05	16,93	2,91E+13
FAP (S1)	44,5	30,7	17,0	7,58	9,99	1,04E+13
Essence (S2)	39,6	25,8	12,1	5,20	8,50	6,59E+12
Technologies Alternatives	42,4	28,6	14,8	6,78	9,10	8,58E+12
Ambition Air	43,7	30,0	16,3	7,32	9,71	9,60E+12
Île-de-France						
Intra-A86	38,2	24,5	11,1	5,05	7,92	7,13E+12
Véhicules légers (voitures + véhicules utilitaires légers)						
Référence	62,4	51,5	39,8	19,05	16,30	2,77E+13
FAP (S1)	40,9	28,7	16,3	7,12	9,35	1,02E+13
Essence (S2)	35,3	23,0	10,7	4,37	7,62	5,81E+12
Technologies Alternatives	39,3	27,1	14,7	6,49	8,81	8,66E+12
Ambition Air	40,6	28,4	16,0	7,02	9,24	9,61E+12
Île-de-France						
Intra-A86	36,5	23,8	11,1	4,95	7,71	7,68E+12

Pour le scénario Ambition Air, les facteurs d'émission moyens sont également donnés sur le territoire intra-A86, car les hypothèses de réduction de trafic et de promotion de véhicules électriques s'appliquent principalement sur ce territoire. Ces indicateurs constituent les principales clés d'interprétation des résultats puisque seules les émissions du trafic varient entre les scénarios.

Il est noté en particulier :

- les fortes réductions des facteurs d'émissions de tous les scénarios, comparés à la situation de référence (réduction de 10 à 20 % pour CO₂, 30 à 40 % pour NH₃, PM₁₀, PM_{2,5}, facteur 2 à 3 pour COV, NOx, NO₂, PM_{1,0}, OM, voire 3 à 4 pour BC et Nombre de particules) ;
- entre les scénarios prospectifs, les facteurs d'émissions de polluants particulaires les plus bas sont obtenus avec le scénario Essence (S2) et le scénario Ambition Air en intra-A86 ;
- concernant NOx, NO₂ et NH₃, c'est le scénario Ambition Air qui permet les meilleurs résultats en intra-A86 ;

- le scénario Essence (S2) présente l'inconvénient de facteurs d'émission de COV et NH₃ plus élevés que les autres scénarios (mais cependant inférieurs à la situation de référence) ;
- les écarts entre les scénarios ne sont pas uniquement dus aux options technologiques elles-mêmes, mais aussi au renouvellement plus ou moins rapide du parc selon ces options. Ainsi, le scénario Essence (S2) accélère le renouvellement du parc et augmente globalement le nombre de véhicules récents respectant les réglementations de pollution les plus strictes, contribuant à diminuer certains facteurs d'émission.

5.2 Émissions de polluants

5.2.1 Scénario de référence : diagnostic et enjeux

Le scénario de référence correspond à la composition en 2014 du parc en circulation en Île-de-France, sans aucune modification. Son analyse permet d'identifier les catégories de véhicules qui émettent beaucoup, les zones les plus impactées, etc. Il permet donc une lecture « diagnostique » ou enjeux, tandis que l'analyse des autres scénarios sera une analyse comparative (gains / effets, etc.).

5.2.1.1 Contributions du trafic aux émissions totales de polluants en Île-de-France

Le trafic peut constituer un levier d'amélioration de la qualité de l'air, en particulier lorsque ses émissions sont prépondérantes par rapport à celles des autres secteurs. Les Tableau 18 et Tableau 19 récapitulent les émissions totales annuelles sur l'Île-de-France, pour l'ensemble des secteurs, ainsi que la contribution du trafic routier à ces émissions, à l'échelle de l'Île-de-France et sur le périmètre très urbanisé intra-A86.

Tableau 18 : Émissions annuelles de polluants gazeux en Île-de-France et contribution du trafic

Scénario de référence	NOx	NO ₂	NH ₃	COV	COSV
Émissions annuelles totales tous secteurs (en tonnes)	78490	13682	5713	82253	6362
Émissions du trafic routier (t)	45216	10622	508	8631	2357
En % tous secteurs- Île-de-France	57,6	77,6	8,9	10,5	37,0
En % tous secteurs en intra-A86	52,1	73,7	93,8	14,4	

Tableau 19 : Émissions annuelles de polluants particulaires en Île-de-France et contribution du trafic

Scénario de référence	PM ₁₀	PM _{2,5}	OM	BC
Émissions annuelles totales tous secteurs (en tonnes)	19038	12200	2545	2037
Émissions du trafic routier (t)	3769	2993	943	1096
En % tous secteurs- Île-de-France	19,8	24,5	37,0	53,8
En % tous secteurs en intra-A86	21,0	23,1	43,1	58,3

Globalement, le trafic routier contribue très significativement aux émissions d'oxydes d'azote (58 % et 78 % des NOx et NO₂ de l'Île-de-France), ainsi qu'au BC (54 %). La contribution aux polluants particulaires PM₁₀ et PM_{2,5} est plus limitée (20-25 %).

Le trafic représente de l'ordre de 11 à 13 %⁵⁶ de l'émission des COV tous secteurs (14 % sur le périmètre intra-A86), mais contribue plus significativement aux semi-volatils COSV (37 %).

La contribution à l'émission de NH₃ est faible à l'échelle de l'Île-de-France (dominée par les émissions de l'agriculture), mais elle est prépondérante sur l'intra-A86.

⁵⁶ Selon la prise en compte ou non des évaporations de parking (évaluées à 20 % de l'émission totale de COV du trafic).

Ainsi, dans la situation de référence (année 2014), la réduction des émissions du trafic peut permettre d'améliorer significativement la qualité de l'air pour les pollutions liées aux oxydes d'azote, particules organiques et BC, COSV, et plus marginalement pour le PM₁₀ et PM_{2,5}, ou encore COV. La réduction des émissions de NH₃ du trafic est par contre déterminante dans les territoires urbanisés.

5.2.1.2 Émissions de polluants primaires du trafic

Les Tableau 20 (polluants gazeux) et Tableau 21 (polluants particulaires) donnent le bilan annuel du trafic et de ses émissions sur l'Île-de-France dans le scénario de référence. Près de 55 milliards de kilomètres sont parcourus annuellement sur le réseau, produisant 11 millions de tonnes de CO₂, 44 000 tonnes de NO_x, 2 200 tonnes de particules ultrafines PM_{1,0} et au total 4 450 tonnes de particules en suspension (toutes tailles), dont 1 090 tonnes de carbone suie et 923 tonnes de matière organique.

Tableau 20 : Bilan annuel et répartition des trafics et émissions - polluants gazeux

Famille de Véhicules	Trafic - VehxKkm (10 ⁶)	Émissions de combustion et évaporation				
		CO ₂ - en tonnes	Total_COV- en tonnes	NO _x - en tonnes	NO ₂ - en tonnes	NH ₃ - en tonnes
a-Véh. Particuliers	70,8 %	57,6 %	43,8 %	45,9 %	55,2 %	91,6 %
b-Véh. Util. Légers	15,5 %	18,6 %	5,5 %	17,1 %	26,6 %	3,0 %
c-deux-roues	7,8 %	3,6 %	45,2 %	1,3 %	0,2 %	1,7 %
d-Camions	5,3 %	15,0 %	3,5 %	24,2 %	12,1 %	3,5 %
e-Autobus	0,7 %	5,2 %	1,9 %	11,6 %	6,0 %	0,2 %
Total	5,46 x 10⁴	1,13 x 10⁷	8,64 x 10³	4,39 x 10⁴	1,02 x 10⁴	5,06 x 10²

Tableau 21 : Bilan annuel et répartition des trafics et émissions - polluants particulaires

Famille de Véhicules	Combustion et abrasion (sauf Nb de particules, combustion seulement)						Combustion Nombre de particules
	PM _{1,0} - en tonnes	PM _{2,5} - en tonnes	PM ₁₀ ou PM en tonnes	TSP en tonnes	BC en tonnes	OM en tonnes	
a-Véh. Particuliers	37,8 %	42,8 %	45,3 %	48,1 %	46,3 %	38,2 %	41,8 %
b-Véh. Util. Légers	47,1 %	40,0 %	35,9 %	32,2 %	35,7 %	44,9 %	40,4 %
c-2-Roues	3,3 %	3,3 %	3,3 %	3,2 %	1,5 %	6,7 %	1,2 %
d-Camions	8,4 %	10,7 %	12,3 %	13,4 %	11,7 %	7,9 %	12,0 %
e-Autobus	3,4 %	3,2 %	3,1 %	3,0 %	4,7 %	2,3 %	4,6 %
Total	2,21 x 10³	2,93 x 10³	3,62 x 10³	4,45 x 10³	1,09 x 10³	9,23 x 10²	1,59 x 10²⁴

Contributions selon les catégories de véhicules :

Les véhicules particuliers représentent 71 % du trafic et contribuent aux émissions à hauteur de 58 % pour les gaz à effet de serre (CO₂), 44 % des COV non méthaniques, 46 % des oxydes d'azote (55 % du NO₂) et 92 % du NH₃. Leur contribution aux émissions particulaires se situe entre 38 % (PM_{1,0}, OM) et 48 % (particules totales, EC).

Les véhicules utilitaires légers (camionnettes, fourgons de moins de 3,5 tonnes) représentent 16 % du trafic et émettent 19 % du CO₂, 17 % des NO_x (27 % du NO₂). Ils contribuent beaucoup plus fortement aux émissions particulaires (47 % des PM_{1,0}, 32-35 % de l'ensemble des particules).

Les deux-roues motorisés représentent environ 8 % du trafic, mais contribuent de manière très significative aux émissions de COV (45 % du total). Leur contribution aux autres polluants est assez limitée (0 à 4 %), de l'ordre de 3 % des émissions particulaires et 7 % de la matière organique particulaire.

Les véhicules lourds (camions, autobus et autocars) ne représentent que 6 % du trafic, mais contribuent plus significativement aux émissions de CO₂ (20 %), NO_x (36 %), NO₂ (18 %) et entre 12 et 16 % des émissions particulaires.

Contributions selon les technologies et réglementations :

Dans le scénario de référence, 69 % du trafic est effectué par des véhicules Diesel (légers et lourds), 31 % par des véhicules essence. Le trafic Diesel contribue à 75 % des émissions de CO₂, 92 % des NO_x, 96 à 98 % des émissions de particules (Tableau 22). Le trafic essence (25 % du CO₂ émis) émet principalement les COV-NM et le NH₃ (86 et 87 %) et contribue très marginalement aux émissions particulaires (2 à 4 %) et NO_x (8 %).

Concernant les réglementations en émissions, le trafic de référence est effectué à 68 % par des véhicules Euro 4 et antérieurs. Ceux-ci contribuent à hauteur de 69 à 96 % des émissions des différents polluants. Les technologies Euro 5 et 6 (V et VI pour les véhicules lourds) représentent 31 % du trafic total et contribuent beaucoup plus faiblement aux émissions (8 % des COV, 16 % des NH₃, 4 à 6 % des polluants particulaires), sauf pour les NO_x (29 % des émissions totales).

Parmi les voitures et véhicules utilitaires légers Diesel, ceux équipés de filtre à particules couvrent 28 % des distances parcourues, mais ils ne contribuent qu'à hauteur de 1 à 2 % des émissions particulaires et de 5 % des émissions de NH₃. Ils sont cependant responsables de 30 % des émissions de NO_x.

Tableau 22 : Contribution des technologies et réglementations aux émissions du trafic en Île-de-France

Scénario de référence	Trafic	CO ₂	COV-NM	NO _x	NH ₃	PM _{2,5}	BC	Nb part.
Tous véhicules (véhicules légers, lourds et deux-roues)								
Diesel	69 %	75 %	14 %	92 %	13 %	96 %	98 %	98 %
essence	31 %	25 %	86 %	8 %	87 %	4 %	2 %	2 %
Autres énergies	1 %	1 %	0 %	1 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Sur les émissions Diesel seulement, véhicules légers (VP + VUL)								
Pre et Euro 4 (IV)	68 %	69 %	92 %	71 %	84 %	96 %	96 %	94 %
Euro 5 et 6 (V et VI)	31 %	31 %	8 %	29 %	16 %	4 %	4 %	6 %
Non classés	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Sur les émissions Diesel seulement, véhicules légers (VP + VUL)								
Contribution des Sans FAP	72 %	78 %	100 %	70 %	95 %	98 %	99 %	99 %
Contribution des Avec FAP	28 %	22 %	0 %	30 %	5 %	2 %	1 %	1 %

Démarrage à froid :

Les émissions de démarrage à froid des véhicules représentent une part significative des émissions totales pour les véhicules légers, en raison de la sensibilité des véhicules essence à ce phénomène (catalyseur non opérationnel en début de trajet froid).

La part du kilométrage effectuée avec un moteur froid (en transition vers le fonctionnement normal moteur chaud) s'élève à 39 % du kilométrage total. Cette proportion peut sembler élevée, mais elle résulte des hypothèses intrinsèques prises pour les calculs d'émissions en Île-de-France.

Pour les seuls véhicules particuliers, comptant une proportion importante de véhicules essence, les surémissions induites par ce fonctionnement moteur froid atteignent 66 % de l'émission totale de CO, 58 % des COV (hors évaporation), 26 % des quantités totales de particules émises (Tableau 23). Ces taux sont moindres pour les véhicules utilitaires légers (32 % des COV, 24 % des particules). Lorsqu'on rapporte ces surémissions aux émissions de l'ensemble des catégories de véhicules, la contribution du démarrage à froid tombe à 39 % des émissions totales de CO, 22 % des COV, 21 % des particules, ce qui demeure conséquent.

Tableau 23 : Émissions de démarrage à froid

Famille de Véhicules	Poids des émissions à froid sur les émissions totales de combustion						CO	Particules
	CO ₂	COV	NO _x	NO ₂	NH ₃			
a-Véh. Particuliers	10,4 %	58,1 %	8,5 %	6,1 %	22,1 %	65,5 %	26 %	
b-Véh. Util. Légers	8,1 %	32,1 %	5,4 %	5,2 %	27,1 %	24,3 %	24 %	
Tous véhicules	7,5 %	21,9 %	4,8 %	4,8 %	-	38,9 %	21 %	

Évaporation de carburant :

Les émissions de COV par évaporation de carburant sont principalement liées aux véhicules légers essence (voitures, VUL, deux-roues). Elles représentent 19 % des émissions totales de COV et de l'ordre de 40 % si les émissions de stationnement sont incluses.

La Figure 45 montre que, tant au niveau des seules voitures particulières qu'au niveau du bilan global, les émissions de COV lors du démarrage à froid et par évaporation de carburant (hors stationnement) représentent une part significative des émissions totales (74 % et 37 % respectivement). Cette contribution peut diminuer avec le renouvellement du parc (véhicules mieux équipés en dispositifs de piégeage des évaporations).

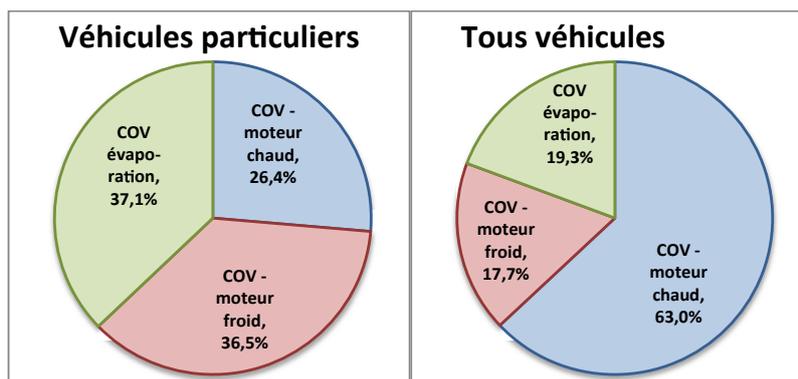


Figure 45 : Répartition des émissions de COV selon les émissions à chaud, à froid et par évaporation (hors stationnement) pour les seuls véhicules particuliers et dans le bilan global tous véhicules

Abrasion :

L'abrasion se répartit différemment selon qu'il s'agit des véhicules légers ou lourds, et surtout selon les catégories de tailles des particules (Tableau 24). Globalement, les particules $PM_{1,0}$ proviennent à 95 % de la combustion, de même que la fraction carbone suie (92 %). Les freins et pneumatiques contribuent à la fraction carbone suie à hauteur de 1 % et 7 %. Les $PM_{2,5}$ proviennent à 72 % de la combustion et à 28 % de l'abrasion, celle-ci étant plus élevée pour les véhicules lourds (41 %). Concernant les PM_{10} et la masse totale de particules en suspension TSP, une répartition plus équilibrée est obtenue (43 à 61 % des PM_{10} et 33 à 50 % des TSP provenant de la combustion). Les contributions relatives de la route, des pneumatiques et des freins aux émissions par abrasion de $PM_{2,5}$, PM_{10} et TSP sont assez équilibrées.

Tableau 24 : Répartition des émissions de particules selon les phénomènes

Familles de véhicules		En % de l'émission totale (combustion et abrasion)				BC	OM
		PM _{1,0}	PM _{2,5}	PM ₁₀ ou PM	TSP		
Véhicules légers	Combustion	95,7	73,9	60,8	50,0	91,6	76,1
	Abrasion	4,3	26,1	39,2	50,0	8,4	23,9
	Dont						
	Freins	2,1	6,4	13,2	11,1	1,2	5,2
	Pneus	2,2	11,9	14,0	19,3	7,2	18,7
	Route		7,8	12,0	19,7		
Véhicules lourds	Combustion	92,5	59,4	43,3	33,0	92,2	58,7
	Abrasion	7,5	40,6	56,7	67,0	7,8	41,3
	Dont						
	Freins	4,8	12,0	21,9	17,0	1,8	13,9
	Pneus	2,7	12,3	12,8	16,3	6,1	27,4
	Route		16,3	22,0	33,6		
Tous véhicules	Combustion	95,3	71,8	58,1	47,2	91,7	74,4
	Abrasion	4,7	28,2	41,9	52,8	8,3	25,6
	Dont						
	Freins	2,4	7,1	14,5	12,0	1,3	6,1
	Pneus	2,3	12,0	13,9	18,8	7,0	19,5
	Route		9,0	13,5	22,0		

5.2.1.3 Répartition géographique et « intensité » des émissions de polluants

Dans le scénario de référence, Paris – qui représente environ 1 % de la superficie de l'Île-de-France et 20 % de la population – enregistre environ 12 % du trafic total de la région et entre 9 % (PM_{2,5}) et 18 % (COV) des émissions totales du trafic sur l'ensemble de la région (Tableau 25 et cf. résultats complets en Annexe 6 et Annexe 7). La couronne intra-A86 autour de Paris (2 % de la superficie, 21 % de la population) enregistre environ 15 % du trafic et 14 à 16 % de ses émissions.

La petite couronne (PC) hors intra-A86 représente 3 % de la superficie de l'Île-de-France, 16 % de la population et 13 à 14 % du trafic et de ses émissions. Le reste de l'Île-de-France (93 % de la superficie, 43 % de la population) comptabilise 60 % du trafic et 54 à 65 % des émissions.

En termes d'intensité relative d'émission par unité de surface (valeur 1 pour l'ensemble de l'Île-de-France), Paris est soumis à une intensité d'émission variant entre 10 et 20 selon les polluants, l'intra-A86 subit une pression de l'ordre de 6 à 7, la petite couronne de l'ordre de 4 et le reste de l'Île-de-France bénéficie d'une pression beaucoup plus faible de l'ordre de 0,6. Un rapport d'environ 30 entre Paris et le territoire hors-PC de l'Île-de-France est observé.

Tableau 25 : Répartition géographique des trafics et émissions annuels

Référence	% superficie	% population	En % Trafic – Veh x km	En % des émissions totales COV	NOx	PM _{2,5}	Nb. Part.	Intensité relative d'émission / m ²
Paris	0,9	20	12	18	11	9	12	10 à 20
A86 (Paris exclus)	2,3	21	15	15	15	14	16	6 à 7
PC (hors A86 et Paris)	3,2	16	13	14	13	13	13	4
hors PC et NC	92,5	43	60	54	61	65	59	0,6
En fonction de la densité de population								
< 7 500 hab/km ²	97	52	76	68	76	80	75	0,7 à 0,8
7 500-15 000	2	22	13	15	13	11	13	5 à 7
> 15 000	1	26	11	16	11	9	11	9 à 16
Total Île-de-France								1,0

Lorsque le territoire est analysé en fonction des densités de populations, les zones les plus denses (> 15 000 hab/km²) représentent environ 11 % du trafic et 9 % à 16 % des émissions de polluants. Sur ces zones de forte densité, l'intensité relative des émissions est de l'ordre de 9 à 16 (soit 9 à 16 fois plus élevée que la moyenne de l'Île-de-France). Elle est de 5 à 7 pour les zones de densité comprise entre 7 500 et 15 000 hab/km².

5.2.2 Évolution des émissions totales du trafic selon les scénarios

5.2.2.1 Évolution des émissions du trafic sur l'Île-de-France

Le Tableau 26 donne l'évolution des émissions totales annuelles de polluants gazeux et du trafic à l'échelle de l'Île-de-France au travers des différents scénarios simulés, par rapport au scénario de référence.

Tableau 26 : Trafics et émissions annuelles selon les scénarios - Île-de-France - polluants gazeux

Scénarios	Variation (%) du Trafic - Vehxkm	Variations (%) des émissions de combustion et évaporation (y compris stationnement)				
		CO ₂	COV-NM	NO _x	NO ₂ -	NH ₃
Référence (année 2014)						
FAP (S1) - Forte proportion de FAP	0,0	-10	-30	-53	-52	-36
Essence (S2) - Recul des véh. légers Diesel	0,0	-9	-12	-62	-63	-17
Techn Altern - promotion véhicules électriques	0,0	-19	-42	-62	-61	-37
Ambition Air	-3,9	-17	-39	-58	-57	-40

Les émissions de COV résumés dans ce tableau prennent en compte les émissions dues à la combustion et à l'évaporation (calcul global au niveau régional pour l'évaporation des véhicules en stationnement).

Seul le dernier scénario (Ambition Air) se traduit par une décroissance moyenne du trafic à hauteur de 3,9 % sur l'Île-de-France, cette décroissance étant de fait réalisée uniquement sur le territoire intra-A86.

Le Tableau 27 donne de la même manière l'évolution des émissions de polluants particulaires.

Tableau 27 : Émissions annuelles selon les scénarios - Île-de-France - polluants particulaires

Scénarios	Variations (%) des émissions (Combustion et abrasion, sauf Nb de particules, combustion seulement)						Combustion Nombre de particules
	PM _{1,0}	PM _{2,5}	PM ₁₀ ou PM	TSP	BC	OM	
Référence (année 2014)							
FAP (S1) - Forte proportion de FAP	-58	-43	-33	-27	-62	-41	-64
Essence (S2) - Recul des véh. légers Diesel	-70	-52	-40	-33	-74	-50	-77
Techn Altern - promotion véhicules électriques	-63	-47	-36	-29	-66	-46	-70
Ambition Air	-61	-47	-37	-31	-65	-45	-68

Le scénario FAP (S1), de progression quasi au fil de l'eau de l'équipement des véhicules légers Diesel en filtres à particules, se traduit par des diminutions très nettes des émissions de particules, de l'ordre de 60 % pour les particules liées à la combustion (PM_{1,0}, BC, Nombre de particules), tandis que les réductions sont plus modérées (30 à 40 %) pour les particules plus grosses qui incluent une contribution plus importante de l'usure et de l'abrasion (qui n'évoluent pas dans les scénarios). Dans le même temps, en raison de l'évolution réglementaire et du renouvellement des véhicules (toutes catégories, toutes technologies essence et Diesel), les émissions de polluants gazeux régressent également dans ce scénario (comme pour les autres scénarios d'ailleurs). Les émissions totales du trafic routier en Île-de-France décroissent ainsi de 10 % pour le CO₂, de 30 % pour les COV, de 50 % pour les oxydes d'azote et de 36 % pour NH₃.

Le scénario Essence (ou S2, recul des motorisations Diesel des véhicules légers au profit de véhicules essence) se traduit par des évolutions assez comparables, avec des réductions

accentuées des NOx (-60 %) et particules liées à la combustion (-70 à 77 %). Par contre, ce scénario est marqué par une moindre diminution des COV (-12 %) et des NH₃ (-17 %).

Ce scénario Essence (S2) est donc plus favorable à la réduction des émissions de particules et de NOx que le scénario FAP (S1), mais l'est moins pour les COV et NH₃, qui sont des précurseurs potentiels d'aérosols secondaires.

Le scénario Technologies Alternatives (promotion des véhicules électriques en urbain et maintien d'un scénario FAP (S1) ailleurs) se traduit par un net avantage en CO₂ (-19 % au lieu de -10 % dans les scénarios précédents). Les réductions de NOx sont également très fortes (-60 %), de même que NH₃ (-37 %). Les réductions d'émission de particules à l'échelle de l'Île-de-France sont un peu plus élevées que celles du scénario FAP (S1), mais inférieures à celles du scénario Essence (S2).

Le scénario Ambition Air (combinant la promotion des véhicules électriques et une réduction du trafic en intra-A86 uniquement, et préservant ailleurs le scénario FAP (S1)) est globalement un peu plus efficace que le scénario FAP (S1) pour tous les polluants gazeux et particulaires, mais n'offre pas d'avantage significatif sur les scénarios Essence (S2) et Technologies Alternatives.

Des tests statistiques (test des signes et test de Wilcoxon-signé) ont été appliqués aux données d'émissions annuelles du trafic, par mailles de 1 km² mais pour les seules mailles où il y a du trafic, pour les polluants NOx, NO₂, PM₁₀, PM_{2,5}, PM_{1,0}, BC et OM, en comparant les émissions de tous les scénarios deux à deux (séries appariées). Ces tests montrent que les écarts d'émissions entre les scénarios sont tous significatifs pour un intervalle de confiance de 95 %. Ceci signifie que même lorsque ces écarts sont faibles (i.e. faibles différences d'émissions), ils sont constatés et cohérents sur la grande majorité des mailles du territoire. Ces tests étant appliqués à des résultats de simulation, ils ne traduisent cependant rien concernant les incertitudes des simulations et des données d'entrée. La Figure 46 résume l'évolution des émissions totales annuelles des principaux polluants gazeux et particulaires du trafic à l'échelle de l'Île-de-France au travers des différents scénarios simulés, par rapport au scénario de référence (année 2014).

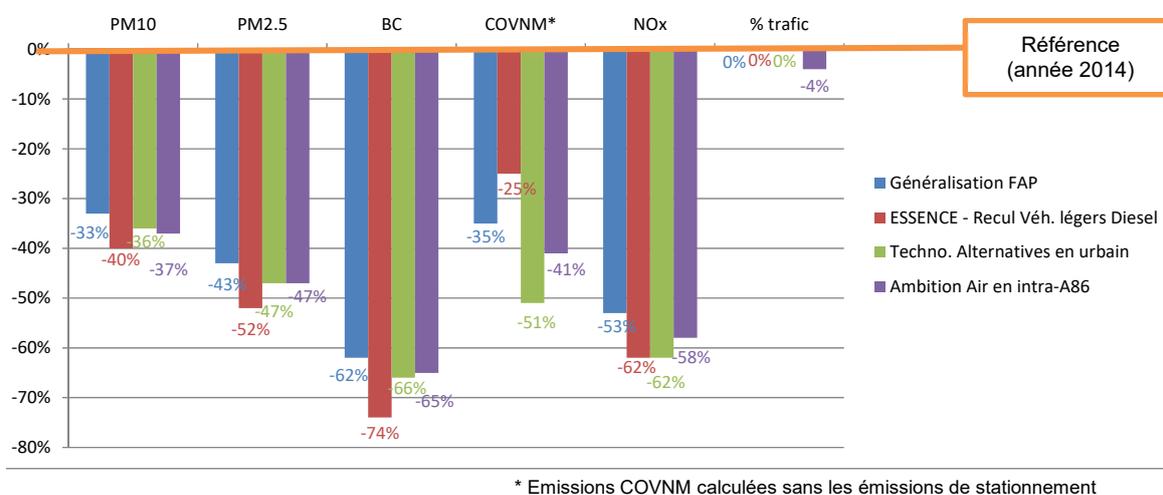


Figure 46 : Émissions annuelles du trafic (t/an) de PM₁₀, PM_{2,5}, BC, COVNM, NOx et trafic (véhicules x kilomètres) : différences relatives (en %) entre les scénarios prospectifs et le scénario de référence (axe horizontal), Île-de-France

5.2.2.2 Évolution des émissions en intra-A86

Concernant le périmètre intra-A86, les réductions d'émissions sont :

- quasiment inchangées pour les scénarios FAP (S1) et Essence (S2) (les émissions de ces scénarios sont donc quasiment proportionnelles aux volumes de trafic de l'Île-de-France et de l'intra-A86) ;
- un peu plus marquées pour le scénario Technologies Alternatives ;

- nettement accrues pour le scénario Ambition Air avec une réduction de -71 % de l'émission de NOx en intra-A86 au lieu de -58 % sur l'Île-de-France, de -51 % pour NH₃, et de -73 à -80 % des particules de combustion contre -61 à -68 % sur toute la région.

Ce dernier scénario qui inclut une dimension spatiale (restriction sur un périmètre donné) présente donc un avantage certain sur le territoire le plus urbanisé intra-A86, qui concerne également une proportion importante de la population.

Le Tableau 28 et le Tableau 29 donnent l'évolution des émissions totales annuelles de polluants gazeux et particulaires et du trafic en intra-A86.

Tableau 28 : Trafics et émissions annuelles selon les scénarios - intra-A86 - polluants gazeux

Périmètre : intra-A86 Scénarios	Variations (%)	Variations (%) des émissions de combustion et évaporation				
	Trafic – Veh x km	CO ₂	COV-NM*	NOx	NO ₂ -	NH ₃
FAP (S1) - Forte proportion de FAP	0,0	-10	-35	-53	-52	-37
Essence (S2) - Recul des véh. légers Diesel	0,0	-8	-28	-63	-65	-15
Techn Altern - promotion véhicules électriques	0,0	-22	-56	-66	-66	-37
Ambition Air	-14,5	-34	-47	-71	-73	-51

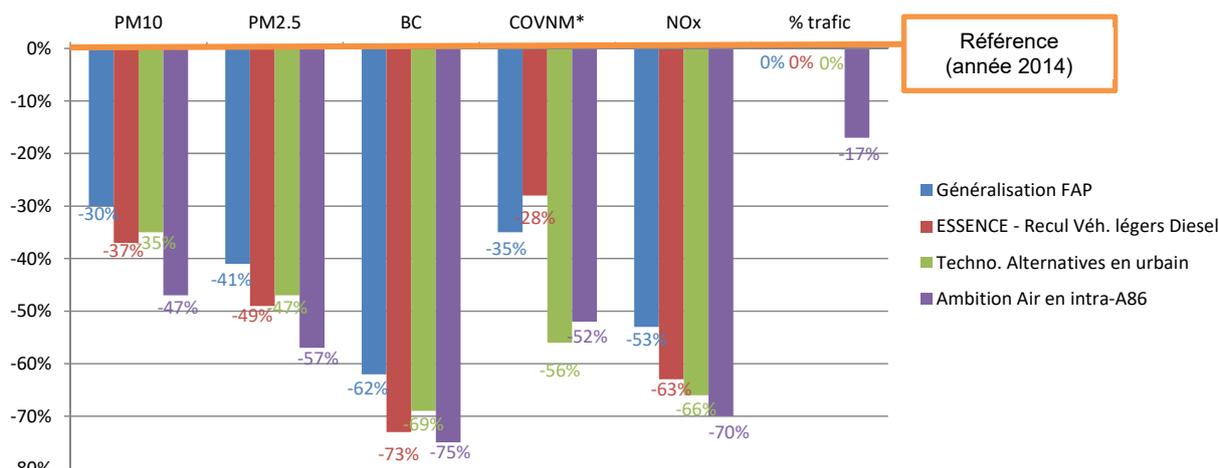
* Hors évaporation des véhicules au stationnement

Tableau 29 : Émissions annuelles selon les scénarios - intra-A86 - polluants particulaires

Périmètre : intra-A86 Scénarios	Variations (%) des émissions (Combustion et abrasion, sauf Nb de particules, combustion seulement)						Combustion
	PM _{1,0}	PM _{2,5}	PM ₁₀ ou PM	TSP	BC	OM	Nombre de particules
FAP (S1) - Forte proportion de FAP	-58	-41	-30	-24	-62	-39	-65
Essence (S2) - Recul des véh. légers Diesel	-69	-49	-37	-29	-73	-47	-78
Techn Altern - promotion véhicules électriques	-67	-47	-35	-28	-69	-48	-75
Ambition Air	-73	-57	-47	-41	-75	-56	-80

Les tests statistiques précédents (test des signes et test de Wilcoxon-signé) ont été appliqués également sur les émissions de tous les scénarios comparés deux à deux, en ne considérant que le domaine intra-A86 (mailles avec trafic). Les tests donnent de nouveau des écarts tous significatifs pour tous les polluants (intervalle de confiance de 95 %) pour la plupart des comparaisons de scénarios. Seule la comparaison des scénarios Technologies Alternatives et Ambition Air donne des écarts non significatifs (test des signes seulement) pour PM₁₀, PM_{2,5}, PM_{1,0} et BC, tandis que le test de Wilcoxon-signé conclut à des écarts significatifs des émissions de ces deux scénarios pour tous les polluants. Cet écart des conclusions des tests est sans doute lié à l'approche spatiale différente entre les deux scénarios : le scénario Technologies Alternatives modifie la composition du parc sur les seules mailles où le réseau routier est considéré comme « urbain » (ou périphérique), c'est-à-dire sur une partie des mailles de l'intra-A86, tandis que le scénario Ambition Air modifie la composition de parc et réduit le trafic sur l'ensemble de la zone intra-A86.

La Figure 47 récapitule l'évolution relative des émissions totales annuelles des principaux polluants gazeux et particulaires du trafic dans le seul domaine intra-A86, au travers des différents scénarios simulés, par rapport au scénario de référence (année 2014).



* Emissions COVNM calculées sans les émissions de stationnement

Figure 47 : Évolution du trafic et de ses émissions annuelles avec les scénarios - en intra-A86

5.2.3 Comparaison des options technologiques

Le scénario FAP (S1, filtre à particules) est quasiment un scénario d'évolution au fil de l'eau des technologies actuelles, tandis que les scénarios Essence (S2) et Technologies Alternatives constituent de réels changements de technologies, à des horizons temporels similaires.

La comparaison de ces trois options peut donc se faire en référence au scénario FAP (S1, fil de l'eau) plutôt qu'au scénario de référence (année 2014). Le gain supplémentaire apporté par ces changements de technologies est ainsi mesuré. Ces écarts sont donnés en Tableau 30 (polluants gazeux) et Tableau 31 (polluants particulaires), à la fois pour l'ensemble de l'Île-de-France et sur le périmètre intra-A86.

Tableau 30 : Comparaison des scénarios par rapport au scénario fil de l'eau FAP (S1) - polluants gazeux

Évolution par rapport au scénario FAP (S1)	Variation (%) du Trafic - VehxKm	Variations (%) des émissions de combustion et évaporation CO ₂	COV-NM*	NO _x	NO ₂ -	NH ₃
En Île-de-France						
Essence (S2) - Recul des véh. légers Diesel	0,0	1	15	-19	-24	30
Techn Altern - promotion véhicules électriques	0,0	-10	-25	-18	-19	-1
Ambition Air	-3,9	-7	-6	-10	-12	-6
En Intra-A86						
Essence (S2) - Recul des véh. légers Diesel	0,0	2	11	-20	-28	33
Techn Altern - promotion véhicules électriques	0,0	-14	-33	-27	-30	-1
Ambition Air	-14,5	-26	-19	-38	-44	-23

* Hors évaporation des véhicules au stationnement

Tableau 31 : Comparaison des scénarios par rapport au scénario fil de l'eau FAP (S1) - polluants particulaires

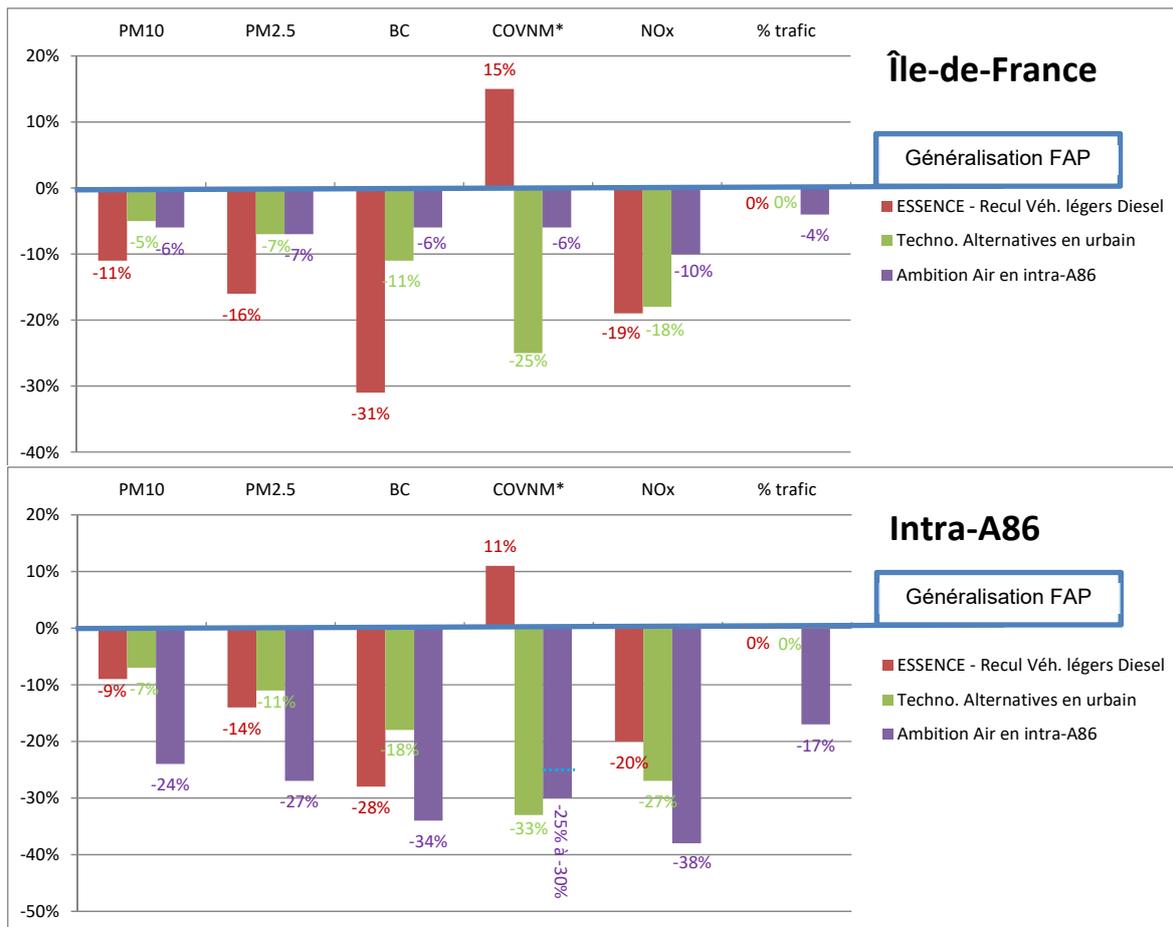
Évolution par rapport au scénario FAP (S1)	Variations (%) des émissions (Combustion et abrasion, sauf Nb de particules, combustion seulement)						Combustion
	PM _{1,0}	PM _{2,5}	PM ₁₀ ou PM	TSP	BC	OM	Nombre de particules
En Île-de-France							
Essence (S2) - Recul des véh. légers Diesel	-29	-16	-11	-8	-31	-15	-36
Techn Altern - promotion véhicules électriques	-13	-7	-5	-4	-11	-9	-17
Ambition Air	-8	-7	-6	-6	-8	-7	-12
En Intra-A86							
Essence (S2) - Recul des véh. légers Diesel	-27	-14	-9	-7	-28	-13	-37
Techn Altern - promotion véhicules électriques	-23	-11	-7	-6	-18	-15	-29
Ambition Air	-35	-27	-24	-22	-34	-28	-43

Le désavantage du scénario Essence (S2) est une augmentation de l'ordre de 15 % des émissions de COV et de 30 % en NH₃, tandis qu'il apporte une réduction supplémentaire des PM₁₀ de 11 % et une réduction supplémentaire des particules plus fines et/ou de combustion de l'ordre de 30 % (PM_{1,0}, BC, nombre de particules). Ces écarts sont assez similaires en intra-A86 et sur l'ensemble de l'Île-de-France.

La réduction des émissions de particules est plus limitée avec le scénario Technologies Alternatives, mais elle est plus marquée en intra-A86 (-20 à -30 % des émissions de combustion). Ce scénario apporte par contre un bénéfice net en COV (-25 % à l'échelle de l'Île-de-France, -33 % en intra-A86) et en CO₂ (-10 % à l'échelle de l'Île-de-France, -14 % en intra-A86).

Enfin le scénario Ambition Air apporte les bénéfices les plus forts en intra-A86 : -35 à -43 % de particules de combustion, -40 % d'oxyde d'azote et environ -20 % des COV et NH₃.

La Figure 48 compare les émissions du trafic (principaux polluants) selon ces différents scénarios prospectifs et par rapport au scénario prospectif au fil de l'eau FAP (S1), en Île-de-France et dans le domaine urbain intra-A86, mettant en évidence l'avantage d'une réduction du trafic dans les zones à forte densité de population.



* Emissions COVNM calculées sans les émissions de stationnement

Figure 48 : Comparaison du trafic et de ses émissions annuelles de PM₁₀, PM_{2,5}, BC, COVNM, NOx : Différences relatives (en %) entre les scénarios prospectifs et le scénario au fil de l'eau FAP (S1), Île-de-France (haut) et intra-A86 (bas)

5.2.4 Effet du renouvellement du parc sur les émissions des scénarios

Il a été noté que les compositions de parc des scénarios diffèrent à la fois par le choix des technologies (Diesel avec FAP, essence, etc.) et leurs proportions dans le trafic, mais aussi par le renouvellement induit par les mutations nécessaires aux évolutions entre la situation de référence et ces compositions à un horizon 2025.

Il y a donc un effet renouvellement du parc dans les scénarios, qu'il convient de dissocier de l'effet propre des technologies.

Ainsi, le scénario Essence (S2) conduit à un plus fort renouvellement du parc que le scénario FAP (S1) et induit une plus forte proportion de véhicules Euro 5 et Euro 6. Les écarts d'émission entre ces deux scénarios peuvent donc s'expliquer par la somme de deux effets : l'effet technologie et l'effet renouvellement.

La part respective de ces deux effets peut être calculée comme suit :

écart total entre les scénarios

$$= \text{émission Scén. Essence}_{\text{structure Scén. Essence}} - \text{émission Scén. FAP}_{\text{structure Scén. FAP}}$$

effet renouvellement

$$= \text{émission Scén. FAP}_{\text{structure Scén. Essence}} - \text{émission Scén. FAP}_{\text{structure Scén. FAP}}$$

effet technologie = *écart total entre les scénarios* – *effet renouvellement*

Par ailleurs l'effet renouvellement diffère selon qu'il s'agit des véhicules Diesel ou des véhicules essence, les deux effets pouvant même être antagonistes. L'effet renouvellement peut donc être dissocié selon :

$$\text{effet renouvellement} = \text{effet Renouvellement}_{\text{Essence}} + \text{effet Renouvellement}_{\text{Diesel}}$$

$$\text{effet Renouvellement}_{\text{Essence}}$$

$$= \text{émission véh. essence Scén. FAP}_{\text{structure Scén. Essence}}$$

$$- \text{émission véh. essence Scén. FAP}_{\text{structure Scén. FAP}}$$

$$\text{effet Renouvellement}_{\text{Diesel}}$$

$$= \text{émission véh. Diesel Scén. FAP}_{\text{structure Scén. Essence}}$$

$$- \text{émission véh. Diesel Scén. FAP}_{\text{structure Scén. FAP}}$$

Le Tableau 32 illustre ces différents effets pour quelques polluants, pour les émissions à l'échappement et en tenant compte des émissions totales. Pour NOx, le bénéfice du scénario Essence (S2) est lié à la technologie, tandis que l'effet renouvellement est contradictoire entre véhicules Diesel et essence. Pour les COV, l'écart entre les deux scénarios est au contraire principalement porté par le renouvellement accéléré du parc, la technologie essence induisant alors une hausse d'émissions.

Tableau 32 : Contributions respectives de l'option technologique et du renouvellement de parc sur les émissions du trafic entre les scénarios FAP (S1) et Essence (S2) - Île-de-France

Scénario Essence - scénario FAP (tous véhicules - Île-de-France)	Variations (%) des émissions (combustion ou totale)						
	NOx	COV Comb.	COV Totaux	PM _{2,5} Comb.	PM _{2,5} Totaux	BC Comb.	BC Totaux
Écart total entre les 2 scénarios	-19,8	-12,4	+15,2	-32,7	-15,8	-40,4	-31,3
Contribution de changement de structure Euro							
- Véh. légers Diesel	+11,4	-0,9	-0,7	-9,1	-3,1	-18,2	-13,3
- Véh. légers Essence	-4,5	-17,2	-10,1	-0,1	+0,1	-0,1	-0,0
Effet renouvellement total	+6,9	-18,1	-10,8	-9,1	-3,0	-18,3	-13,3
Effet net de la technologie Essence versus scénario FAP (S1)	-25,7	+5,8	+26,0	-23,5	-12,8	-22,1	-18,0

Pour les polluants particuliers, le bénéfice du scénario Essence (S2) par rapport au scénario FAP (S1) se partage entre une contribution due à la technologie essence (entre 55 et 70 % de l'effet total) et une contribution due au renouvellement accéléré.

5.2.5 Comparaison de l'évolution simulée des émissions du trafic avec l'évolution rétrospective observée entre 2000 et 2012

Les émissions calculées avec le scénario FAP (S1, généralisation du filtre à particules) et Essence (S2) sont analysées ici en regard de l'évolution rétrospective des émissions du trafic routier constatée entre 2000 et 2012 (Figure 49). La tendance globale entre 2012 et 2025 est cohérente avec l'évolution des émissions entre 2000 et 2012.

Comme observé précédemment, les émissions obtenues avec le scénario Essence (S2) sont plus faibles que celles obtenues avec le scénario FAP (S1). Entre 2012 et 2025, les particules (PM_{2,5}) émises à l'échappement diminuent de -67 % avec le scénario FAP (S1) et de -78 % avec le scénario Essence (S2).

Les émissions calculées avec les deux scénarios prospectifs sont majoritairement dues à l'abrasion. Ainsi, en 2000, l'abrasion représentait 19 % des émissions totales de PM₁₀ du trafic routier. En 2012, la part de particules issues de l'abrasion atteignait 41 %. Avec les scénarios prospectifs FAP (S1) et Essence (S2), l'abrasion représente respectivement 66 et 75 % des émissions de PM₁₀.

Les particules émises à l'échappement proviennent en majorité des véhicules utilitaires légers Diesel dans les deux scénarios prospectifs, avec presque 50 % des particules provenant de ce type de véhicules pour les deux scénarios, FAP (S1) et Essence (S2).

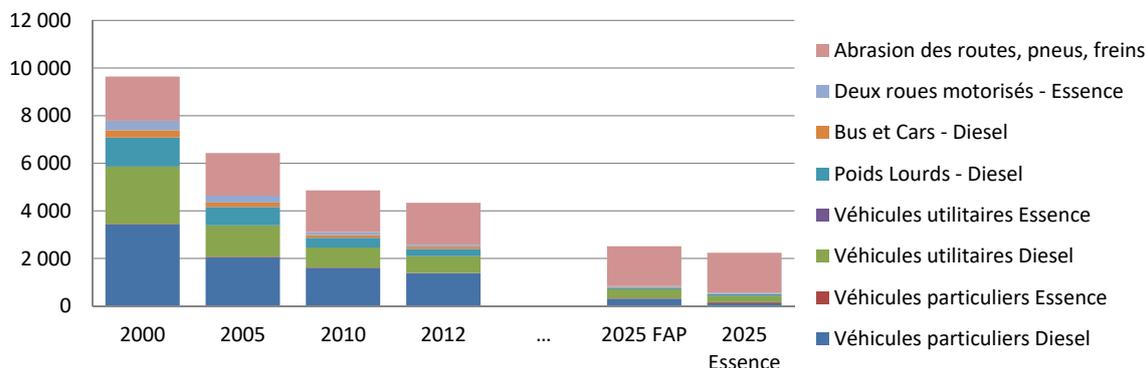


Figure 49 : Évolution rétrospective des émissions de particules PM₁₀ du trafic routier entre 2000 et 2012, et comparaison avec les émissions calculées pour l'année 2025 avec les scénarios FAP (S1) et Essence (S2)

5.2.6 Évolution des émissions en tenant compte des autres secteurs

Dans ce qui suit, ne sont considérés que les scénarios utilisés pour l'analyse des concentrations de polluants sur l'Île-de-France, c'est à dire :

- la situation de référence (REF) ;
- le scénario de généralisation du filtre à particules (scénario FAP ou S1) ainsi qu'une variante annulant les émissions des deux-roues (S1 – 2R élec) ;
- le scénario de promotion des motorisations essence des véhicules légers au détriment des Diesel (scénario Essence ou S2).

Le Tableau 33 indique les émissions en tonnes par an de différents polluants reliés à la qualité de l'air et émis par les activités anthropiques. Le trafic est la source principale des émissions de NOx (58 %), NO₂ (78 %) et BC (54 %). La contribution du trafic aux émissions des autres polluants est moins importante, mais elle reste significative pour les particules PM_{2,5} (25 %) et la matière organique (37 %). Elle est moins importante pour les grosses particules (PM_{2,5-10}) que pour les PM_{2,5} (seulement 11 %). Les émissions de COSV évoluent de manière similaire à celles de OM, car elles sont considérées comme directement proportionnelles aux émissions de OM.

Tableau 33 : Émissions en tonnes/an sur l'Île-de-France pour la simulation de référence ainsi que pour les différents scénarios. Pour chaque scénario, les variations par rapport à la simulation de référence en % sont détaillées

	COV	NOx	NO ₂	NH ₃	PM ₁₀ -PM _{2,5}	PM _{2,5}	OM	BC	SVOC
REF	83939	78490	13682	5713	6838	12200	2545	2037	6362
Trafic	10666	45216	10622	508	776	2993	943	1096	2357
% des émiss. tot.	12,7	57,6	77,6	8,9	11,4	24,5	37,0	53,8	37,0
FAP(S1)	79517	50794	7261	5445	6567	10545	2036	1312	5091
S1-REF (en %)	-5,3	-35,3	-47,0	-4,7	-4,0	-13,6	-20,0	-35,6	-20,0
S1 - 2R élec	67790	50531	7253	5441	6556	10498	2005	1304	5014
S1-2R élec -- REF (en %)	-19,2	-35,6	-47,0	-4,8	-4,1	-14,0	-21,2	-36,0	-21,2
Essence (S2)	78249	47692	6361	5477	6583	10328	1962	1186	4906
S2 - REF (en %)	-4,9	-39,2	-53,5	-4,1	-3,7	-15,4	-22,9	-41,8	-22,9

Les scénarios induisent principalement une réduction des émissions de NOx (entre -35 % et -39 %), de NO₂ (entre -47 % et -54 %) et de BC (entre -36 % et -42 %). Les réductions des émissions des particules sont plus faibles : -14 à -15 % pour les PM_{2,5} et -20 % à -23 % pour OM. Les réductions d'émissions des grosses particules (PM_{2,5-10}) et de NH₃ sont faibles (inférieures à -5 %). Les émissions de COV diminuent faiblement avec les scénarios FAP (S1) et Essence (S2) (environ -5 %), tandis qu'elles décroissent d'environ -20 % avec le scénario S1 – 2R élec. Les différences entre chacun des scénarios et la référence sont plus beaucoup plus importantes que celles entre les scénarios. Ainsi, pour une meilleure lisibilité des résultats, le scénario FAP (S1) sera d'abord comparé avec la référence, puis les autres scénarios avec le scénario FAP (S1).

La Figure 50 résume l'évolution des émissions totales annuelles de polluants gazeux et particulaires, tous secteurs émetteurs confondus à l'échelle de l'Île-de-France, pour les scénarios FAP (S1), S1-2R élec et Essence (S2) par rapport au scénario de référence (année 2014). Pour rappel, les émissions des secteurs émetteurs autres que le trafic sont considérées invariantes donc les réductions des émissions tous secteurs sont probablement sous-estimées (pour des volumes d'activités constants).

La Figure 51 met en regard la réduction marquée des émissions du trafic par rapport au scénario de référence (année 2014) et la réduction plus atténuée constatée sur l'ensemble des secteurs émetteurs (résultats Île-de-France sur quelques polluants), l'atténuation étant au prorata de ce que représentent les émissions du trafic.

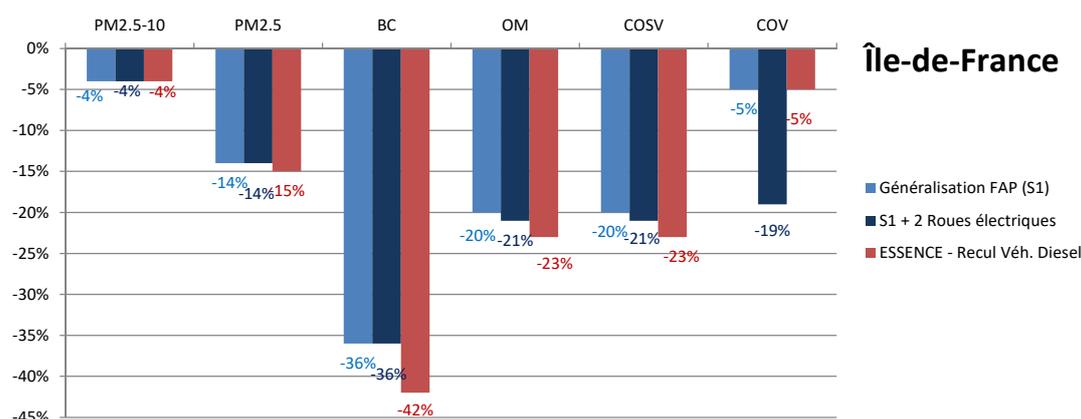


Figure 50 : Évolution des émissions annuelles totales tous secteurs d'activité, avec les scénarios - Île-de-France

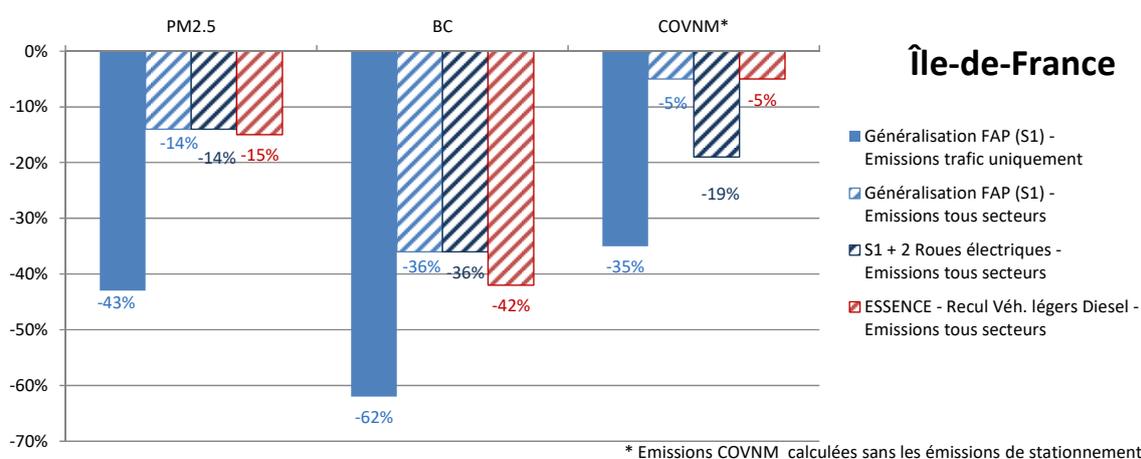


Figure 51 : Évolution des émissions annuelles du trafic et tous secteurs d'activité avec les scénarios - Île-de-France

Les moyennes sur l'Île-de-France (Tableau 33) cachent cependant des variations régionales. Les disparités régionales des émissions de NOx, COV et COSV, qui sont les composés qui régissent la formation des aérosols inorganiques et organiques secondaires sont analysées ici. La Figure 52 montre la carte des émissions de NOx sur l'Île-de-France, ainsi que les cartes des différences relatives entre le scénario FAP (S1) et la référence, et des différences relatives entre les autres scénarios et le scénario FAP (S1). Les fortes concentrations sont situées dans Paris et le long des axes routiers. La réduction des émissions de NOx pour les différents scénarios est également concentrée le long des axes routiers et dans Paris, avec des réductions qui peuvent aller jusqu'à -60 % pour le scénario FAP (S1) par rapport à la référence. Le scénario Essence (S2) entraîne des réductions plus fortes que le scénario FAP (S1, jusqu'à -15 % de réduction supplémentaire). Les émissions des NOx du scénario S1 – 2R élec ne varient pratiquement pas comparées à celles du scénario FAP (S1).

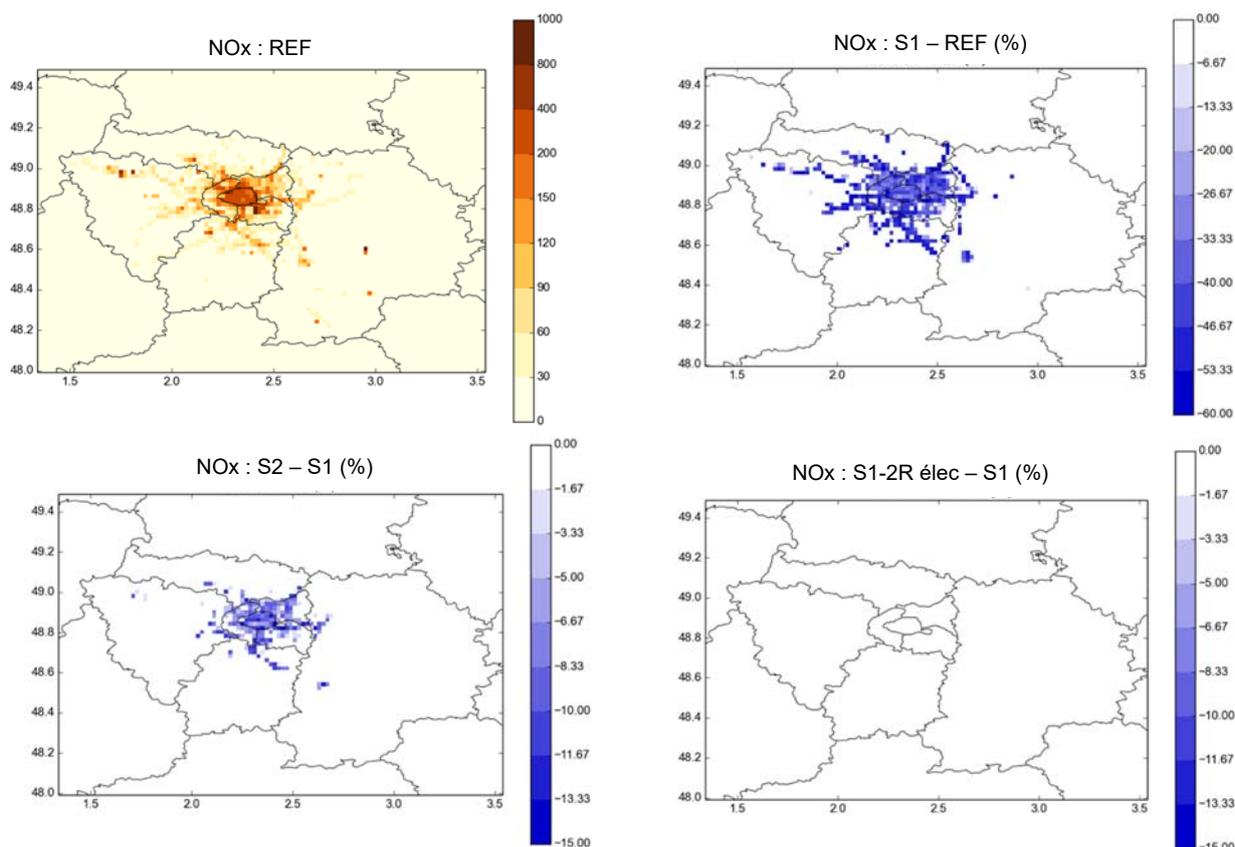


Figure 52 : Émissions annuelles en tonnes par an de NOx sur l'Île-de-France (en haut à gauche). Différences relatives entre les émissions annuelles du scénario FAP (S1) et les émissions annuelles de la simulation de référence en % (en haut à droite). Différences relatives entre les émissions annuelles des scénarios Essence (S2) et S1-2R élec (FAP moins émissions des deux-roues) et les émissions annuelles du scénario FAP (S1) en % (en bas)

La Figure 53 montre des cartes des émissions de COV sur l'Île-de-France, les différences relatives entre le scénario FAP (S1) et la référence, ainsi que les différences relatives entre les scénarios et le scénario FAP (S1). Contrairement aux émissions de NOx, les émissions des COV du trafic sont concentrées dans Paris et ne sont pas très fortes le long des grands axes routiers. Autrement dit, elles sont plus importantes pour les conditions de circulation urbaine que sur l'autoroute. Même si les émissions en COV du trafic sont faibles par rapport aux émissions des autres secteurs à l'échelle régionale, la réduction va jusqu'à -26 % dans Paris pour le scénario FAP (S1) par rapport à la référence. Le scénario Essence (S2) entraîne une légère augmentation des émissions de COV de quelques pourcents par rapport au scénario FAP (S1). Le scénario S1 – 2R élec engendre de plus fortes différences, qui vont jusqu'à -32 % par rapport à FAP (S1) dans le centre de Paris, là où les émissions de COV du trafic sont les plus importantes.

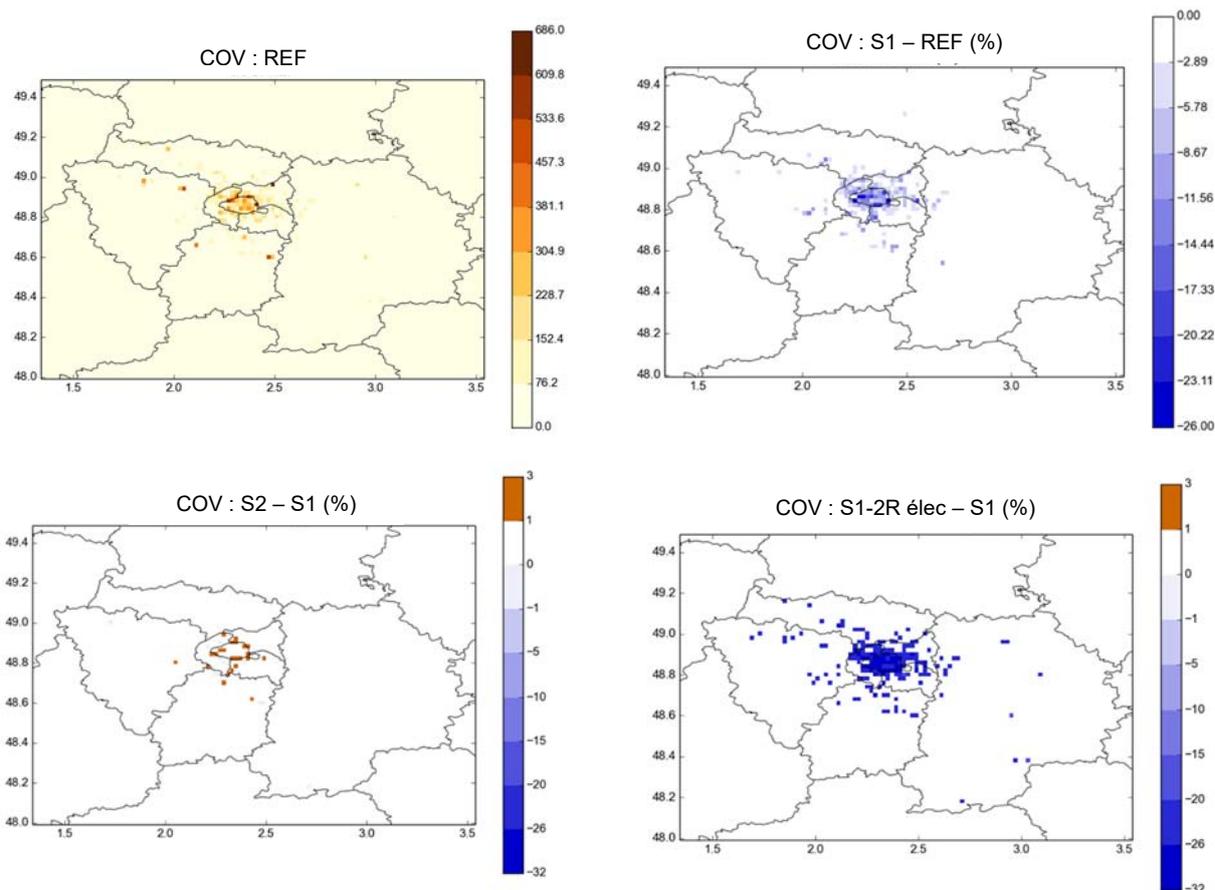


Figure 53 : Émissions annuelles en tonnes par an de COV sur l'Île-de-France (en haut à gauche). Différences relatives entre les émissions annuelles du scénario FAP (S1) et les émissions annuelles de la simulation de référence en % (en haut à droite). Différences relatives entre les émissions annuelles des scénarios Essence (S2) et S1 – 2R élec et les émissions annuelles du scénario FAP (S1) en % (en bas)

La Figure 54 montre des cartes des émissions de COSV sur l'Île-de-France, les différences relatives entre le scénario FAP (S1) et la référence, ainsi que les différences relatives entre les scénarios et le scénario FAP (S1). Les émissions de COSV sont estimées proportionnellement aux émissions d'organiques primaires. Ainsi, leurs variations reflètent celles des émissions de particules organiques. Les émissions sont plus élevées dans Paris et le long des axes routiers. La réduction des émissions du scénario FAP (S1) par rapport à la référence va jusqu'à -54 % dans Paris et le long des axes routiers. Les réductions du scénario Essence (S2) comparé à FAP (S1) sont les plus importantes le long des axes routiers et peuvent aller jusqu'à -25 % de réduction supplémentaire. Pour le scénario S1 – 2R élec, les réductions sont faibles par rapport au scénario FAP (S1).

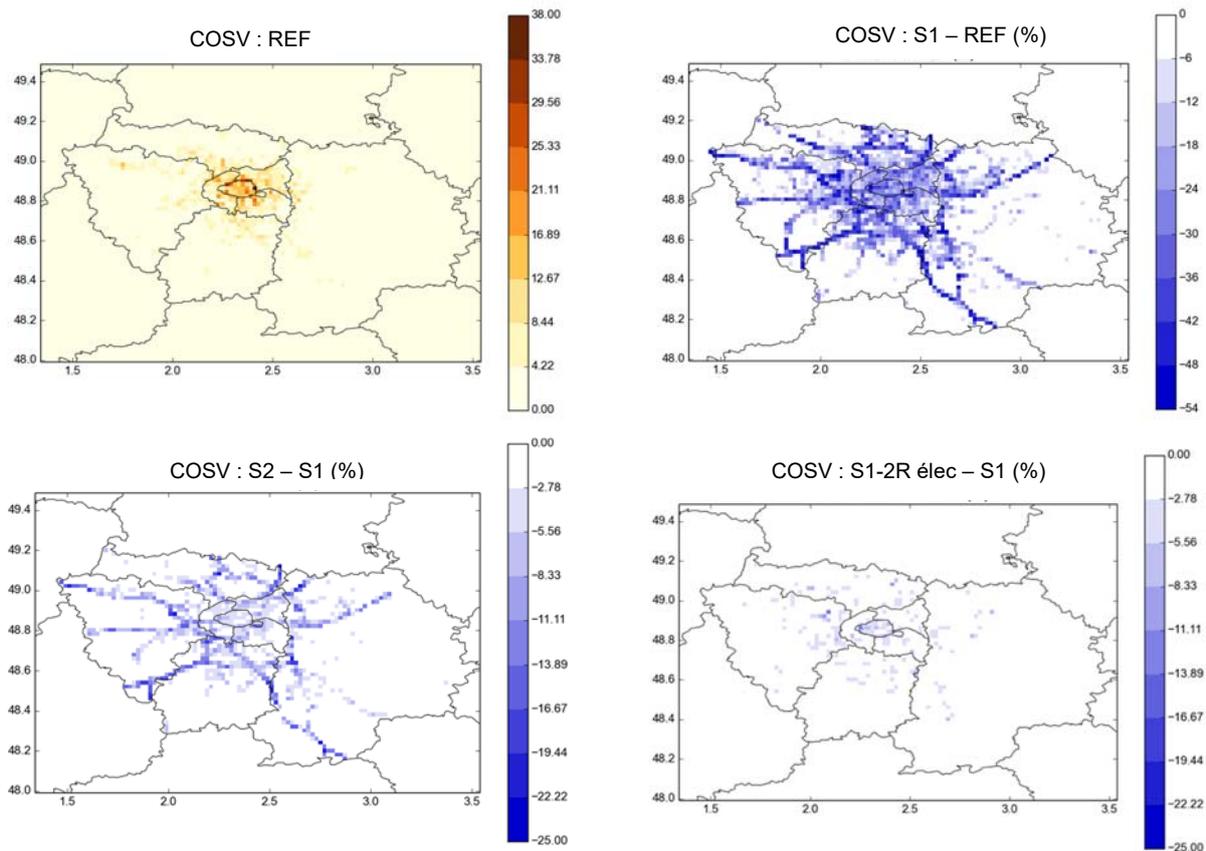


Figure 54 : Émissions annuelles en tonnes par an de COSV sur l'Île-de-France (en haut à gauche). Différences relatives entre les émissions annuelles du scénario FAP (S1) et les émissions annuelles de la simulation de référence en % (en haut à droite). Différences relatives entre les émissions annuelles des scénarios Essence (S2) et S1 – 2R élec et les émissions annuelles du scénario FAP (S1) en % (en bas)

5.3 Évolution des concentrations de polluants

Les polluants émis dans l'atmosphère sont transportés et subissent différentes transformations chimiques. La chimie étant non linéaire, les réductions des concentrations ne sont pas directement proportionnelles à celles des émissions. Trois scénarios sont considérés : FAP (S1, généralisation du filtre à particules), S1 – 2R élec (idem FAP, moins émissions des deux-roues pour réduction forte des COV) et Essence (S2, promotion des motorisations essence). Leur impact sur les concentrations des composés suivants est étudié : O₃, NO₂, PM₁₀, PM_{2,5}, nombre de particules, ainsi que les composés des particules (composés inorganiques, organiques et BC). Les inorganiques sont des composés majoritairement présents dans les aérosols secondaires (nitrate, ammonium, sulfate, sodium, chlorure). Les organiques sont en partie directement émis par les sources anthropiques (OM), mais sont majoritairement des composés secondaires. Ils sont formés par l'oxydation des COV d'origine anthropique mais aussi biogénique et des COSV qui entraînent la formation de composés qui se partitionnent entre la phase gazeuse et les particules.

Sur l'Île-de-France, les scénarios influencent fortement les concentrations. Cependant, les différences entre les scénarios sont faibles comparées aux différences entre chacun des scénarios et la simulation de référence. Le scénario FAP (S1) est d'abord comparé à la simulation de référence. Pour estimer le scénario le plus favorable à une réduction de la pollution, les différences entre les autres scénarios et FAP (S1) sont également étudiées.

5.3.1 Éléments de validation des calculs

La validation du modèle pour la situation de référence sur l'Île-de-France est faite à partir des concentrations mesurées aux stations d'Airparif pour O₃, NO₂, PM₁₀, PM_{2,5} et BC.

Pour évaluer les simulations par rapport aux observations, différentes statistiques sont calculées dont les moyennes et le coefficient de corrélation entre les mesures et les observations. Pour l'O₃, l'erreur « MNGE » (*mean normalised gross error*) et le biais « MNGB » (*mean normalised gross bias*) sont également calculés avec un seuil de coupure habituel d'environ 80 µg/m³ (c'est-à-dire environ 40 ppb) :

$$\text{MNGB} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_i - O_i}{O_i} \quad \text{MNGE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|C_i - O_i|}{O_i}$$

avec C_i et O_i les concentrations simulées et observées, et n le nombre de données.

Russell and Dennis (2000) recommandent comme critère de performance pour les concentrations horaires d'O₃ : |MNGB| < 15 % et MNGE < 30 %.

Pour les particules, l'erreur fractionnaire moyenne « MFE » et le biais fractionnaire moyen « MFB » sont calculés :

$$\text{MFB} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_i - O_i}{(C_i + O_i)/2} \quad \text{MFE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|C_i - O_i|}{(C_i + O_i)/2}$$

Boylan and Russell (2006) recommandent comme critère de but pour les concentrations journalières des particules (PM₁₀ et PM_{2,5}) : MFE < 50 % et |MFB| < 30 %, et comme critère de performance : MFE < 75 % et |MFB| < 60 %.

Les Tableau 34 et Tableau 35 montrent les statistiques obtenues pour O₃, NO₂, PM₁₀, PM_{2,5} et BC, pour la situation de référence. Bien que la concentration moyenne d'ozone soit surestimée, la simulation satisfait largement le critère de Russell and Dennis (2000), qui porte surtout sur les fortes concentrations d'ozone.

Tableau 34 : Statistiques de comparaisons aux mesures pour O₃ et NO₂

Situation de référence	Nombre de stations	Moyenne mesurée (µg/m ³)	Moyenne simulée (µg/m ³)	Corrélation (%)	MNGE (%)	MNGB (%)
O ₃	23	47,5	72,3	64 %	15,1 %	4,2 %
NO ₂	18	26,8	18,6	56,8 %	49,9 %	-24,6 %

MNGE : Mean Normalized Gross Error ; MNGB : Mean Normalized Gross Bias

Tableau 35 : Statistiques de comparaisons aux mesures pour PM₁₀, PM_{2,5}, BC et OM

Situation de référence	Nombre de stations	Moyenne mesurée (µg/m ³)	Moyenne simulée (µg/m ³)	Corrélation	MFE (%)	MFB (%)
PM ₁₀	14	21,1	17,2	32 %	43,6 %	-23,8 %
PM _{2,5}	7	12,4	14,2	36 %	45,4 %	21,6 %
BC	3	1,2	0,6	56 %	68,3 %	-56,3 %
OM	1	3,2	2,2	41 %	50,9 %	-29,8 %

MFE : Mean Fractional Error ; MFB : Mean Fractional Bias

Les concentrations simulées NO₂ sont inférieures aux concentrations mesurées par les stations, mais il n'y a pas de critère établi pour les comparaisons des concentrations de NO₂ simulées et observées. Cependant, les statistiques obtenues sont comparables à celles obtenues dans d'autres études et/ou par d'autres modèles (Roustan, Pausader, and Seigneur 2011, Terrenoire et al. 2015, Zhang et al. 2013). Le NO₂ étant principalement émis par des sources surfaciques, la performance du modèle pourrait être améliorée en ajoutant des niveaux verticaux dans les couches près du sol et dans une moindre mesure en utilisant des facteurs d'émission plus réalistes.

Concernant les particules, les concentrations moyennes simulées de PM_{10} ont tendance à être sous-estimées, tandis que celles de $PM_{2,5}$ sont légèrement surestimées. Les coefficients de corrélation entre concentrations simulées et observations sont faibles (32 %-36 %). Cependant, le critère de performance et même le critère de but sont respectés. Pour le BC, la simulation surestime les concentrations moyennes (MFB = -56 %), mais l'erreur satisfait le critère de performance et le coefficient de corrélation est élevé (56 %). Cependant, ces statistiques ne portent que sur trois stations de mesures, avec des mesures débutant en septembre 2014 pour deux des stations. Pour la matière organique (OM), les critères de but et de performance sont satisfaits, bien que les comparaisons ne portent que sur une station (SIRTA - Site Instrumental de Recherche par Télédétection Atmosphérique).

Dans l'inventaire Airparif (2012b) utilisé, il n'y a pas de données sur les hauteurs des cheminées. Donc au lieu de calculer proprement les hauteur et sur-hauteur d'émission des sources, les émissions ont été réparties verticalement selon le secteur d'activité et les préconisations d'EMEP⁵⁷. Pour le secteur d'activité lié à Grandpuits, la répartition verticale est de 90 % sous 90 m, c'est-à-dire en dessous de la hauteur de la cheminée industrielle. Les émissions sont donc émises dans des niveaux verticaux trop bas pour les sites industriels de Grandpuits et de Porcheville, ce qui explique les fortes concentrations simulées à ces sites.

5.3.2 Importance du régime chimique

Les régimes chimiques qui gouvernent la formation de l' O_3 et des composés secondaires sont en grande partie régis par le rapport des concentrations COV/NOx (Figure 55), comme détaillé dans le livre de Seinfeld and Pandis (1998). Ainsi, dans des régions où le rapport COV/NOx est élevé (plutôt en zone rurale), une diminution des NOx entraîne une diminution de l' O_3 et des oxydants.

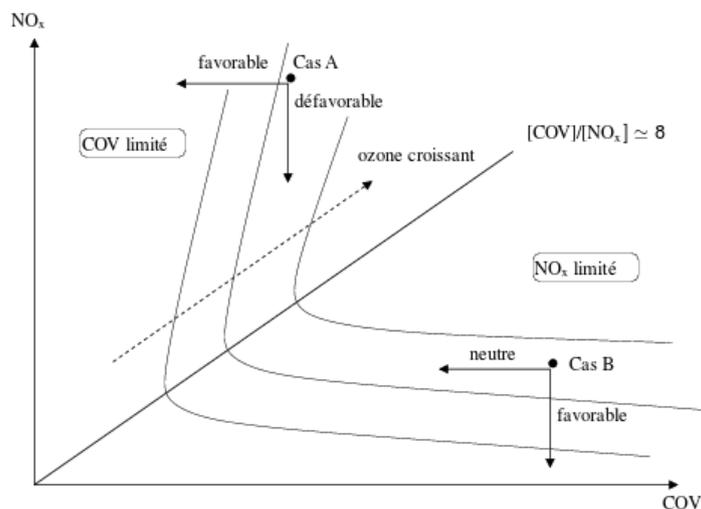


Figure 55 : Régimes chimiques pour l'ozone. Isopleths d'ozone (isovaleurs, typiquement de concentration maximale horaire) en fonction des concentrations de NOx et de COV. $[COV]/[NOx] \approx 8$: situation américaine

Par contre, dans des régions où le rapport COV/NOx est bas (plutôt en zone urbaine), une diminution des NOx entraîne une augmentation de l' O_3 , tandis qu'une diminution des COV induit une baisse de l' O_3 . La Figure 56 montre ce rapport COV/NOx sur l'Île-de-France pour la simulation de référence. Le rapport COV/NOx est bas sur Paris (inférieur à 4) et sur les départements limitrophes, indiquant un régime COV limité. En moyenne annuelle, le panache parisien tend à être transporté vers le nord, conduisant à des valeurs de COV/NOx plus basses vers le nord de Paris comparé aux autres directions. Ceci est en accord avec la rose des vents calculée pour l'année 2014 (Figure 57). Aux

⁵⁷ www.emep.int/mscw/UniDoc/node7.html

extrémités de l'Île-de-France, le rapport COV/NOx est élevé (supérieur à 10), indiquant un régime NOx limité.

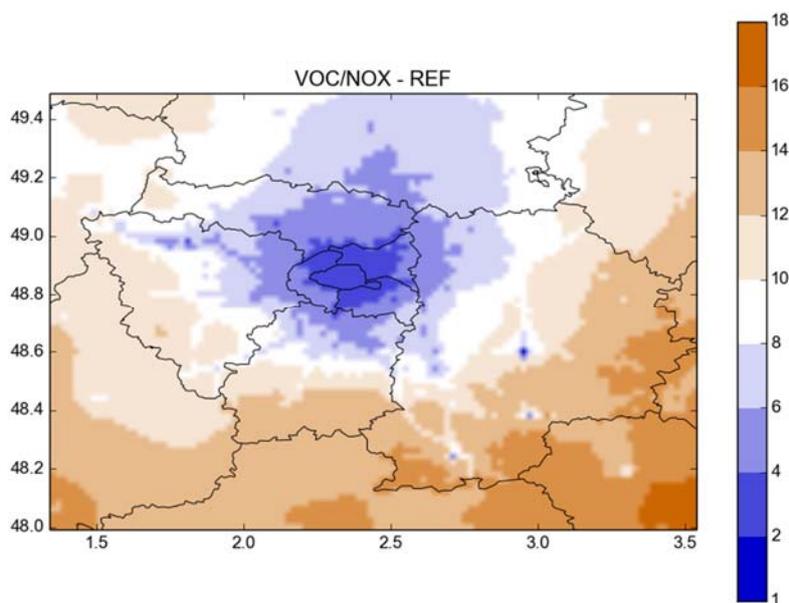


Figure 56 : Rapport des concentrations de COV/NOx pour la simulation de référence

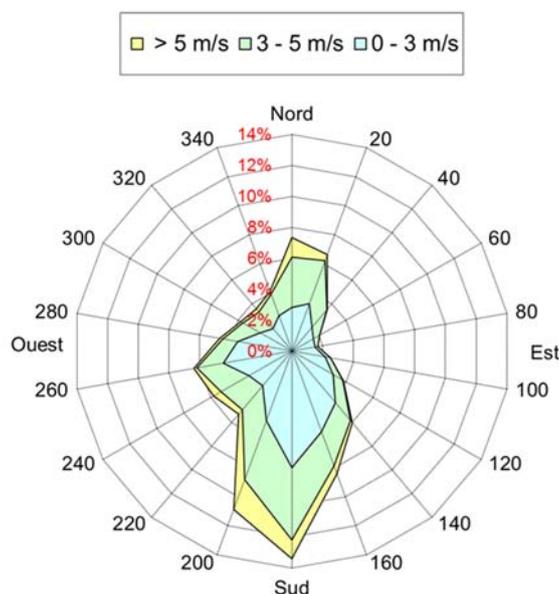


Figure 57 : Rose des vents pour l'année 2014

5.3.3 Évolution des concentrations moyennes annuelles et variations spatiales

La Figure 58 montre les concentrations moyennes annuelles d'O₃ sur l'Île-de-France, ainsi que les différences relatives entre le scénario FAP (S1) et la simulation de référence. Les concentrations moyennes sont moins élevées dans Paris et le long des axes routiers que sur le reste de l'Île-de-France. En effet, l'O₃ est titré par les fortes concentrations de NOx dans Paris et le long des axes routiers. Le scénario FAP (S1), qui induit surtout une diminution des émissions de NOx, conduit à une faible diminution de l'O₃ sur la majorité de l'Île-de-France, où le régime chimique est plutôt limité en NOx. Cependant, l'O₃ augmente de manière importante (jusqu'à 27 % en moyenne annuelle)

dans Paris et le long des axes routiers, où le régime est plutôt limité en COV. Ces augmentations de l'O₃ ne constituent pas un problème de santé publique car elles interviennent dans des zones où les concentrations sont faibles. Cela indique néanmoins que le scénario FAP (S1) entraîne aussi une augmentation des oxydants dans Paris et le long des axes routiers, ce qui conduit à une augmentation de la production d'aérosols secondaires.

Par rapport au scénario FAP (S1), le scénario Essence (S2) induit une augmentation légèrement plus importante de l'O₃ dans Paris (+3 %). La baisse des émissions de COV dans le scénario S1 – 2R élec n'est pas suffisante pour jouer de manière notable sur les concentrations d'O₃ en moyenne annuelle.

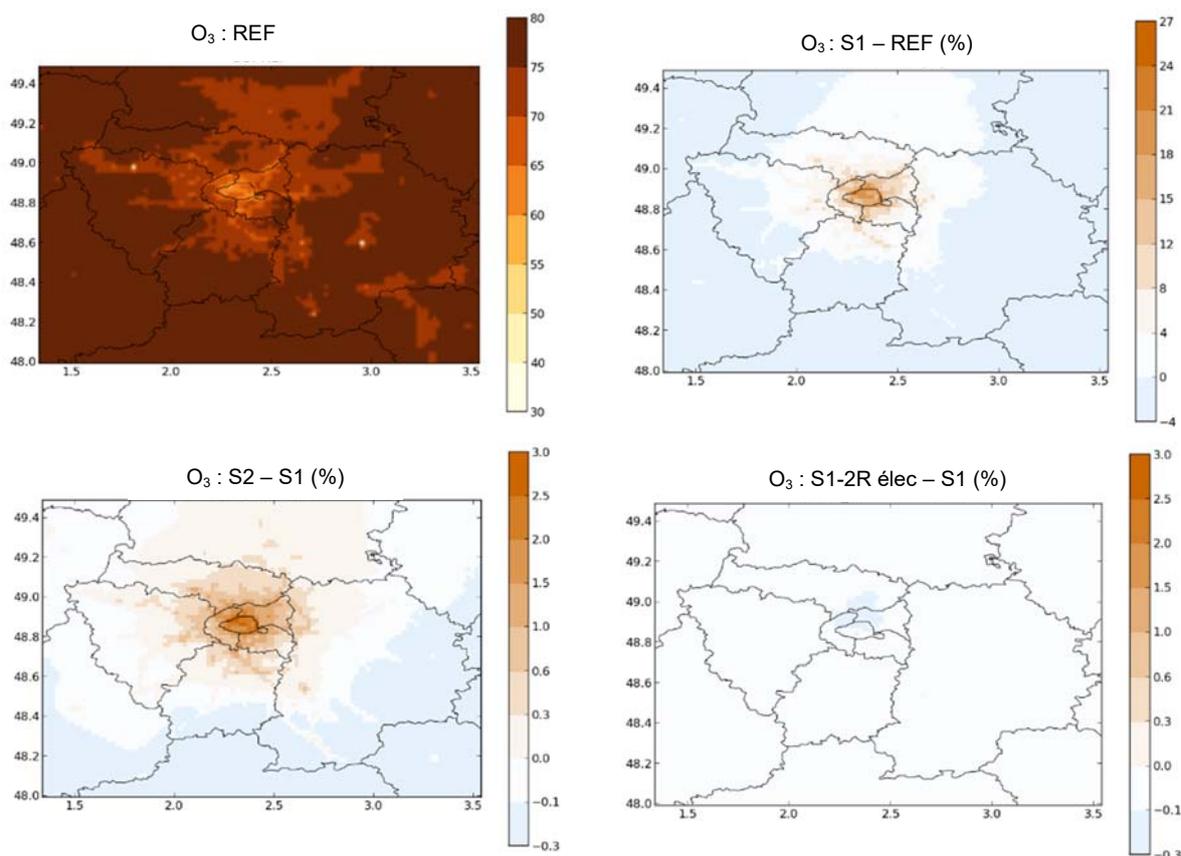


Figure 58 : Concentrations moyennes annuelles en µg/m³ de l'O₃ sur l'Île-de-France (en haut à gauche). Différences relatives entre les concentrations annuelles du scénario FAP (S1) et les concentrations annuelles de la simulation de référence en % (en haut à droite). Différences relatives entre les concentrations annuelles des scénarios Essence (S2) et S1 – 2R élec et les concentrations annuelles du scénario FAP (S1) en % (en bas)

Dans la simulation de référence, les concentrations moyennes des $PM_{2,5}$ sont plus élevées dans Paris que sur le reste de l'Île-de-France (Figure 59). Les différences les plus élevées entre le scénario FAP (S1) et la simulation de référence sont observées le long des grands axes routiers ainsi que dans Paris. Sur toute l'Île-de-France, les concentrations diminuent de 3 % à 12 %.

Le scénario Essence (S2) entraîne une réduction supplémentaire des concentrations de 1 à 2 % sur l'Île-de-France par rapport au scénario FAP (S1). La baisse est faible, mais plus marquée le long des axes routiers autour de Paris. Pour le scénario S1 – 2R élec, la baisse des concentrations en $PM_{2,5}$ est restreinte à Paris et à la banlieue proche.

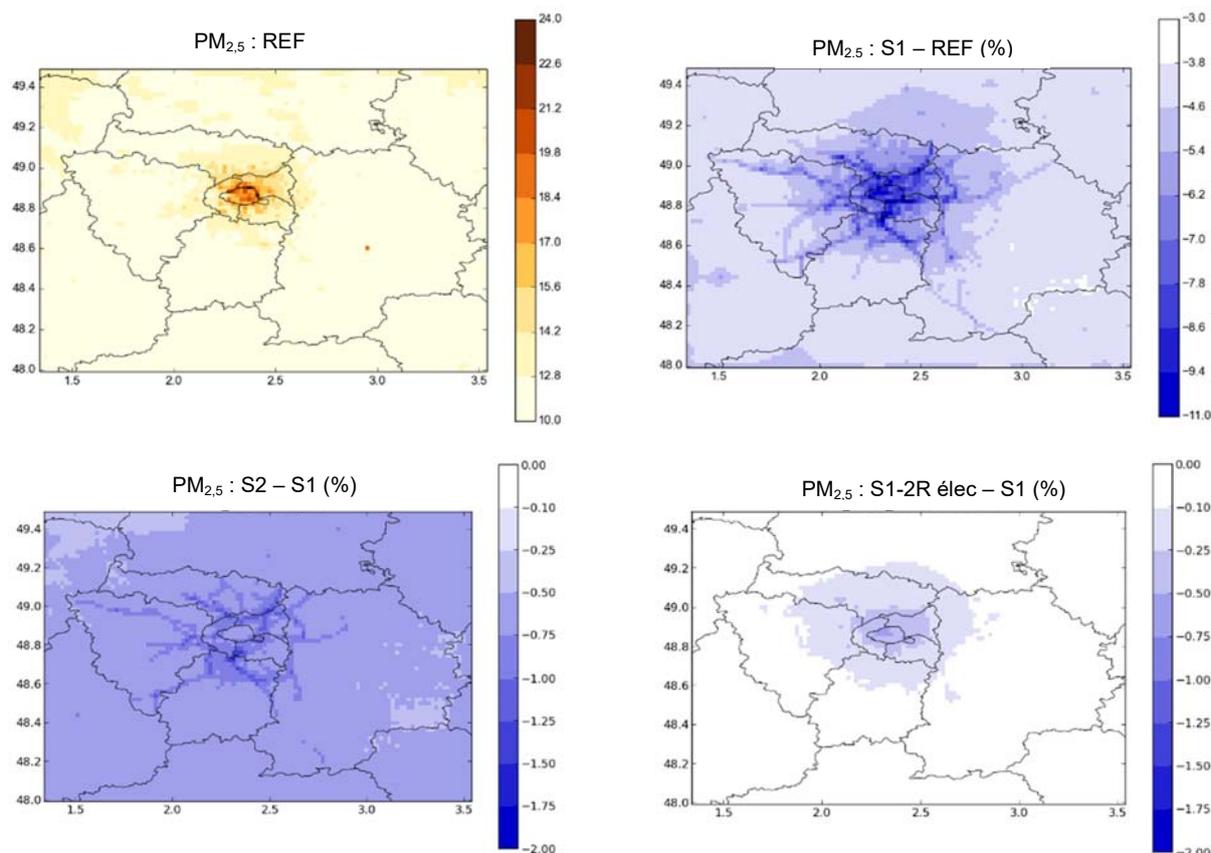


Figure 59 : Concentrations moyennes annuelles en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ des $PM_{2,5}$ sur l'Île-de-France (en haut à gauche). Différences relatives entre les concentrations annuelles du scénario FAP (S1) et les concentrations annuelles de la simulation de référence en % (en haut à droite). Différences relatives entre les concentrations annuelles des scénarios Essence (S2) et S1 – 2R élec et les concentrations annuelles du scénario FAP (S1) en % (en bas)

Les Figure 60, Figure 61 et Figure 62 montrent les concentrations moyennes annuelles de BC, d'inorganiques, d'organiques respectivement, ainsi que les différences relatives entre le scénario FAP (S1) et la simulation de référence.

Le BC est un composé inerte et émis principalement par le trafic routier. Les plus fortes concentrations sont donc observées dans Paris et le long des axes routiers (Figure 60) avec des concentrations entre 0 et $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dans la simulation de référence. Il s'agit cependant de concentrations moyennées annuellement et sur les mailles, très inférieures à celles mesurées en bordure de route. Les concentrations sont inférieures à $0,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur la majorité de l'Île-de-France dans le scénario de référence. Le scénario FAP (S1) induit une forte réduction des concentrations (jusqu'à -47 %).

Par rapport au scénario FAP (S1), le scénario Essence (S2) induit une réduction supplémentaire qui va jusqu'à -17 % le long des axes routiers. Les deux-roues émettant peu de particules primaires, le scénario S1 – 2R élec influence peu les concentrations de BC.

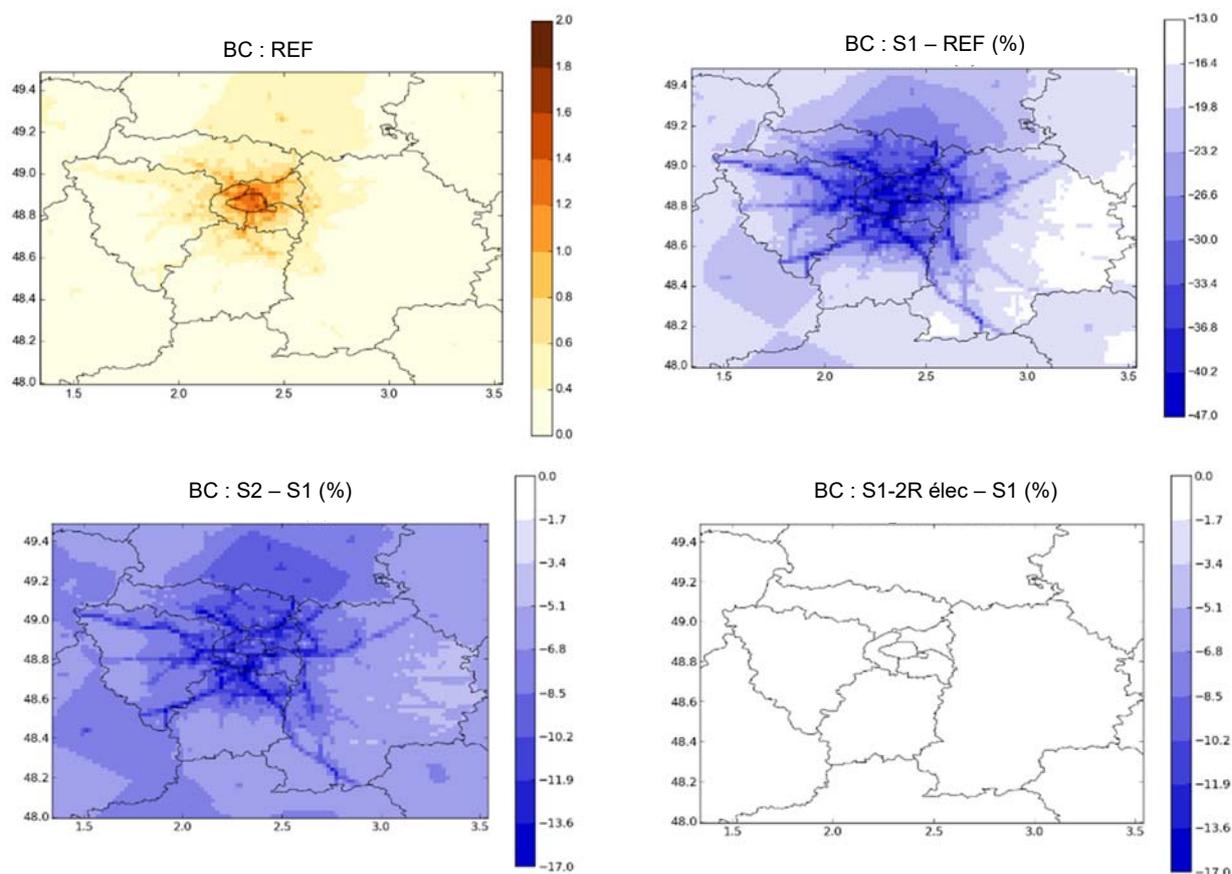


Figure 60 : Concentrations moyennes annuelles en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de BC sur l'Île-de-France (en haut à gauche). Différences relatives entre les concentrations moyennes du scénario FAP (S1) et les concentrations de la simulation de référence en % (en haut à droite). Différences relatives entre les concentrations annuelles des scénarios Essence (S2) et S1 – 2R élec et les concentrations annuelles du scénario FAP (S1) en % (en bas)

Les inorganiques sont des polluants secondaires qui se forment principalement par la condensation d'acide nitrique et d'ammoniac (NH_3) en Île-de-France (dans d'autres régions, les sulfates peuvent être prédominants). Leur concentration est relativement uniforme sur l'Île-de-France, avec des niveaux partout supérieurs à $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dans le scénario de référence (Figure 61). Le scénario FAP (S1) induit une réduction des concentrations en inorganiques entre -3 et -10 %. Cette réduction est une conséquence de la baisse des émissions de NO_x , qui réduit les concentrations en acide nitrique (précurseur des inorganiques). Ainsi, la baisse la plus marquée se situe dans Paris, mais la réduction le long des axes routiers est moins visible que pour les $\text{PM}_{2,5}$.

Par rapport au scénario FAP (S1), le scénario Essence (S2) induit une baisse de quelques pourcents supplémentaires des concentrations en inorganiques. Cette baisse est due à la diminution plus forte des émissions de NO_2 (section 5.2.5) et en partie à la baisse des concentrations d'inorganiques sur la France dans ce scénario Essence (S2), comparé au scénario FAP (S1) (section 6.3.3 du chapitre suivant analysant les simulations sur la France). Cette baisse est légèrement plus faible dans Paris et le long du Boulevard Périphérique, car les oxydants de gaz précurseurs d'aérosols inorganiques secondaires (ex : nitrate d'ammonium) y sont plus élevés dans le scénario Essence (S2) que dans le scénario FAP (S1).

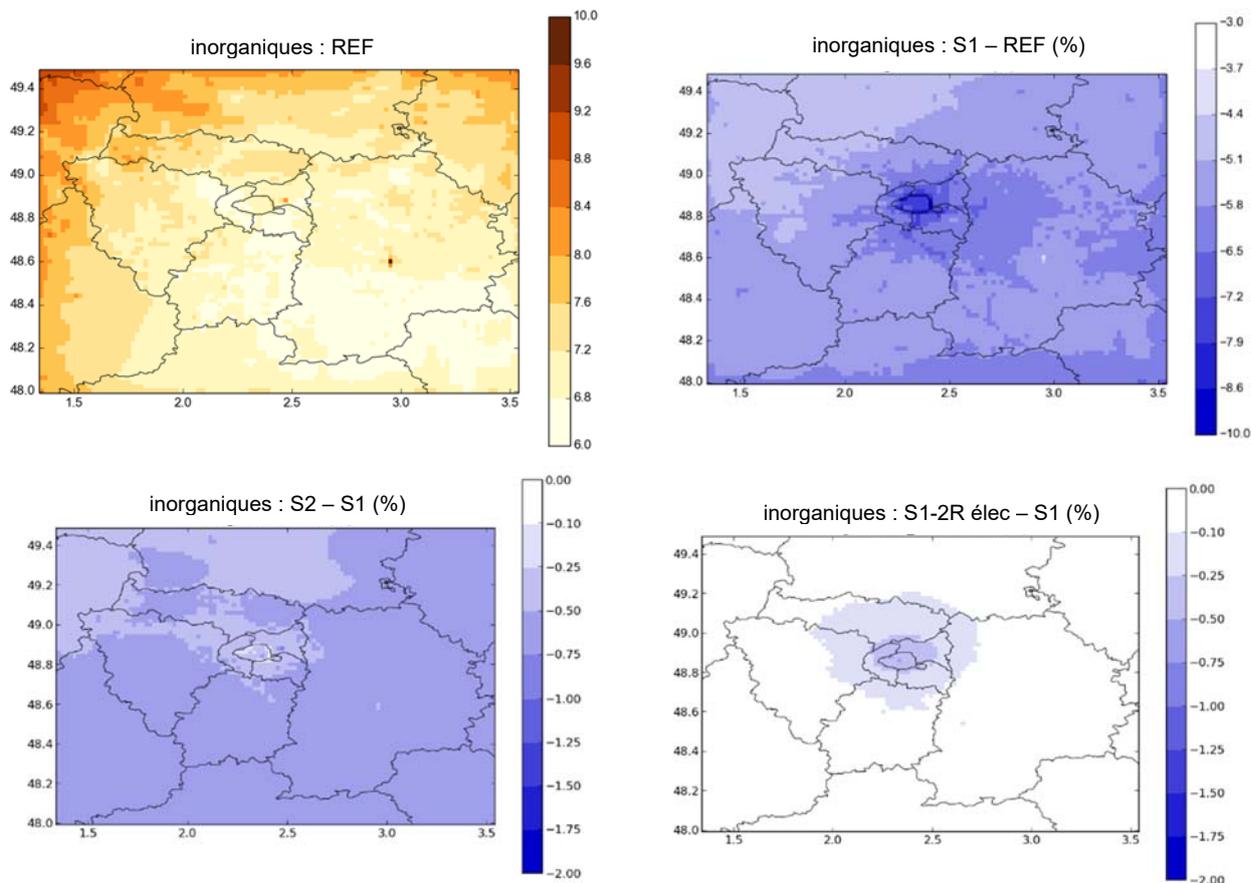


Figure 61 : Concentrations moyennes annuelles en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ des inorganiques sur l'Île-de-France (en haut à gauche). Différences relatives entre les concentrations moyennes du scénario FAP (S1) et les concentrations de la simulation de référence en % (en haut à droite). Différences relatives entre les concentrations annuelles des scénarios Essence (S2) et S1 – 2R élec et les concentrations annuelles du scénario FAP (S1) en % (en bas)

Les organiques sont en grande partie des polluants secondaires. Leurs concentrations sont supérieures à $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur toute l'Île-de-France dans le scénario de référence (Figure 62). De plus fortes concentrations sont observées dans Paris, à cause des émissions de COV et COSV anthropiques, ainsi qu'à proximité de la forêt de Fontainebleau (Sud-Ouest), du parc naturel de la haute vallée de Chevreuse (Sud-Est) et du parc régional de l'Oise (nord de l'Île-de-France). À proximité de ces forêts, les organiques sont formés par l'oxydation des COV biogéniques émis par les forêts. Les composés oxydés partitionnent sur les particules (ils se partagent entre la phase gazeuse et la phase particulaire).

Les scénarios induisent une réduction des concentrations d'organiques dans Paris, le long des axes routiers, mais également à proximité des forêts et parcs naturels. Le long des axes routiers, la baisse est due à la baisse des émissions de COSV, tandis qu'à proximité des forêts, la baisse est due à une baisse des oxydants due à la baisse des émissions de NOx.

Comparé au scénario FAP (S1), le scénario Essence (S2) entraîne une légère baisse supplémentaire des concentrations en organiques (jusqu'à -1,5 %), notamment le long des axes routiers. Cette baisse est cependant encore plus limitée dans Paris où le scénario Essence (S2) induit une augmentation des oxydants. Cette baisse supplémentaire du scénario Essence (S2) par rapport au scénario FAP (S1) est due à une baisse plus importante des émissions de COSV, précurseurs d'aérosols organiques. Le scénario S1 – 2R élec entraîne une diminution plus marquée des concentrations d'organiques dans Paris (-2 %), liée à la baisse des émissions de COV dans ce scénario, ce qui induit une diminution des oxydants et donc des organiques secondaires.

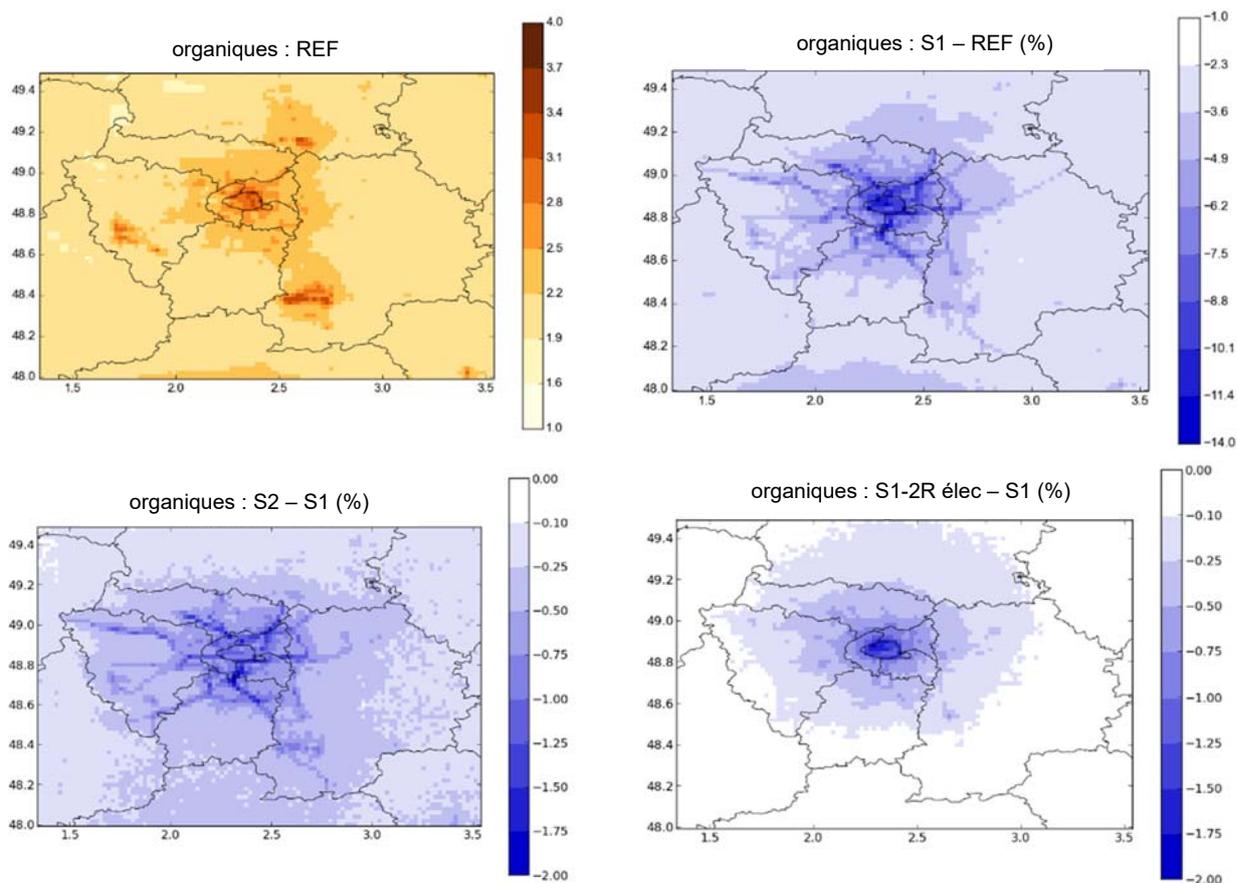


Figure 62 : Concentrations moyennes annuelles en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ des organiques sur l'Île-de-France (en haut à gauche). Différences relatives entre les concentrations moyennes du scénario FAP (S1) et les concentrations de la simulation de référence en % (en haut à droite). Différences relatives entre les concentrations annuelles des scénarios Essence (S2) et S1 – 2R élec et les concentrations annuelles du scénario FAP (S1) en % (en bas)

Pour la simulation de référence et les différents scénarios, le Tableau 36 montre différentes statistiques des concentrations sur l'Île-de-France. La concentration moyenne annuelle ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) est donnée pour chacun des polluants d'intérêt, ainsi que l'écart type correspondant à la variation spatiale des concentrations annuelles. L'écart type pour le NO_2 et le BC est très grand (du même ordre de grandeur que la moyenne annuelle), car ce sont des polluants de proximité, principalement émis par le trafic. Les polluants tels que l' O_3 et les particules inorganiques ont un écart type plus faible par rapport à la moyenne annuelle, car ce sont des polluants dits secondaires se formant à distance des sources d'émission.

Concernant les $\text{PM}_{2,5}$, les seuils long terme $\text{VG-OMS}_{\text{LT}}$ et court terme $\text{VG-OMS}_{\text{CT}}$ établis à partir des valeurs guides de qualité de l'air ambiant de l'OMS discutés en section 4.7 et définis dans le Tableau 13 ont été utilisés pour quantifier l'influence des scénarios sur les niveaux de concentrations en $\text{PM}_{2,5}$. Ils sont rappelés en tête du Tableau 36.

Le Tableau 36 montre pour chacun des seuils (seuil long terme $\text{VG-OMS}_{\text{LT}}$, seuil court terme $\text{VG-OMS}_{\text{CT}}$) le pourcentage des mailles d'Île-de-France où la concentration en $\text{PM}_{2,5}$ dépasse le seuil. Dans la simulation de référence, le seuil $\text{VG-OMS}_{\text{LT}}$ est dépassé sur toutes les mailles. Le seuil $\text{VG-OMS}_{\text{CT}}$ est dépassé sur environ 4 % des mailles.

Tableau 36 : Statistiques des concentrations pour les différents scénarios – Île-de-France (en µg/m³, sauf pour le nombre de particules PNC en #/cm³)

	PM _{2,5}	PM ₁₀	PM ₁₀ inorg.	PM ₁₀ org.	BC	PNC*	NO ₂	O ₃
Seuil long terme (VG-OMS _{LT})	10	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Seuil court terme (VG-OMS _{CT})	25	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Référence								
Conc. Moyenne	12,3	13,1	7,0	2,2	0,4	13319	6,7	75,5
Ecart type (var. spat.)	1,1	1,4	0,3	0,2	0,2	806	5,3	2,9
P98 réf	27,9	29,9	16,5	6,0	1,3	43316	35,5	126,3
> VG-OMS _{LT} (%)	100,0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
> VG-OMS _{CT} (%)	3,6	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
> P98 réf (%)	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Scénario S1 (généralisation du filtre à particules - FAP)								
Conc. Moyenne	11,7	12,5	6,6	2,1	0,3	12873	4,0	75,9
Variation p.r. réf (%)	-5,0	-4,8	-5,7	-4,1	-26,8	-3,3	-40,5	0,6
P98	27,2	29,1	15,9	5,8	0,8	41416	18,0	125,7
> VG-OMS _{LT} (%)	100,0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Variation p.r. réf (%)	0,0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
> VG-OMS _{CT} (%)	3,1	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Variation p.r. réf (%)	-15,1	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
> P98 réf (%)	1,8	1,8	1,7	1,8	0,5	1,6	0,3	1,8
Variation p.r. réf (%)	-10,5	-11,2	-16,9	-12,2	-73,0	-21,0	-84,6	-7,4
Scénario S1 - 2R élec (idem S1, mais annulation des émissions des deux-roues)								
Conc. Moyenne	11,7	12,5	6,6	2,1	0,3	12869	3,7	76,0
Variation p.r. réf (%)	-5,0	-4,8	-5,7	-4,3	-27,0	-3,4	-45,1	0,7
P98	27,2	29,1	15,8	5,8	0,8	41416	16,2	125,6
> VG-OMS _{LT} (%)	100,0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Variation p.r. réf (%)	0,0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
> VG-OMS _{CT} (%)	3,1	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Variation p.r. réf (%)	-14,3	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
> P98 réf (%)	1,8	1,8	1,6	1,7	0,5	1,6	0,2	1,8
Variation p.r. réf (%)	-10,7	-10,6	-20,4	-13,5	-73,1	-21,0	-89,8	-9,0
Scénario S2 (promotion des motorisations essence des véhicules légers)								
Conc. Moyenne	11,6	12,4	6,5	2,1	0,3	12774	4,0	75,9
Variation p.r. réf (%)	-5,6	-5,3	-6,2	-4,5	-32,6	-4,1	-40,8	0,6
P98	27,2	29,1	15,8	6,6	1,3	41276	17,9	125,3
> VG-OMS _{LT} (%)	100,0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Variation p.r. réf (%)	0,0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
> VG-OMS _{CT} (%)	3,0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Variation p.r. réf (%)	-15,4	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
> P98 réf (%)	1,8	1,8	1,6	1,7	0,4	1,5	0,3	1,8
Variation p.r. réf (%)	-11,8	-11,6	-21,2	-14,2	-77,9	-22,5	-85,0	-12,4

* PNC : concentration en nombre de particules par cm³ d'air n/a : non applicable

Les statistiques du Tableau 36 corroborent les analyses faites à partir des cartes. À part pour l'O₃, les concentrations diminuent pour chacun des scénarios comparés à la référence. Les scénarios influencent plus les fortes concentrations journalières et horaires que les concentrations moyennes annuelles. Ainsi, les scénarios réduisent plus fortement les occurrences de dépassement de seuils court terme (VG-OMS_{CT}, P98réf) que les concentrations moyennes annuelles.

Concernant les statistiques du scénario FAP (S1), bien que la concentration moyenne d'O₃ augmente par rapport à la référence (+0,6 %), les fortes concentrations, i.e. les occurrences de dépassement du seuil P98réf, diminuent (-7,4 %).

Les plus fortes différences entre les scénarios et la référence sont observées pour le NO₂ (pour le scénario FAP (S1) : -41 % en moyenne annuelle, -85 % pour les occurrences de dépassement du seuil P98réf pour les plus fortes concentrations horaires) et le BC (pour le scénario FAP (S1) : -27 % en moyenne annuelle, -73 % pour les occurrences du seuil P98réf). Pour les particules (PM_{2,5}, PM₁₀) et les composés secondaires des particules (inorganiques, organiques), la baisse des concentrations moyennes annuelles est plus faible (entre -4 % et -6 % pour le scénario FAP (S1)), tandis que la baisse des occurrences de dépassements du seuil P98réf est plus importante (de -11 % à -17 % pour le scénario FAP (S1)). Concernant le seuil VG-OMS_{LT}, il reste dépassé pour les PM_{2,5} sur toutes les mailles dans le scénario FAP (S1) alors que le seuil VG-OMS_{CT} est dépassé sur 3,1 % des mailles contre 3,6 % dans le scénario de référence. Le nombre de particules baisse également légèrement en moyenne annuelle (-3 %), et de manière plus importante pour les occurrences de dépassements du seuil P98réf (-21 %).

Les statistiques du scénario S1-2R élec sont très proches de celles du scénario FAP (S1). Le scénario S1-2R élec induit toutefois une très légère baisse des concentrations et des occurrences de dépassements de seuils comparé au scénario FAP (S1) pour les différents polluants, et une légère diminution de l'augmentation d'O₃. Les plus grosses différences sont observées dans Paris, où le régime chimique est fortement limité en COV (Figure 56).

Comme l'avait montré l'analyse des cartes ci-dessus, les statistiques du scénario Essence (S2) sont également proches de celles du scénario FAP (S1), les différences étant plus importantes que celles observées entre le scénario S1-2R élec et le scénario FAP (S1). L'augmentation d'O₃ en moyenne annuelle est légèrement plus forte dans le scénario Essence (S2) que dans le scénario FAP (S1), mais les fortes concentrations sont plus réduites. En effet, l'augmentation d'O₃ concerne surtout Paris et sa périphérie, qui est en régime COV limité, et le scénario Essence (S2) émet légèrement plus de COV que le scénario FAP (S1). Cependant, les fortes concentrations concernent surtout les zones en dehors de Paris qui sont majoritairement en régime chimique NOx limité. Ainsi, le scénario Essence (S2), qui émet légèrement moins de NOx que le scénario FAP (S1), est plus favorable.

Pour les différents polluants, le scénario Essence (S2) est toujours plus favorable que le scénario FAP (S1), bien que les différences soient faibles. Les différences les plus importantes sont observées pour BC, car c'est un polluant inerte dont les émissions sont nettement réduites dans le scénario Essence (S2) comparé au scénario FAP (S1).

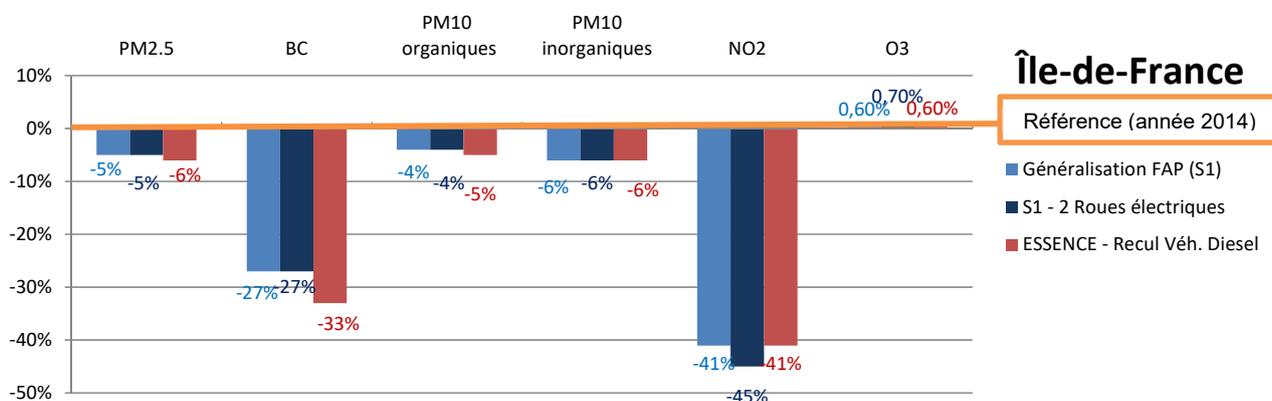
Pour les organiques, le scénario Essence (S2) entraîne une diminution plus importante des concentrations que le scénario FAP (S1), même pour les fortes concentrations le long des routes ou dans Paris, et ce, bien que les concentrations d'O₃ et des oxydants y soient plus élevées. Cette diminution est due principalement aux plus faibles émissions de COSV qui sont supposées être proportionnelles aux émissions de particules organiques (OM). Or, les émissions de OM sont plus réduites dans le scénario Essence (S2) que dans le scénario FAP (S1).

Pour les inorganiques, le scénario Essence (S2) entraîne une diminution plus importante des concentrations que le scénario FAP (S1) car les émissions et les concentrations de NOx sont sensiblement réduites. La réduction des NOx induit une diminution des concentrations d'acide nitrique (HNO₃). Les inorganiques en Île-de-France sont surtout composés de nitrate d'ammonium dont la formation est limitée par les concentrations en HNO₃ (Sartelet et al. 2007a). Ainsi, une diminution des concentrations de NOx induit une diminution des concentrations de HNO₃ et en conséquence une diminution des concentrations d'inorganiques.

Comme pour les émissions, des tests statistiques (tests des signes et Wilcoxon-signé) ont été appliqués aux données annuelles de concentrations par maille de l'Île-de-France (mailles de 2 km x 2 km ici). Cependant, ni les mailles sans trafic, ni le périmètre intra-A86 n'ont été considérés spécifiquement dans ce cas. Les niveaux de concentrations simulées de NO₂, O₃, BC, PM₁₀, PM_{2,5}, composés inorganiques et composés organiques ont été analysés systématiquement dans la comparaison deux à deux des scénarios de référence, FAP (S1) et Essence (S2). Les tests

concluent à des écarts significatifs (intervalle de confiance à 95 %) pour tous les polluants et toutes les combinaisons de ces trois scénarios.

La Figure 63 résume l'évolution des concentrations moyennes annuelles de polluants gazeux et particulaires à l'échelle de l'Île-de-France au travers des différents scénarios simulés, par rapport au scénario de référence (année 2014).



* Les concentrations simulées des composés des particules (BC, composés organiques et inorganiques) correspondent techniquement à la fraction PM₁₀. Dans la pratique, ils sont dans leur quasi-totalité dans la fraction PM_{2,5}, la surface de condensation étant beaucoup plus importante.

Figure 63 : Comparaison des concentrations moyennes annuelles ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de PM_{2,5}, BC, PM₁₀ organiques, PM₁₀ inorganiques, NO₂ et O₃ : différences relatives (en %) entre les scénarios prospectifs et le scénario de référence, en Île-de-France

5.3.4 Analyses mensuelles et par territoire

Les analyses précédentes ont été faites en moyenne sur toute une année. Cependant, elles cachent des disparités saisonnières, liées notamment aux caractéristiques météorologiques. Ces différences saisonnières impactent surtout les composés secondaires : O₃, les composés inorganiques et organiques des particules.

Comme vu précédemment, en moyenne sur l'Île-de-France, l'O₃ augmente légèrement dans les scénarios comparés à la référence, tandis que les occurrences de dépassements de seuils diminuent. Comme le montre la Figure 64, les variations d'O₃ cachent des disparités saisonnières : les concentrations d'O₃ sont plus fortes avec les scénarios sur la période d'octobre à avril, tandis qu'elles sont inférieures aux concentrations du scénario de référence entre avril et septembre. C'est aussi sur ces mois (avril à septembre) que les niveaux de O₃ sont les plus élevés.

Ces variations saisonnières sont liées aux changements de régime chimique sur l'Île-de-France : en hiver, en moyenne, l'Île-de-France est plutôt dans un régime limité en COV ; la réduction des NOx induite par les scénarios entraîne donc une augmentation de l'O₃. Par contre, en été, les concentrations de COV sont élevées à cause des émissions biogéniques qui augmentent avec la température et l'ensoleillement. Ainsi, en moyenne, l'Île-de-France est plutôt dans un régime limité en NOx en été ; la réduction des NOx induits par les scénarios entraîne alors une diminution de l'O₃. Ces variations de régime chimique sont valables en moyenne à l'échelle de l'Île-de-France. Cependant, sur des domaines plus urbanisés comme celui à l'intérieur de l'A86 (Figure 65), l'O₃ augmente toute l'année et le régime chimique est toujours limité en COV.

Pour les quatre premiers mois de l'année pour lesquels l'O₃ augmente en moyenne sur l'Île-de-France avec les scénarios prospectifs, deux simulations de sensibilité aux COV ont été effectuées : dans la première, les émissions de COV hors trafic ont été divisées par 2 sur l'Île-de-France ; dans la seconde, elles ont été divisées par 2 sur la France et l'Île-de-France. Les baisses des concentrations d'O₃ sont plus importantes lorsque les émissions de COV sont réduites simultanément sur la France et l'Île-de-France. Cependant, pour le domaine à l'intérieur de l'A86,

les réductions d'O₃ sont similaires, que la réduction des émissions de COV ait été appliquée sur la France entière ou sur l'Île-de-France seulement. En d'autres termes et concernant les concentrations d'O₃, le domaine intra-A86 dépend moins que le reste de l'Île-de-France des concentrations transportées d'autres régions. Cependant, la baisse des concentrations d'O₃ engendrée par ces réductions des émissions de COV est plus faible que l'augmentation induite par les réductions des émissions de NO_x dans les scénarios.

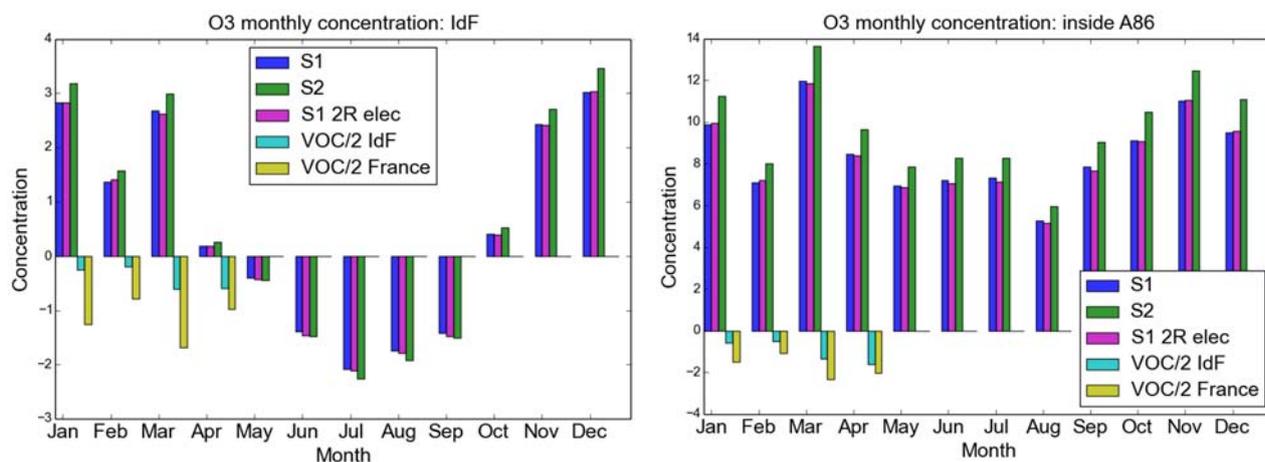


Figure 64 : Différences mensuelles en µg/m³ entre les concentrations d'O₃ simulées avec les différents scénarios : FAP (S1), Essence (S2), S1 – 2R élec, et réduction par 2 sur Île-de-France / France des émissions de COV hors trafic, et la simulation de référence sur l'Île-de-France (à gauche) et sur le domaine intra-A86 (à droite)

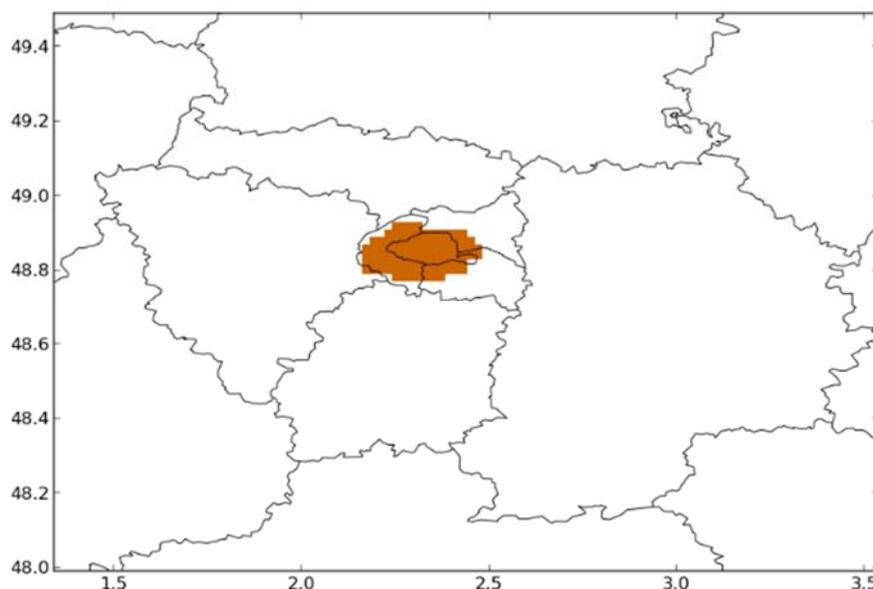


Figure 65 : Mailles prises en compte lors des calculs des statistiques dans le domaine intra A86 (en orange foncé)

Bien que les concentrations d'O₃ augmentent en hiver en Île-de-France et toute l'année dans le domaine intra-A86, les concentrations en organiques (Figure 66) et inorganiques (Figure 67) diminuent pour tous les scénarios toute l'année en moyenne mensuelle. Comme vu précédemment,

ces diminutions sont dues à la baisse des émissions de NOx pour les inorganiques et à la baisse des émissions de COSV pour les organiques.

Les diminutions dans le domaine intra-A86 sont légèrement plus importantes que sur l'Île-de-France et le scénario Essence (S2) est plus favorable que le scénario FAP (S1). Bien que le scénario S1-2R élec mène à des concentrations similaires à celles du scénario FAP (S1) sur l'Île-de-France, les différences sont plus marquées dans le domaine intra-A86, en particulier pour les organiques, et les réductions de concentrations du scénario S1-2R élec sont similaires à celles simulées dans le scénario Essence (S2). En effet, dans le scénario S1-2R élec, les émissions de COV sont réduites comparées au scénario FAP (S1), menant à une réduction des oxydants dans le domaine intra-A86 qui est limité en COV.

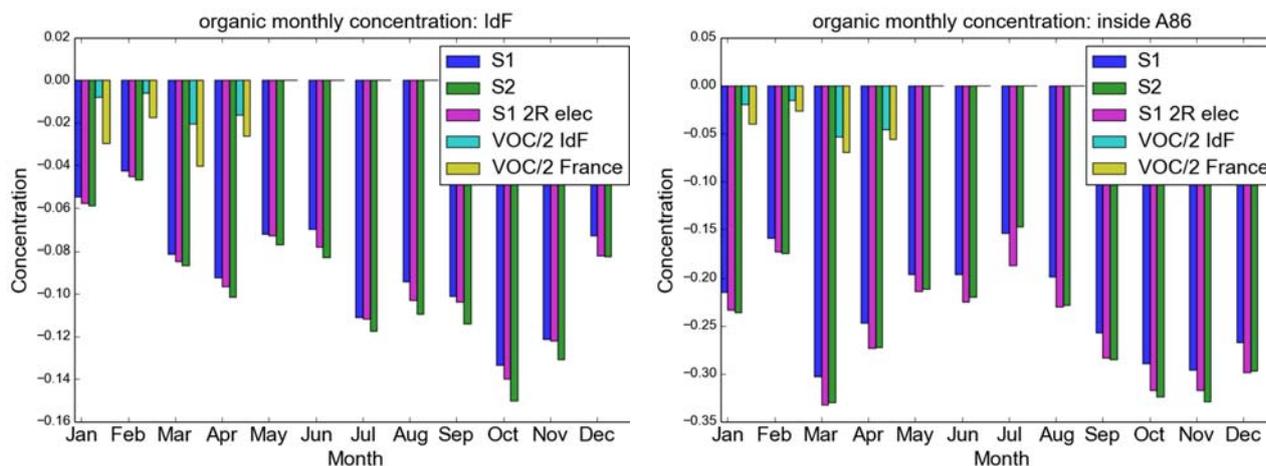


Figure 66 : Différences mensuelles en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ entre les concentrations d'organiques simulées avec les différents scénarios : FAP (S1), Essence (S2), S1-2R élec, et réduction par 2 sur Île-de-France / France des émissions de COV hors trafic, et la simulation de référence sur l'Île-de-France (à gauche) et sur le domaine intra-A86 (à droite)

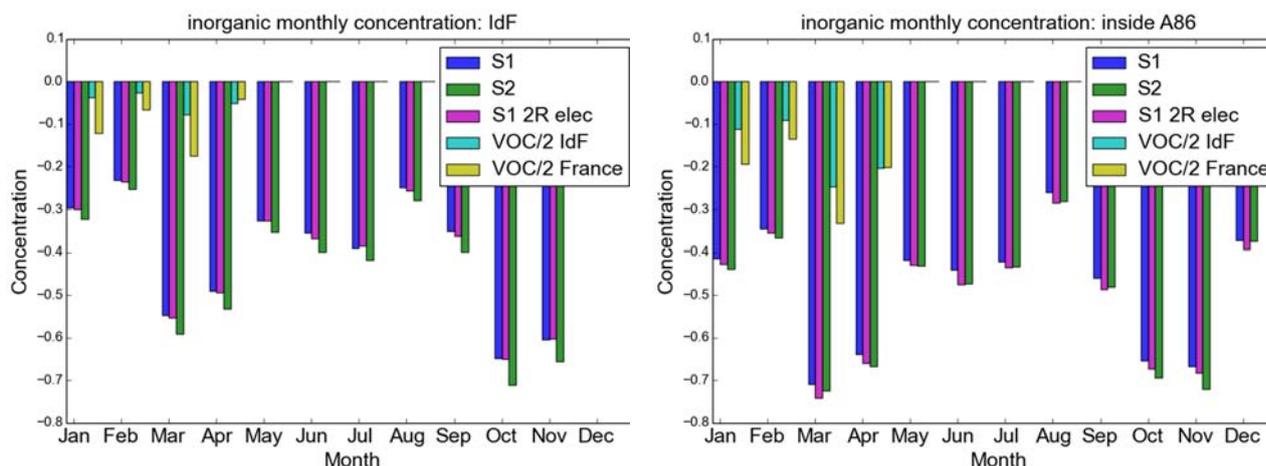


Figure 67 : Différences mensuelles en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ entre les concentrations d'inorganiques simulées avec les différents scénarios : FAP (S1), Essence (S2), S1-2R élec, et réduction par 2 sur Île-de-France / France des émissions de COV hors trafic, et la simulation de référence sur l'Île-de-France (à gauche) et sur le domaine intra-A86 (à droite)

5.4 Expositions (croisement population / concentrations)

La région Île-de-France est composée d'un cœur fortement urbanisé, présentant une densité de population parmi les plus fortes d'Europe, entourée d'une zone rurale principalement agricole ou forestière et donc faiblement peuplée.

La densité de population est la plus forte dans Paris et, dans une moindre mesure, dans la petite couronne, avec un maximum dans le nord parisien (Figure 68).

Dans cette section, les variations des concentrations de polluants (PM_{10} et NO_2) simulées précédemment sont analysées conjointement avec la densité de population en vue d'estimer un impact potentiel des scénarios sur l'exposition à la pollution.

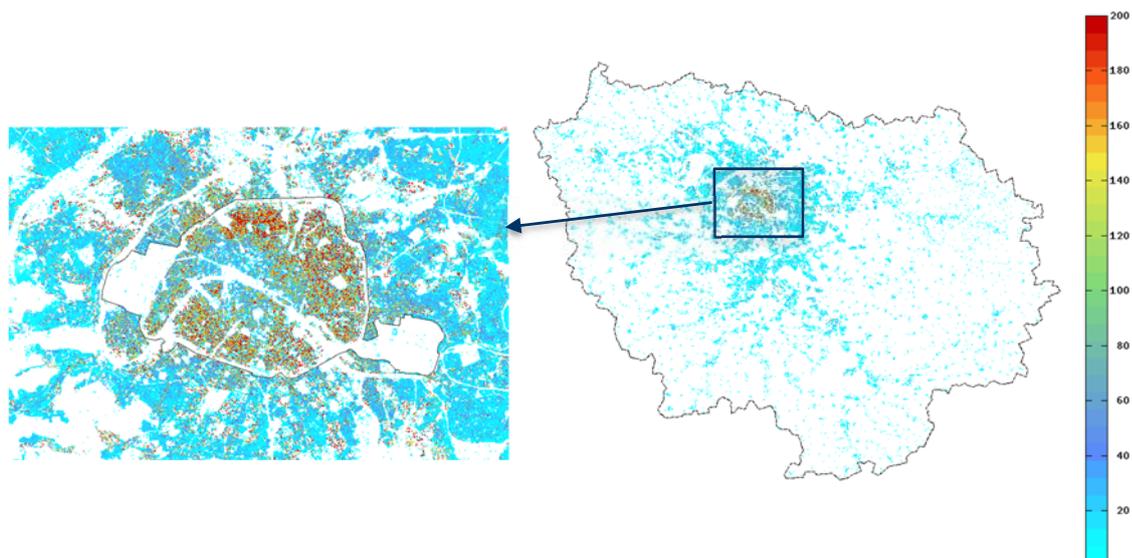


Figure 68 : Densité de population de la région Île-de-France (INSEE 2011) en nombre d'habitants par maille de 50 x 50 m. Zoom sur Paris

Les gains en concentrations de PM_{10} (Figure 69) obtenus avec les scénarios FAP (S1) et Essence (S2) sont constatés principalement le long des grands axes routiers et au sein du cœur dense de l'agglomération parisienne. Les gains les plus forts, allant jusqu'à $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sont observés dans le Nord-Ouest et le Sud-Est parisien, et particulièrement avec le scénario Essence (S2).

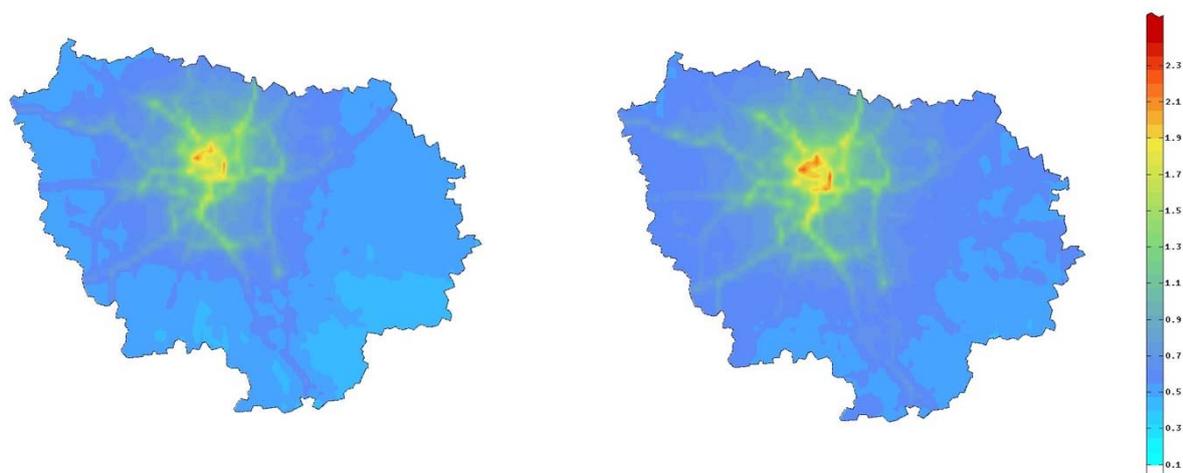


Figure 69 : Différences de concentrations moyennes annuelles de PM_{10} (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) entre les scénarios FAP généralisation du filtre à particules (S1) et référence (gauche), et entre les scénarios Essence (S2) et référence (droite)

Les gains les plus élevés concernent les zones de forte densité (Figure 68) ; la qualité de l'air s'améliore ainsi dans les zones les plus peuplées. Au cœur de l'Île-de-France, une grande partie de la population vit à proximité d'un axe routier⁵⁸, les améliorations de la qualité de l'air dues aux mesures sur le trafic routier impactent donc potentiellement un grand nombre d'habitants.

Les gains en concentrations de NO₂ peuvent dépasser les 20 µg/m³ dans le cœur dense de l'agglomération parisienne et le long des principaux axes routiers. Les gains les plus importants sont observés avec le scénario Essence (S2) et particulièrement dans Paris, Nord-Ouest et Sud-Est. Comme pour les PM₁₀, ces gains concernent principalement les zones densément peuplées (Figure 70).

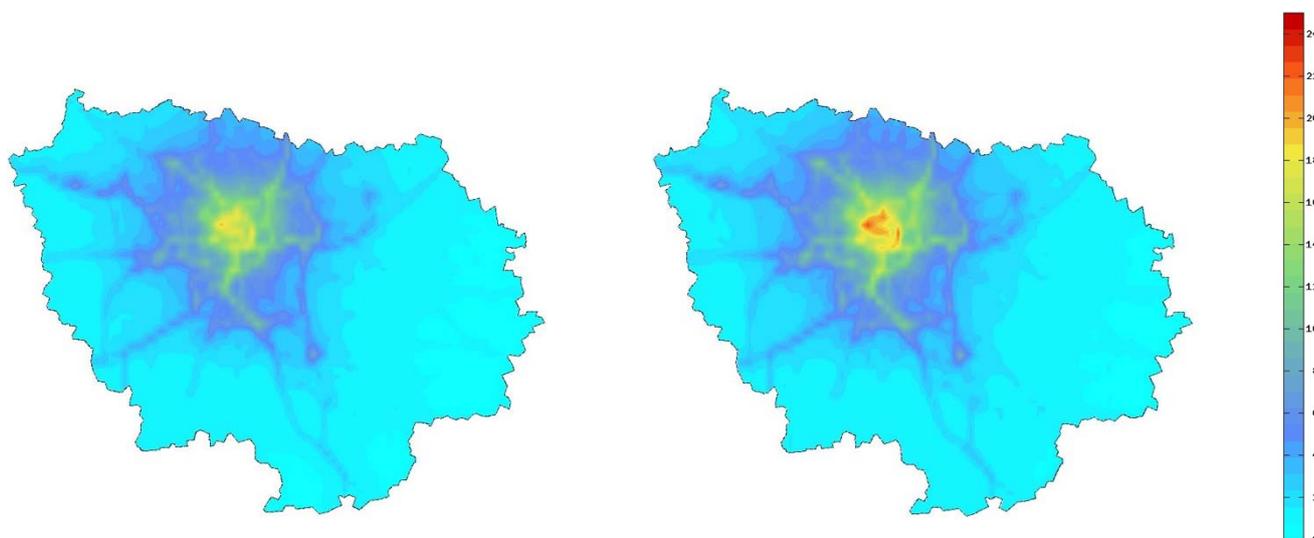


Figure 70 : Différences de concentrations moyennes annuelles de NO₂ (en µg/m³) entre les scénarios FAP (S1) et référence (gauche) et entre les scénarios Essence (S2) et référence (droite)

Les histogrammes de la Figure 71 confirment cette tendance. Pour les PM₁₀, l'ensemble de la population d'Île-de-France réside dans un lieu où la concentration moyenne annuelle dans l'air ambiant extérieur diminue d'au moins 0,4 µg/m³ avec les scénarios FAP (S1) et Essence (S2). Cette diminution atteint au moins 1,2 µg/m³ pour 39 % de la population avec le scénario FAP (S1) et 47 % pour le scénario Essence (S2). La diminution maximale d'au moins 2 µg/m³ est atteinte pour 0,4 % de la population avec le scénario FAP (S1) et 1,6 % avec le scénario Essence (S2).

Pour NO₂, la diminution maximale d'au moins 18 µg/m³ en concentration moyenne annuelle dans l'air ambiant extérieur est atteinte pour 1,4 % de la population avec le scénario FAP (S1) et 11 % avec le scénario Essence (S2). La tendance est néanmoins à une diminution importante des concentrations de NO₂ pour une grande partie de la population. Ainsi, 42 % de la population bénéficient d'une diminution d'au moins 10 µg/m³ dans le scénario FAP (S1), et 49 % avec le scénario Essence (S2).

Pour les deux polluants, les gains les plus importants sont observés avec le scénario Essence (S2). Le scénario S1-2R élec (deux-roues électriques) apporte un gain significatif par rapport au scénario FAP (S1), en particulier pour les PM₁₀. Les deux-roues étant très présents dans le cœur de Paris, le remplacement des deux-roues à moteur thermique par des deux-roues électriques aurait un impact important sur le nombre de personnes exposées.

⁵⁸ À Paris et en proche couronne, plus de la moitié de la population réside à moins de 150 mètres d'un axe à fort trafic routier et environ un tiers à moins de 75 mètres (ORS IdF, 2012). En Île-de-France, 55 % des crèches, écoles, structures d'hébergement des personnes âgées, hôpitaux, mais aussi terrains de sport en plein air sont situés à moins de 500 mètres d'un axe routier majeur (Airparif 2012c).

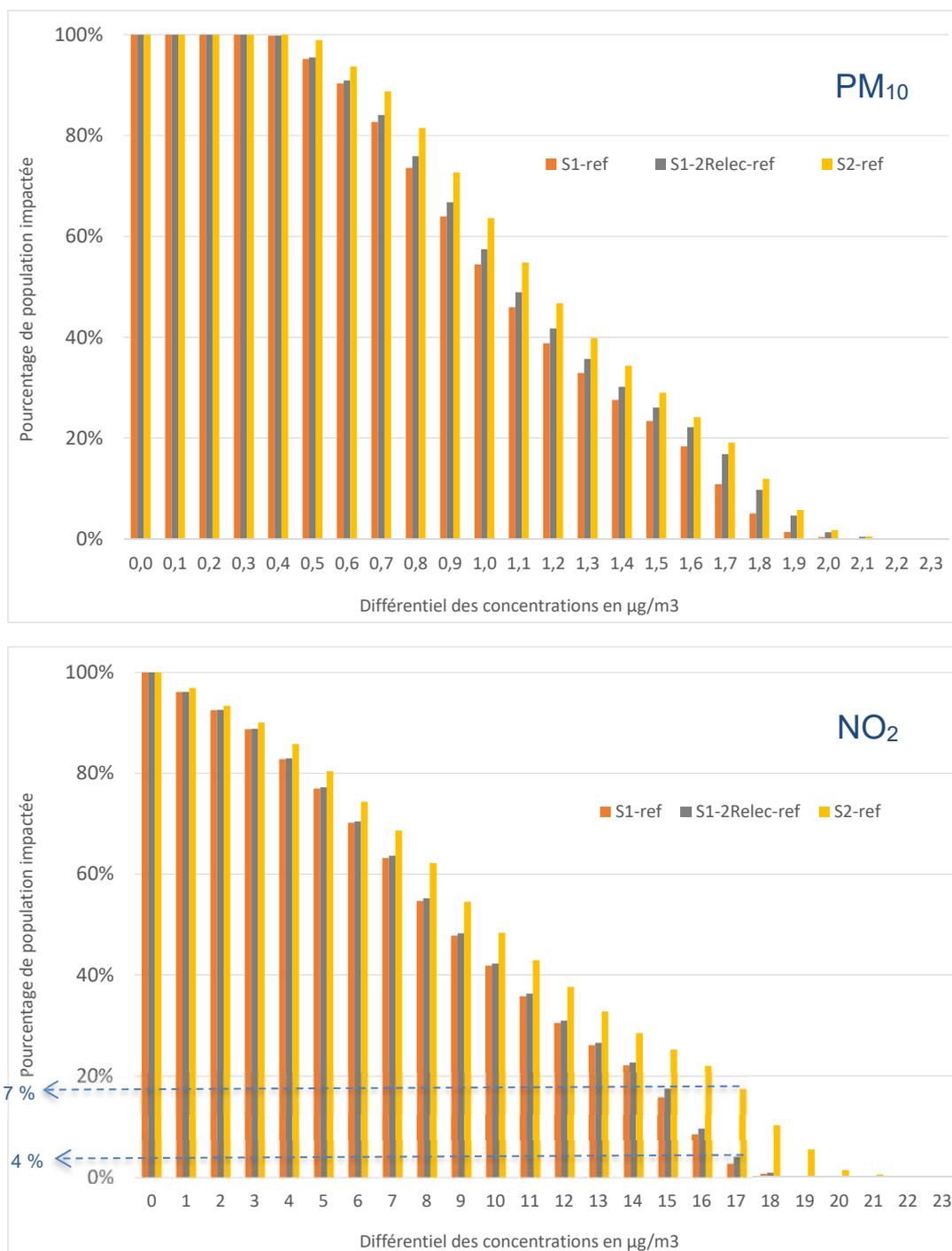


Figure 71 : Pourcentage de population impactée selon la diminution minimale (différentiel) de la concentration moyenne annuelle de PM₁₀ (figure du haut) et de NO₂ (figure du bas). Diminutions minimales selon les scénarios FAP (S1 - généralisation des FAP), S1-2R élec (idem FAP (S1) avec uniquement des deux-roues électriques) et Essence (S2)

Lecture des histogrammes : 100 % de la population résident dans un lieu où les scénarios FAP (S1), S1-2R élec et Essence (S2) entraînent une diminution de la concentration moyenne annuelle de NO₂ dans l'air ambiant extérieur supérieure à 0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. 17 % de la population résident dans un lieu où la diminution est d'au moins 17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ avec le scénario Essence (S2) alors que l'impact est plus faible pour les scénarios FAP (S1) et S1-2R élec où cette diminution concerne respectivement 3 % et 4 % de la population.

Le croisement entre les données de concentrations et les données de population permet de rendre compte de l'impact sur les populations des différents scénarios. Ainsi, à l'échelle de l'Île-de-France, les scénarios FAP (S1) et Essence (S2) diminuent d'environ 0,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (environ 5 %, Tableau 36)

les concentrations moyennes annuelles de PM₁₀. Ces diminutions sont relativement faibles à l'échelle de la région. Néanmoins, les diminutions les plus importantes ont lieu dans le cœur dense de l'agglomération et à proximité des axes routiers et ont donc un impact fort sur de nombreux Franciliens.

Ainsi, pour plus de la moitié des Franciliens, les deux scénarios FAP (S1) et Essence (S2) diminuent d'au moins 1 µg/m³ les concentrations moyennes annuelles de PM₁₀ dans l'air. Des diminutions nettement plus importantes des concentrations seraient observées pour les Franciliens résidant à proximité directe d'un axe puisque cette valeur représente une moyenne sur une maille de 1 km².

Dans le cas du NO₂, c'est une baisse d'au moins 8 µg/m³ des concentrations moyennes annuelles de ce polluant qui serait observée pour plus de la moitié des Franciliens grâce aux deux scénarios envisagés.

5.5 Comparaison avec d'autres travaux (études d'impacts)

5.5.1 Plan de déplacements urbains de l'Île-de-France

L'évaluation du plan de déplacements urbains de l'Île-de-France (PDUIF) a été effectuée en 2008-2009, en prenant pour référence l'année 2005 et à l'horizon 2020. Cette évaluation s'est faite sur la base d'une simulation des déplacements et trafics aux deux horizons. L'ensemble des hypothèses et des travaux est décrit dans des rapports du Syndicat des Transports d'Île-de-France (STIF 2012) et d'Airparif (2011) pour la partie plus spécifiquement dédiée à la qualité de l'air.

Le plan de déplacements urbains (PDU) s'inscrit dans un contexte démographique, socio-économique et d'évolution du territoire, et regroupe un ensemble de mesures, investissements, extensions et réorganisation de réseaux (métros, tramways, transport collectif), etc. dont il est difficile de décliner précisément les hypothèses au travers des rapports disponibles.

Globalement, le PDU prévoit une augmentation globale de 7 % des déplacements, principalement dans l'agglomération centrale (plus limitée dans les autres pôles, bourgs, villages, etc.). Cette croissance se reporte principalement sur les transports collectifs (+20 %) et les modes actifs (+10 %) tandis que les voitures et deux-roues motorisés seraient en recul de -2 %.

L'évaluation de l'impact du PDUIF sur les émissions de polluants a pu être quantifiée (Tableau 37), tandis qu'il est très difficile d'apprécier les gains sur les concentrations en raison de difficultés de l'évaluation et du fait que les niveaux de pollution de fond ont été considérés comme restant élevés sur la période.

D'après les estimations, des réductions considérables d'émissions sont dues au seul renouvellement du parc automobile à horizon 2020 : -60 % de réduction des NO_x et PM₁₀, -85 % de PM_{2,5} (Tableau 37). Le PDUIF en lui-même conduit à quelques réductions supplémentaires de l'ordre de -4 à -7 % selon les polluants et les scénarios.

Mise à part cette évaluation globale du PDUIF, les impacts des différentes options qui le constituent ne sont pas quantifiés.

Tableau 37 : Évolution des émissions de polluants du trafic selon le rapport environnemental du plan de déplacement urbain de l'Île-de-France (STIF 2012)

Évolution entre 2005 et 2020	NO _x	NO ₂	PM ₁₀	PM _{2,5}
Scénario statu quo (sans PDUIF) avec renouvellement du parc (sans actions sur les technologies)	-60 %	< -10 %	-60 %	-85 %
Scénario PDUIF intermédiaire de travail (stabilité du trafic sur Île-de-France)	-5 %		-4 %	-6 %
Scénario PDUIF dans le cadre de la révision du PPA	-6 %		-7 %	-7 %

Les réductions d'émission par le renouvellement du parc sont cohérentes avec celles résultant des simulations effectuées dans le présent rapport pour l'Île-de-France. La réduction d'émissions liée au PDU apparaît beaucoup plus limitée et l'amélioration de la qualité de l'air est difficilement quantifiable. Elle constitue cependant une marge de progrès supplémentaire.

5.5.2 Zone de restriction de circulation - ZAPA intra-A86

Différents périmètres et niveaux de restrictions de la circulation aux véhicules les plus polluants ont été testés lors des analyses de faisabilité des ZAPA (zone d'action prioritaire pour l'air), faisant l'objet d'évaluations très poussées : évolution des déplacements et du trafic y compris reports modaux et changements d'itinéraires (Chevalier and Ooghe 2012), émissions tenant compte de l'évolution du parc par renouvellement de certains véhicules anciens et qualité de l'air (Airparif 2012c) et évaluation socio-économique (APUR 2012).

Seul le scénario intra-A86 sera retenu ici, considéré comme le plus efficace et acceptable selon ces différentes évaluations. Les simulations se font uniquement sur l'année 2015 (avec et sans ZAPA).

Le renouvellement du parc (vers des véhicules moins polluants) affecte environ 5 % du trafic total de l'Île-de-France et 10-11 % du trafic en provenance ou à destination du périmètre intra-A86. Le renouvellement des véhicules se ferait à 75 % par les résidents du périmètre intra-A86 (Chevalier and Ooghe 2012).

Le report modal vers les transports collectifs (TC) est estimé à 1,3 % (en nombre de voyageurs et donc quasiment en nombre de voitures particulières qui ne circuleraient plus). La limite haute du report modal (si aucun véhicule polluant n'était remplacé) est de 4 % à l'heure de pointe du matin.

Globalement, le trafic intra-A86 serait réduit d'environ 3 % tandis que le trafic hors de ce périmètre serait quasiment inchangé.

Les émissions diminuent de -7 à -9 % à l'échelle de l'Île-de-France (Tableau 38). Les réductions sont beaucoup plus importantes sur le périmètre intra-A86 (-20 à -25 %), avec des améliorations tout aussi importantes en termes de populations exposées à différents niveaux de pollution (-15 à -32 % de populations exposées à des niveaux de pollution supérieurs aux seuils réglementaires ou de qualité de l'air selon les polluants).

Ces réductions d'émission combinent ici une évolution technologique du parc (renouvellement vers des véhicules moins polluants) et une diminution relativement limitée du trafic (-3 %). Ces travaux n'analysent pas les effets de la ZAPA à moyen terme (inertie ou dynamique de renouvellement accrue).

Tableau 38 : Évolution des émissions de polluants du trafic en Île -de-France dans le cas de la mise en œuvre d'une zone de restriction pour l'air (Airparif 2012c, APUR 2012)

Évolution en 2015	CO ₂	NOx	PM ₁₀	PM _{2,5}
ZAPA 3* intra-A86, estimations APUR pour tout IdF	-1,2 %	-8 %	-7 %	-9 %
ZAPA 3* intra-A86, estimations Airparif en intra-A86 seulement		-25 %	-20 %	-25 %
En % de populations exposées à		Valeur limite	Objectif de qualité	Valeur cible
		-15 %	-30 %	-32 %

5.6 Conclusions

Les simulations effectuées sur la région Île-de-France montrent une évolution forte des émissions du trafic entre la situation de référence (2014) et les différents scénarios d'évolution technologique du parc automobile. Entre les scénarios prospectifs eux-mêmes, les résultats peuvent différer. Ainsi le scénario Essence (S2, promotion des véhicules légers essence au détriment des Diesel) réduit les émissions de particules et de NO_x, mais augmente l'émission de COV et de NH₃ par rapport au scénario FAP (S1, généralisation du filtre à particule, scénario au fil de l'eau). Ces effets du scénario Essence (S2) s'expliquent d'une part par l'option technologique (55 à 70 % de l'effet) et d'autre part par le renouvellement accéléré du parc nécessaire au changement de technologies d'ici 2025.

Le scénario Ambition Air (avec réduction du trafic et promotion de véhicules électriques en intra-A86) permet de diminuer toutes les émissions dans le périmètre intra-A86.

Les polluants émis dans l'atmosphère sont transportés et subissent différentes transformations chimiques. La chimie étant non linéaire, les réductions des concentrations ne sont pas directement proportionnelles à celles des émissions pour les polluants secondaires (ozone, composés inorganiques et organiques des particules).

Globalement, les scénarios simulés induisent des baisses des concentrations par rapport à la situation de référence, surtout pour NO₂ (jusqu'à -54 % en moyenne annuelle pour le scénario FAP (S1) et -60 % pour le scénario Essence (S2)) et BC (jusqu'à -47 % pour le scénario FAP (S1) et -56 % pour le scénario Essence (S2)). Cependant, les différences entre les scénarios eux-mêmes sont faibles par rapport à celles observées par rapport à la situation de référence.

Par ailleurs, les scénarios influencent plus fortement les fortes concentrations que les concentrations moyennes annuelles.

Les concentrations de polluants baissent – sauf pour l'ozone – dans les scénarios prospectifs FAP (S1) et Essence (S2) mais les réductions sont plus limitées que celles des émissions, en raison de l'importance des émissions des autres secteurs et de nombreux phénomènes atténuant les écarts. Pour l'ozone, des hausses de concentrations par rapport à la situation de référence peuvent être observées en certains lieux, mais ces hausses concernent des lieux et périodes pour lesquelles les concentrations sont faibles (zones urbaines). Les fortes concentrations d'ozone diminuent.

Pour les PM_{2,5}, les concentrations moyennes sont plus élevées dans Paris que sur le reste de l'Île-de-France. Les différences les plus élevées entre les scénarios et la situation de référence sont observées le long des grands axes routiers ainsi que dans Paris. Sur toute l'Île-de-France, le scénario FAP (S1) entraîne une diminution des concentrations de 3 % à 12 % en moyenne annuelle. Le scénario Essence (S2) induit une réduction supplémentaire des concentrations de 1 à 2 % sur l'Île-de-France par rapport au scénario FAP (S1). La baisse est plus marquée le long des axes routiers autour de Paris. Le nombre annuel de dépassements de la valeur guide de l'OMS journalière (25 µg/m³ en moyenne 24 h à ne pas dépasser plus de 3 jours par an) sur l'Île-de-France est réduit de -15 % avec les scénarios FAP (S1) et Essence (S2), soit 3 % de dépassements par an contre 4 % dans la situation de référence. Le nombre de dépassements de la valeur guide de l'OMS annuelle (10 µg/m³ en moyenne annuelle) n'est pas réduit par les scénarios FAP (S1) et Essence (S2), des dépassements étant toujours observés sur la totalité du territoire de l'Île-de-France.

Les variations des polluants secondaires comme l'O₃ et les composés secondaires des particules (inorganiques et organiques) dépendent du régime chimique de l'atmosphère. Celui-ci varie selon la zone (en zone urbaine : régime COV limité ; en zone rurale : régime NO_x limité). En zone urbaine, comme dans Paris et la proche banlieue, le régime chimique est COV limité toute l'année. Cependant, pour des zones moins urbanisées, le régime chimique peut être COV limité en hiver et NO_x limité en été, à cause des émissions biogéniques de COV à proximité de certaines villes.

Ainsi, dans les scénarios, l'O₃ et les oxydants augmentent en zone urbaine (jusqu'à +23 % pour le scénario FAP (S1) et +27 % pour le scénario Essence (S2)) et diminuent en zone rurale (jusqu'à -4 % pour les scénarios). Cette augmentation des oxydants dans Paris et le long des axes routiers peut entraîner une augmentation de la production d'aérosols secondaires (inorganiques et organiques) si les émissions des précurseurs gazeux des particules ne sont pas maîtrisées (NO₂ et composés organiques).

Pour les composés secondaires inorganiques des particules, en Île-de-France, la diminution des émissions de NO₂ dans les scénarios entraîne une diminution des concentrations d'inorganiques (jusqu'à -10 % pour les scénarios FAP (S1) et Essence (S2)).

Pour les composés secondaires organiques des particules, les plus fortes concentrations sont observées dans Paris, ainsi qu'à proximité de la forêt de Fontainebleau (Sud-Ouest), du parc naturel de la haute vallée de Chevreuse (Sud-Est) et du parc régional de l'Oise (nord de l'Île-de-France). Les scénarios induisent une réduction des concentrations d'organiques dans Paris, le long des axes routiers, mais également à proximité des forêts et parcs naturels (jusqu'à -12 % pour le scénario FAP (S1) et -14 % pour le scénario Essence (S2)). La baisse légèrement plus importante dans le scénario Essence (S2) par rapport au scénario FAP (S1) est due à une baisse plus importante des émissions des précurseurs d'aérosols organiques dans les scénarios. Ces émissions sont cependant très incertaines car non réglementées.

Bien que le scénario S1-2R élec (annulation des émissions des deux-roues motorisés) mène à des concentrations similaires à celles du scénario FAP (S1) sur l'Île-de-France, les différences sont plus marquées dans le domaine intra-A86, en particulier pour les organiques. Le scénario S1-2R élec entraîne une diminution plus marquée des concentrations d'organiques dans Paris (-2 % par rapport au scénario FAP (S1)).

Le recoupement spatialisé des concentrations moyennes annuelles simulées de PM₁₀ et NO₂ avec les effectifs de population résidente a été utilisé pour mieux appréhender l'impact des scénarios sur l'exposition de la population. D'après ce recoupement pour les PM₁₀, pour l'ensemble des lieux de résidence de la population d'Île-de-France, la concentration moyenne annuelle dans l'air ambiant extérieur diminuerait d'au moins 0,4 µg/m³ avec les scénarios FAP (S1) et Essence (S2). La diminution est accentuée avec le scénario Essence (S2). Elle atteint au moins 2 µg/m³ pour 0,4 % de la population avec le scénario FAP (S1) et 1,6 % avec le scénario Essence (S2).

Pour NO₂, l'impact des scénarios sur cet indicateur d'exposition est plus important. Une diminution maximale d'au moins 18 µg/m³ est atteinte pour 1,4 % de la population avec le scénario FAP (S1) et pour 11 % avec le scénario Essence (S2). La tendance est globalement à une diminution importante des concentrations de NO₂ pour une grande partie de la population. Ainsi, 42 % de la population bénéficieraient d'une diminution d'au moins 10 µg/m³ avec le scénario FAP (S1) et 49 % avec le scénario Essence (S2).

6 Scénarios technologiques prospectifs en France et pour des régions contrastées

Ce chapitre analyse les simulations des émissions et concentrations de polluants effectuées sur le territoire métropolitain, en situation de référence (REF, année 2014) et pour les scénarios suivants de renouvellement et d'évolution des compositions technologiques du parc automobile français :

- scénario FAP (S1) avec une généralisation progressive de l'équipement des véhicules Diesel en filtres à particules à l'horizon 2025 et parallèlement à l'évolution des catégories réglementaires Euro ;
- scénario Essence (S2) avec une promotion marquée des motorisations essence des véhicules légers au même horizon et avec la même évolution réglementaire.

Pour les simulations réalisées à l'échelle nationale, l'analyse des émissions de polluants du trafic et des autres secteurs d'activité est plus agrégée (notamment parce que les données, obtenues à partir d'un inventaire national spatialisé, sont géographiquement moins précises) et le nombre de scénarios est plus limité que pour les simulations sur l'Île-de-France (connaissance moindre de la répartition du trafic). L'analyse des émissions sera donc plus succincte qu'au chapitre précédent.

Ce chapitre décrit d'abord les émissions de polluants résultant des simulations (inventaire tous secteurs et calcul des émissions du trafic routier) dans la simulation de référence, puis leur évolution par les scénarios. Les facteurs d'émissions du trafic (ou émissions spécifiques par kilomètre parcouru) sont donnés pour les différents scénarios. Ils représentent en effet la principale caractéristique résultant des hypothèses des scénarios et influençant les concentrations de polluants. Celles-ci sont enfin analysées à la fois au travers des scénarios et dans leur variabilité spatiale (entre les régions) et temporelles.

6.1 Émissions annuelles totales de polluants (tous secteurs) dans le scénario de référence

Cette section décrit l'inventaire des émissions annuelles de polluants produites par les différents secteurs d'activités dans le scénario de référence. Les principaux polluants suivis sont décrits, ainsi que la contribution relative de chacun des secteurs et la variabilité géographique des quantités d'émissions totales.

6.1.1 Variabilité régionale de l'inventaire national d'émissions

Les émissions de polluants sont liées aux secteurs émetteurs qui sont répartis différemment sur le territoire national (cf. notamment la carte d'occupation des sols, Figure 8 au chapitre 3). La Figure 72 montre la variabilité territoriale d'émission qui en résulte, pour chacun des polluants.

Les émissions de CO, COVNM, PM₁₀ et PM_{2,5} sont principalement liées au résidentiel, qui contribue respectivement à environ 40 %, 23 %, 26 % et 42 % des émissions totales de ces polluants. Leur localisation est principalement dans les villes. Les émissions de NOx sont dues à environ 55 % au transport routier (villes et axes routier), tandis que les émissions de NH₃ sont liées à l'agriculture (65 %, gestion du fumier, localisation sur les terres agricoles et principalement en Bretagne). Les émissions de SOx sont dues à environ 18 % à l'industrie du fer et de l'acier.

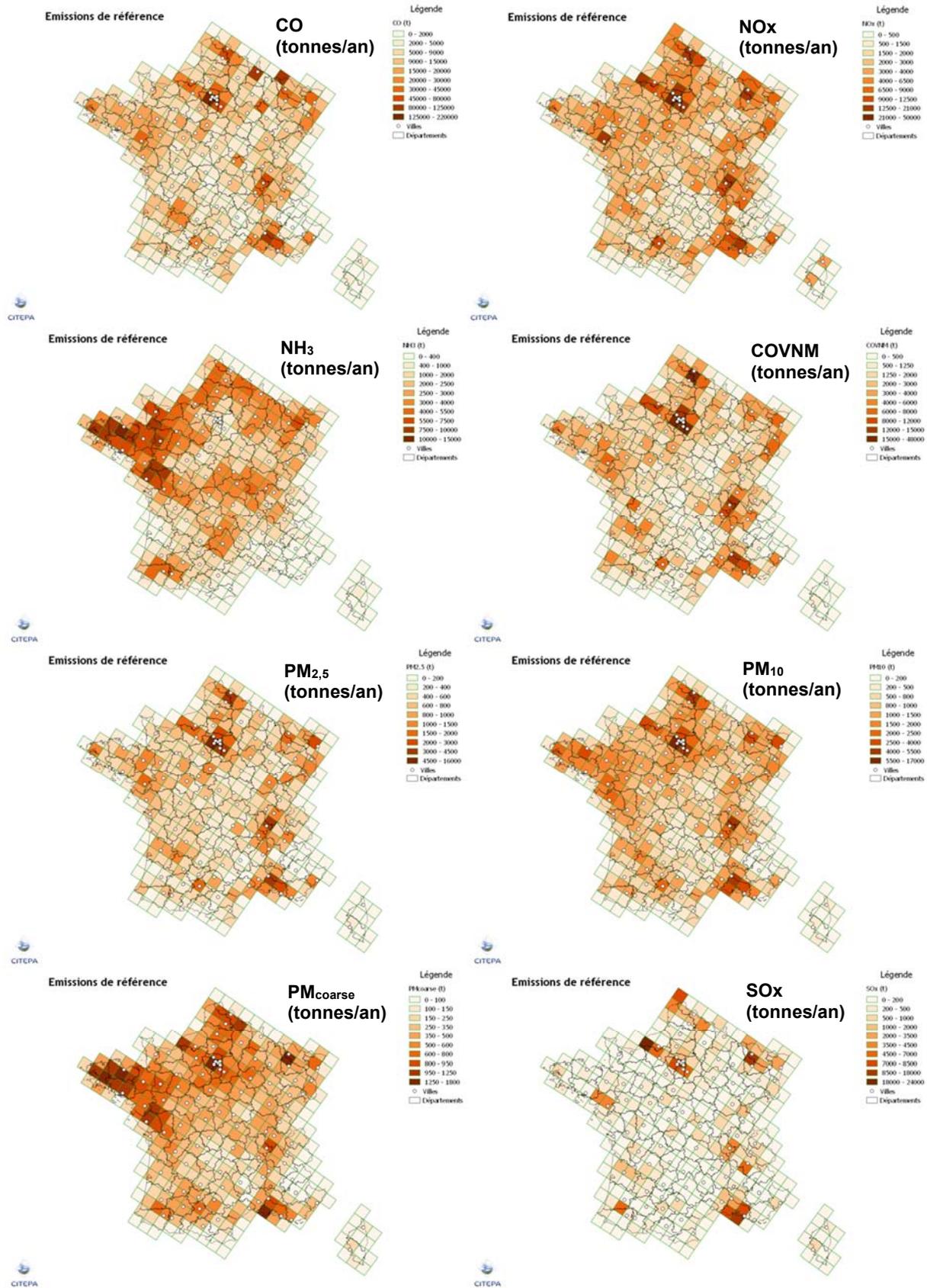


Figure 72 : Niveaux d'émission de polluants (tous secteurs) en situation de référence (de gauche à droite et de haut en bas : CO, NOx, NH₃, COVNM, PM_{2.5}, PM₁₀, PM_{coarse}, SOx)

6.1.2 Émissions nationales selon les secteurs

Les émissions de la France pour l'année 2013 (édition 2016) par grands secteurs sont données dans le Tableau 39 (polluants gazeux et particulaires).

Tableau 39 : Émissions (en tonnes) de la France pour l'année 2013 (édition 2016) par grands secteurs - Polluants gazeux (haut) et particulaires (bas) (source CITEPA)

Secteur\Polluants	CO	en %	COVNM	en %	NH ₃	en %	NOx	en %
1 Combustion dans les industries de l'énergie et de la transformation (sources fixes)	26 391	1	2 471	0	209	0	70 184	6
2 Installations de combustion non industrielles (sources fixes)	1 322 397	34	170 372	7	0	0	101 175	8
3 Combustion dans l'industrie manufacturière (sources fixes)	428 591	11	6 842	0	1 258	0	103 472	8
4 Processus de production (sources fixes)	592 298	15	51 109	2	3 126	0	6 568	1
5 Extraction et distribution de combustibles fossiles et d'énergie géothermique	0	0	25 509	1	0	0	0	0
6 Utilisation de solvants et autres produits	875	0	314 088	14	269	0	890	0
7 Transport routier	513 251	13	65 667	3	4 997	1	516 212	41
8 Autres sources mobiles et engins	332 491	9	47 978	2	0	0	161 650	13
9 Traitement et élimination des déchets	16 117	0	11 613	1	7 683	1	2 190	0
10 Agriculture	60 085	2	1 628	0	672 779	97	3 535	0
11 Autres sources et puits	550 114	14	1 579 681	69	43	0	300 784	24
Total	3 842 610	100	2 276 958	100	690 364	100	1 266 660	100

Secteur\Polluants	PM ₁₀	en %	PM _{2,5}	en %	SOx	en %	PM _{coarse}	en %
1 Combustion dans les industries de l'énergie et de la transformation (sources fixes)	4 242	1	2 667	1	71 219	21	1 575	1
2 Installations de combustion non industrielles (sources fixes)	88 644	28	86 820	42	27 502	8	1 825	2
3 Combustion dans l'industrie manufacturière (sources fixes)	11 966	4	9 337	5	81 664	24	2 629	2
4 Processus de production (sources fixes)	47 342	15	25 106	12	24 660	7	22 236	20
5 Extraction et distribution de combustibles fossiles et d'énergie géothermique	12 181	4	1 482	1	2 086	1	10 699	10
6 Utilisation de solvants et autres produits	1 736	1	1 370	1	1	0	367	0
7 Transport routier	39 217	12	32 533	16	825	0	6 684	6
8 Autres sources mobiles et engins	16 615	5	13 479	7	2 964	1	3 136	3
9 Traitement et élimination des déchets	3 665	1	3 590	2	6 000	2	75	0
10 Agriculture	74 629	24	13 633	7	271	0	60 995	55
11 Autres sources et puits	15 987	5	14 788	7	124 025	36	1 199	1
Total	316 224	100	204 805	100	341 217	100	111 420	100

6.2 Parcs et émissions de polluants selon les scénarios

6.2.1 Compositions du parc automobile national selon les scénarios

Le Tableau 40 donne la composition du parc automobile en circulation en France et son évolution avec les deux scénarios FAP (S1) et Essence (S2). La composition du parc en Île-de-France est également rappelée. Les évolutions sont similaires du fait de la même approche de transformation.

Quelques particularités des parcs de référence se répercutent dans les scénarios :

- le trafic des véhicules légers (et des VUL) est plus important en France (92 % du total au lieu de 86 % en Île-de-France), au détriment de celui des deux-roues (3 % contre 8 % en Île-de-France) ;
- les parcs de véhicules légers et autobus / autocars sont plus anciens (en situation de référence) et comptent une moindre proportion de véhicules des réglementations récentes. Ce retard décroît avec les scénarios ;
- l'équilibre Diesel - essence diffère également (79-20 % en France contre 72-25 % en Île-de-France). Cette plus forte diésélisation est préservée dans les scénarios ;
- le parc autobus / autocars compte une proportion assez importante de véhicules au gaz GNV.

Tableau 40 : Composition moyenne du parc automobile en circulation en France selon les différents scénarios et comparaison à la composition moyenne du parc en circulation en Île-de-France

		En % pour les scénarios de composition du parc					
		Île-de-France			France		
Véhicules	Sous-catégories	Référence	FAP (S1)	Essence (S2)	Référence	FAP (S1)	Essence (S2=)
Véhicules légers (voitures et véhicules utilitaires légers VUL)	Diesel	72	72	42	79	79	49
	essence	25	25	53	20	21	50
	<i>% Euro 5 et 6</i>	33	79	92	21	75	90
	électrique	0,4	0,4	0,6	0,0	0,1	0,1
	autres	2,7	3,1	4,0	0,3	0,4	0,4
	% du trafic total	86	86	86	92	92	92
	Dont Voitures	71	71	71	73	73	73
	VUL	15	15	15	19	19	19
Camions	Diesel	99	99	99	100	100	100
	<i>% Euro 5 et 6</i>	43	83	83	42	85	85
	% du trafic total	5,3	5,3	5,3	4,8	4,8	4,8
Autobus / autocars	Diesel	99	99	99	96	96	96
	GNV	-	-	-	4,3	4,5	4,5
	<i>% Euro 5 et 6</i>	49	90	90	35	83	83
	% du trafic total	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6
Deux-roues motorisés	essence	100	100	100	100	100	100
	<i>% Euro 5 et 6</i>	0	54	54	0	52	52
	% du trafic total	7,8	7,8	7,8	2,9	2,9	2,9

Les cases colorées marquent les principales caractéristiques de composition du parc France par rapport au parc Île-de-France.

6.2.2 Facteurs d'émission du trafic selon les scénarios

Les Tableau 41 (polluants gazeux) et Tableau 42 (polluants particulaires) récapitulent les facteurs d'émission moyens du trafic national (ou émissions spécifiques par kilomètre parcouru), pour l'ensemble des véhicules d'une part et pour les seuls véhicules légers (voitures et véhicules utilitaires légers) d'autre part. Ces derniers sont en effet les plus sensibles aux hypothèses des scénarios retenus.

Ces indicateurs constituent les principales clés d'interprétation des résultats puisque seules les émissions du trafic varient entre les scénarios.

Il convient de noter en particulier :

- les facteurs d'émissions sont fortement réduits dans tous les scénarios, comparés à la situation de référence, sauf pour le NH₃ dont le facteur d'émission est plus fort dans le scénario Essence (S2) ;
- entre les scénarios prospectifs, les facteurs d'émissions de polluants particuliers les plus bas sont obtenus avec le scénario Essence (S2) ;
- le scénario Essence (S2) présente l'inconvénient de facteurs d'émission de COVNM plus élevés que les autres scénarios (mais cependant inférieurs à la situation de référence).

Tableau 41 : Facteurs d'émission moyens du trafic national, polluants gazeux, selon les scénarios

Famille de Véhicules	Facteurs d'émissions de combustion et évaporation (COV)				
	Total_COVNM -en mg/km	NOx- en mg/km	NO ₂ - en mg/km	Ratio NO ₂ / NOx	NH ₃ - en mg/km
Tous véhicules					
Référence	113	904	221	24.5 %	8.6
FAP (S1)	71	553	146	26.4 %	7.1
Essence (S2)	94	434	99	22.7 %	9.4
Véhicules légers (voitures + véhicules utilitaires légers)					
Référence	81	621	193	31.1 %	8.9
FAP (S1)	48	488	145	29.8 %	7.2
Essence (S2)	73	358	94	26.1 %	9.7

Tableau 42 : Facteurs d'émission moyens du trafic national, polluants particuliers, selon les scénarios

Famille de Véhicules	Facteurs d'émissions de combustion et abrasion			
	PM ₁₀ ou PM en mg/km	PM _{2,5} en mg/km	EC - en mg/km	
Tous véhicules				
Référence		67	56	34
FAP (S1)		41	30	12
Essence (S2)		36	25	7.7
Véhicules légers (voitures + véhicules utilitaires légers)				
Référence		62	52	33
FAP (S1)		37	27	12
Essence (S2)		31	22	7.0

Comparativement aux facteurs d'émission calculés en Île-de-France, quelques différences sont observées pour le scénario de référence :

- les facteurs d'émission de COV du trafic routier national (tous véhicules) sont plus faibles que ceux simulés pour l'Île-de-France (113 et 160 mg/km respectivement, échappement + évaporation) ;
- les facteurs d'émission nationaux de NOx du trafic routier sont plus élevés (904 et 804 mg/km respectivement) ;
- de même pour NO₂ (221 et 186 mg/km) ;
- les facteurs d'émissions des seuls véhicules légers sont plus proches ;
- les facteurs d'émissions particuliers sont très similaires, sauf BC (respectivement 34 et 20 mg/km pour le scénario de référence).

Ces différences peuvent avoir plusieurs origines : les conditions de circulation moyennes nationales diffèrent de celles de l'Île-de-France, les compositions de parc et des écarts méthodologiques.

6.2.3 Évolution des émissions nationales des principaux polluants

Au travers des scénarios, seules les émissions du transport routier (Secteur 7) sont modifiées, tandis que les émissions des autres secteurs restent constantes.

Les émissions de la France pour le scénario FAP (S1) sont données dans le Tableau 43 et le Tableau 44, pour le transport routier et pour les autres secteurs regroupés. Par rapport à la situation de référence, les émissions du transport routier sont réduites de -43 %, -37 %, -17 % et -58 % pour CO, COVNM, NH₃ et NOx, tandis que les émissions totales (tous secteurs) diminuent de -5,8 %, -1,1 %, -0,1 % et de -24 % respectivement.

De même, les émissions de PM₁₀, PM_{2,5}, SOx, et PM_{coarse} du trafic sont réduites de -39 %, -46 %, -68 % et -2 %, tandis que les émissions totales diminuent de -4,8 %, -7,3 %, -0,2 % et de -0,1 % respectivement.

Tableau 43 : Émissions du transport routier et totales en France, avec le scénario FAP (S1) - polluants gazeux (en tonnes)

Secteur\Polluants	CO		COVNM		NH ₃		NOx	
7 Transport routier	292 067	8 %	41 407	2 %	4 128	1 %	217 051	22 %
Autres secteurs	3 329 359	92 %	2 211 291	98 %	685 367	99 %	750 448	78 %
Total	3 621 426	100 %	2 252 698	100 %	689 495	100 %	967 499	100 %

Tableau 44 : Émissions du transport routier et totales en France, avec le scénario FAP (S1) - Particules et SOx (en tonnes)

Secteur\Polluants	PM ₁₀		PM _{2,5}		SOx		PM _{coarse}	
7 Transport routier	24 083	8 %	17 507	9 %	260	0 %	6 577	6 %
Autres secteurs	277 007	92 %	172 272	91 %	340 392	100 %	104 736	94 %
Total	301 090	100 %	189 779	100 %	340 652	100 %	111 313	100 %

Les émissions (trafic routier et autres secteurs) de la France pour le scénario Essence (S2) sont données dans le Tableau 45 et le Tableau 46. Ce scénario conduit à des diminutions des émissions du transport routier de -23 %, -16 % et -63 % pour CO, COVNM, et NOx, par rapport à la situation de référence (sauf pour NH₃, +9 %). Les émissions totales diminuent respectivement de -3,1 %, -0,5 % et de -26 % (sauf pour NH₃, +0,1 %).

Les émissions de PM₁₀, PM_{2,5}, SOx et PM_{coarse} du transport routier sont réduites de -46 %, -56 %, -67 % et -1 % respectivement, ce qui entraîne des diminutions des émissions totales de -5,7 %, -8,8 %, -0,2 % et de -0,03 %.

Tableau 45 : Émissions du transport routier et totales en France, avec le scénario Essence (S2) - polluants gazeux (en tonnes)

Secteur\Polluants	CO		COVNM		NH ₃		NOx	
7 Transport routier	394 054	11 %	54 892	2 %	5 467	1 %	189 311	20 %
Autres secteurs	3 329 359	89 %	2 211 291	98 %	685 367	99 %	750 448	80 %
Total	3 723 413	100 %	2 266 183	100 %	690 834	100 %	939 759	100 %

Tableau 46 : Émissions du transport routier et totales en France, avec le scénario Essence (S2) - Particules et SOx (en tonnes)

Secteur\Polluants	PM ₁₀		PM _{2,5}		SOx		PM _{coarse}	
7 Transport routier	21 069	7 %	14 423	8 %	274	0 %	6 646	6 %
Autres secteurs	277 007	93 %	172 272	92 %	340 392	100 %	104 736	94 %
Total	298 076	100 %	186 695	100 %	340 666	100 %	111 382	100 %

Par rapport au scénario FAP (S1), le scénario Essence (S2) conduit à des variations d'émissions du transport routier de +35 %, +33 %, +32 % et -13 % pour CO, COVNM, NH₃ et NOx, et des émissions totales de +2,8 %, +0,6 %, +0,2 % et de -2,9 % respectivement.

De même, le scénario Essence (S2) induit des évolutions de -13 %, -18 %, +5 % et +1 % des émissions de PM₁₀, PM_{2,5}, SOx et PM_{coarse} du transport routier, et de -1 %, -1,6 %, 0 % et de 0,1 % des émissions totales.

6.2.4 Synthèse des émissions des polluants intervenant dans la simulation des concentrations

Les émissions en tonnes par an des différents polluants émis par les activités anthropiques sont données en Tableau 39 (référence) et en section 6.2.3 (scénarios prospectifs). Cependant, le secteur 11 (autres sources et puits) n'est pas pris en compte dans la simulation des concentrations, car il concerne en grande partie les émissions naturelles comme les émissions biogéniques. Ces émissions (fortes quantités de COV) sont très dépendantes de la météorologie. Ainsi, dans le modèle de qualité de l'air, elles sont estimées indépendamment de l'inventaire d'émissions annuel en utilisant le modèle MEGAN - *Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature* (Guenther et al. 2006) afin d'obtenir leur évolution temporelle précise.

Comme pour la simulation Île-de-France, les émissions de NOx sont spéciées en NO et NO₂. Les émissions de BC et matière organique (OM) sont estimées à partir des émissions de PM_{2,5}, à partir de la spéciation des particules qui est définie selon les types de véhicules, en utilisant les rapports EC/PM_{2,5} et OM/EC du guide EMEP (Ntziachristos et al. 2013). Les COSV sont estimées à partir des émissions de matière organique (OM) comme détaillé dans le paragraphe 4.6.2. Le Tableau 47 résume les émissions en tonnes/an sur la France pour la simulation de référence ainsi que pour les différents scénarios de NO₂, BC, OM et COSV.

Tableau 47 : Émissions en tonnes/an sur la France pour la simulation de référence ainsi que pour les différents scénarios (hors secteur 11) du black carbone, de la matière organique et des composés organiques semi-volatils. Pour chaque scénario, les variations par rapport à la simulation de référence en % sont détaillées

	NO ₂	BC	OM	COSV
Référence REF	175632	39591	40963	102407
Trafic	134204	19819	6467	16168
% des émissions totales	76,4	50,1	8	15,8
FAP (S1)	97861	30455	37982	94955
FAP- REF (en %)	-44,3	-23,1	-7,3	-7,3
Essence (S2)	90645	28558	37363	93407
Essence - REF (%)	-48,4	-27,9	-8,8	-8,8

6.3 Concentrations de polluants

Sur la France, les scénarios influencent fortement les concentrations. Cependant, les différences entre les scénarios sont faibles par rapport à celles observées entre un scénario et la simulation de référence. Les écarts entre le scénario FAP (S1) et la simulation de référence sont donc d'abord analysés. Pour estimer le scénario le plus favorable à une réduction de la pollution, des cartes de différences entre le scénario Essence (S2) et le scénario FAP (S1) sont également étudiées.

Au préalable, sont exposées les analyses de validation des simulations en regard des observations des stations mesurant la qualité de l'air en France (stations de fond).

6.3.1 Validation des simulations

La présentation du modèle et les données d'entrée des simulations effectuées avec la plate-forme de qualité de l'air Polyphemus sont détaillées au chapitre 4, section 4.6. Les simulations faites sur le domaine France ont servi de conditions aux limites pour les simulations sur l'Île-de-France.

La validation des simulations sur la France (simulation de référence) est faite à partir des concentrations mesurées aux stations de fond françaises et renseignées par l'agence européenne de l'environnement (EEA)⁵⁹.

Les Tableau 48 et Tableau 49 montrent les statistiques obtenues pour O₃, NO₂, PM₁₀ et PM_{2,5}. Bien que la concentration moyenne d'ozone soit surestimée, la simulation satisfait largement le critère de Russell and Dennis (2000) ($|MNGB| < 15 \%$ et $MNGE < 30 \%$), qui porte surtout sur les fortes concentrations d'ozone. Concernant le NO₂, la simulation sous-estime les observations. Cependant, les statistiques obtenues sont comparables à celles obtenues dans d'autres études et/ou par d'autres modèles (Roustan, Pausader, and Seigneur 2011, Terrenoire et al. 2015, Zhang et al. 2013).

Concernant les particules, les PM₁₀ sont bien modélisées et les critères de performance et de but sont respectés ($MFE < 50 \%$ et $|MFB| < 30 \%$). Bien que les PM_{2,5} soient un peu surestimées, le critère de performance est largement respecté ($MFE < 75 \%$ et $|MFB| < 60 \%$).

Tableau 48 : Statistiques de comparaisons aux mesures pour O₃ et NO₂

	Nombre de stations	Moyenne mesurée (µg/m ³)	Moyenne simulée (µg/m ³)	Corrélation	MNGE (%)	MNGB (%)
O ₃	324	53,4	79,1	56 %	15,1 %	2,6 %
NO ₂	308	15,9	7,8	53 %	67,4 %	-26,2 %

MNGE : Mean Normalized Gross Error MNGB : Mean Normalized Gross Bias

Tableau 49 : Statistiques de comparaisons aux mesures pour PM₁₀ et PM_{2,5}

	Nombre de stations	Moyenne mesurée (µg/m ³)	Moyenne simulée (µg/m ³)	Corrélation (%)	MFE (%)	MFB (%)
PM ₁₀	118	18,2	16,1	41 %	46,8 %	-5,1 %
PM _{2,5}	75	13,1	15,3	44 %	55,2 %	27,6 %

MFE : Mean Fractional Error MFB : Mean Fractional Bias

6.3.2 Étude des régimes chimiques

Les régimes chimiques qui pilotent la formation de l'O₃ et des composés secondaires sont en grande partie déterminés par le rapport des concentrations COV/NO_x (section 5.3.2). La Figure 73 montre ce rapport COV/NO_x sur la France pour la simulation de référence. Quand le rapport COV/NO_x est bas, le régime est COV limité. C'est le cas des grandes villes de France (rapport inférieur à 4) : Paris, Lyon, région marseillaise, Lille, Bordeaux, Toulouse, Nantes... ainsi que dans le nord et l'est de la France. Le rapport COV/NO_x tend à la hausse, avec des régimes fortement NO_x limité, à proximité des régions de fortes émissions biogéniques.

Les émissions de COV biogéniques sont représentées sur la Figure 74. Elles sont particulièrement élevées dans les Landes au Sud-Ouest, dans le Languedoc et les Cévennes au Sud-Est, dans le centre en Auvergne, et dans l'Est avec le Jura.

⁵⁹ <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/aqereporting-1>

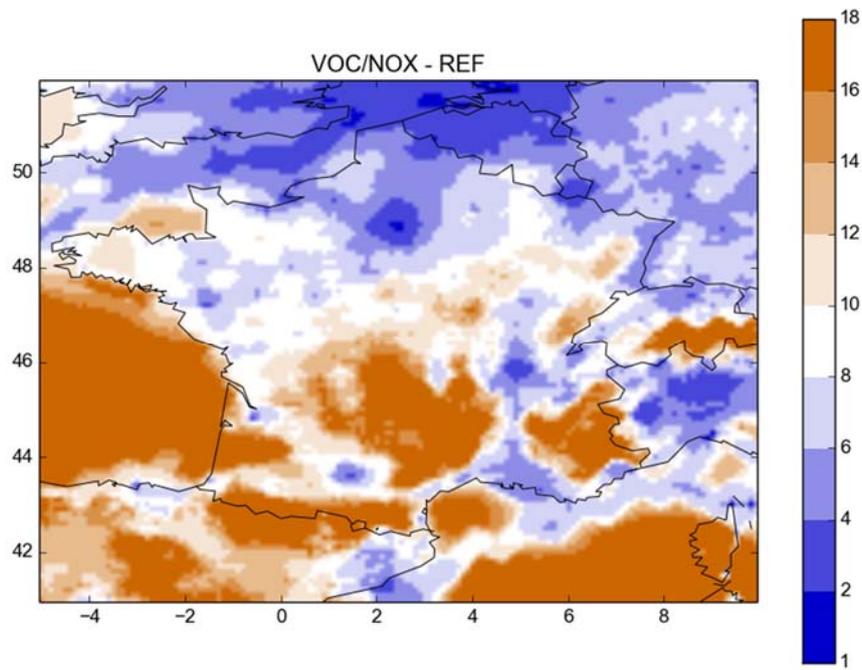


Figure 73 : Rapport des concentrations de COV/NOx pour la simulation de référence

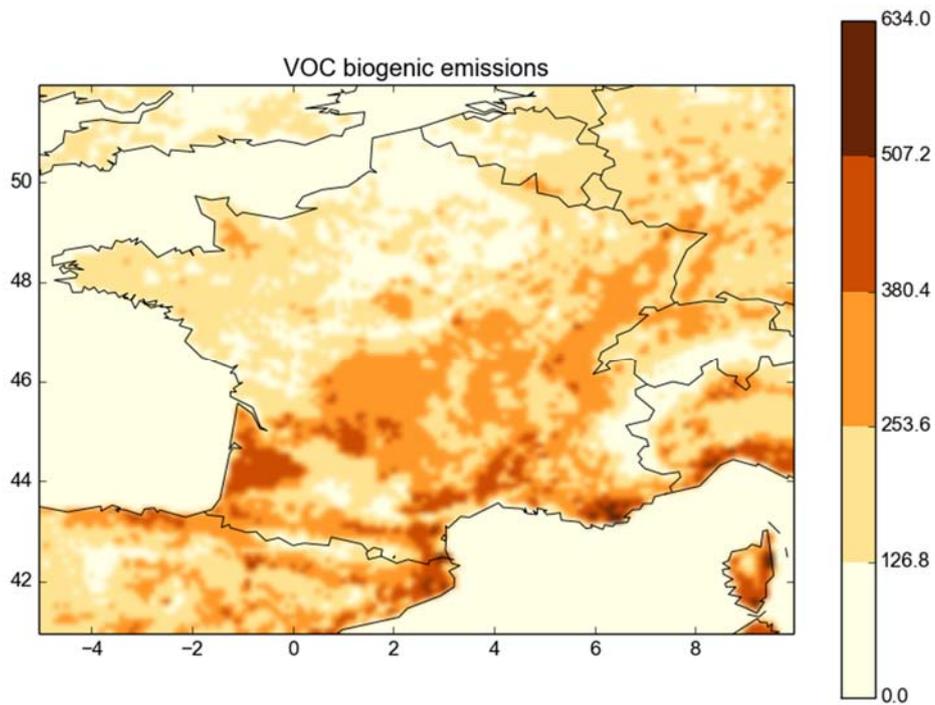


Figure 74 : Émissions des COV biogéniques en tonnes/an

6.3.3 Concentrations moyennes annuelles

La Figure 75 montre les concentrations moyennes annuelles d'O₃ sur la France, ainsi que les différences relatives entre le scénario FAP (S1) et la simulation de référence, et entre le scénario Essence (S2) et le scénario FAP (S1). Les concentrations moyennes sont plus élevées sur la mer que sur la terre, car l'O₃ se dépose moins sur la mer. Les concentrations sont moins élevées dans les grandes villes comme Paris ou Lyon car l'O₃ y est titré par les NO_x.

Le scénario FAP (S1) induit une diminution des concentrations d'O₃ dans les régions limitées en NO_x, i.e. surtout dans le sud de la France, et une augmentation sur les grandes villes de France (Paris, Lyon, Marseille, Strasbourg) ainsi que dans le nord de la France où le régime chimique est plutôt limité en COV. En cohérence avec les simulations sur l'Île-de-France analysées précédemment, il existe une forte augmentation de l'O₃ en moyenne annuelle à Paris (+15 %).

Par rapport au scénario FAP (S1), les variations des concentrations d'O₃ du scénario Essence (S2) sont faibles sur toute la France. Une augmentation de quelques pourcents est observée dans les grandes villes (Paris, Lyon, Marseille), car le régime chimique y est limité en COV et les émissions de NO_x y sont plus fortement réduites avec le scénario Essence (S2) que dans le scénario FAP (S1).

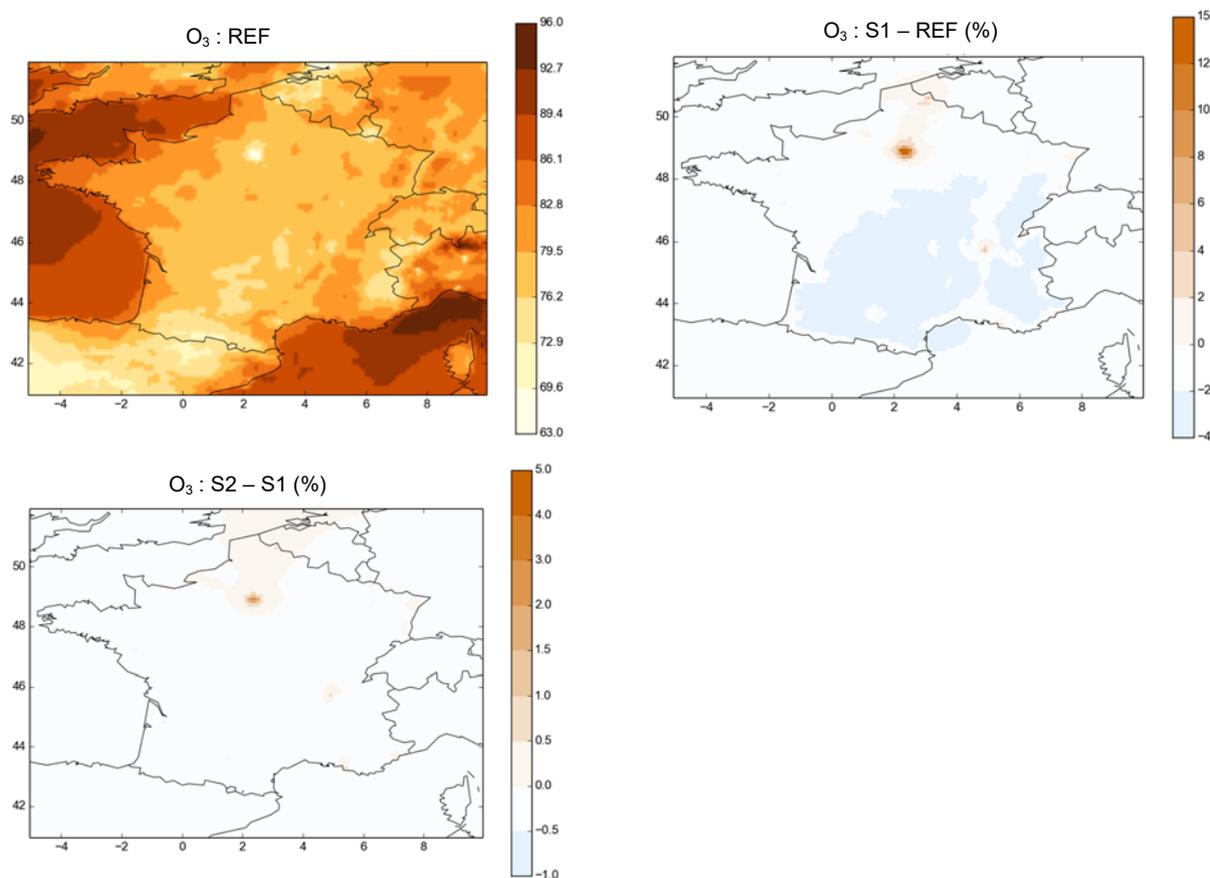


Figure 75 : Concentrations moyennes annuelles de l'O₃ sur la France (en haut à gauche) en µg/m³. Différences relatives entre les concentrations annuelles du scénario FAP (S1) et de la simulation de référence en % (en haut à droite). Différences relatives entre les concentrations annuelles du scénario Essence (S2) et celles du scénario FAP (S1) en % (en bas)

La Figure 76 montre les concentrations moyennes annuelles des $PM_{2,5}$ sur la France, ainsi que les différences relatives entre le scénario FAP (S1) et la simulation de référence, et entre le scénario Essence (S2) et le scénario FAP (S1). Les concentrations moyennes sont plus élevées à Paris, Lyon ainsi que dans le sud-est de la France. Les différences les plus élevées entre le scénario FAP (S1) et la simulation de référence (jusqu'à -11 %) sont observées en Rhône-Alpes, dans le sud-est de la France, dans les Landes, à Paris et en Alsace.

La distribution géographique des différences entre les scénarios Essence (S2) et FAP (S1) est similaire à celle des différences entre FAP (S1) et la référence. Cependant les différences entre Essence (S2) et FAP (S1) sont faibles (-1 % au maximum en moyenne annuelle).

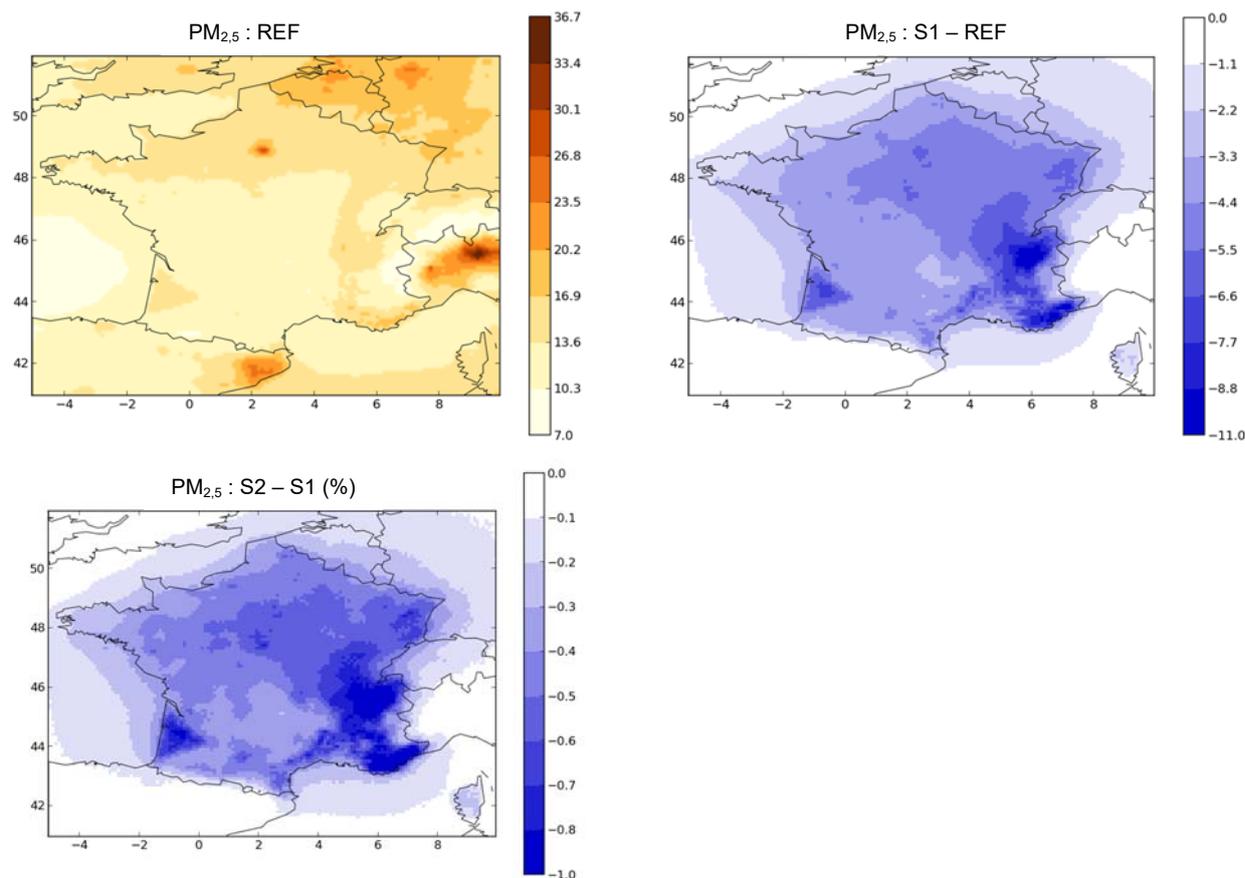


Figure 76 : Concentrations moyennes annuelles des $PM_{2,5}$ sur la France (en haut à gauche) en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Différences relatives entre les concentrations annuelles du scénario FAP (S1) et de la simulation de référence en % (en haut à droite). Différences relatives entre les concentrations annuelles du scénario Essence (S2) et celles de FAP (S1) en % (en bas)

Les Figure 77, Figure 78 et Figure 79 montrent les concentrations moyennes annuelles de BC, d'inorganiques, d'organiques respectivement, ainsi que les différences relatives entre le scénario FAP (S1) et la simulation de référence, et entre le scénario Essence (S2) et le scénario FAP (S1).

Le BC est un composé inerte et émis principalement par le trafic routier. Les plus fortes concentrations sont donc observées dans les zones de trafic important : dans les grandes villes (Paris, Lyon...), dans le nord de la France, en Rhône-Alpes, le long de l'autoroute A7 entre Lyon et le sud de la France, ainsi que dans la région marseillaise (Figure 77). Le scénario FAP (S1) induit une forte réduction de ces concentrations (jusqu'à -31 %). Les concentrations de BC sont réduites aux endroits où les émissions sont les plus fortes.

Par rapport au scénario FAP (S1), le scénario Essence (S2) induit une réduction qui va jusqu'à -13 %, avec une distribution spatiale similaire à la distribution des fortes concentrations.

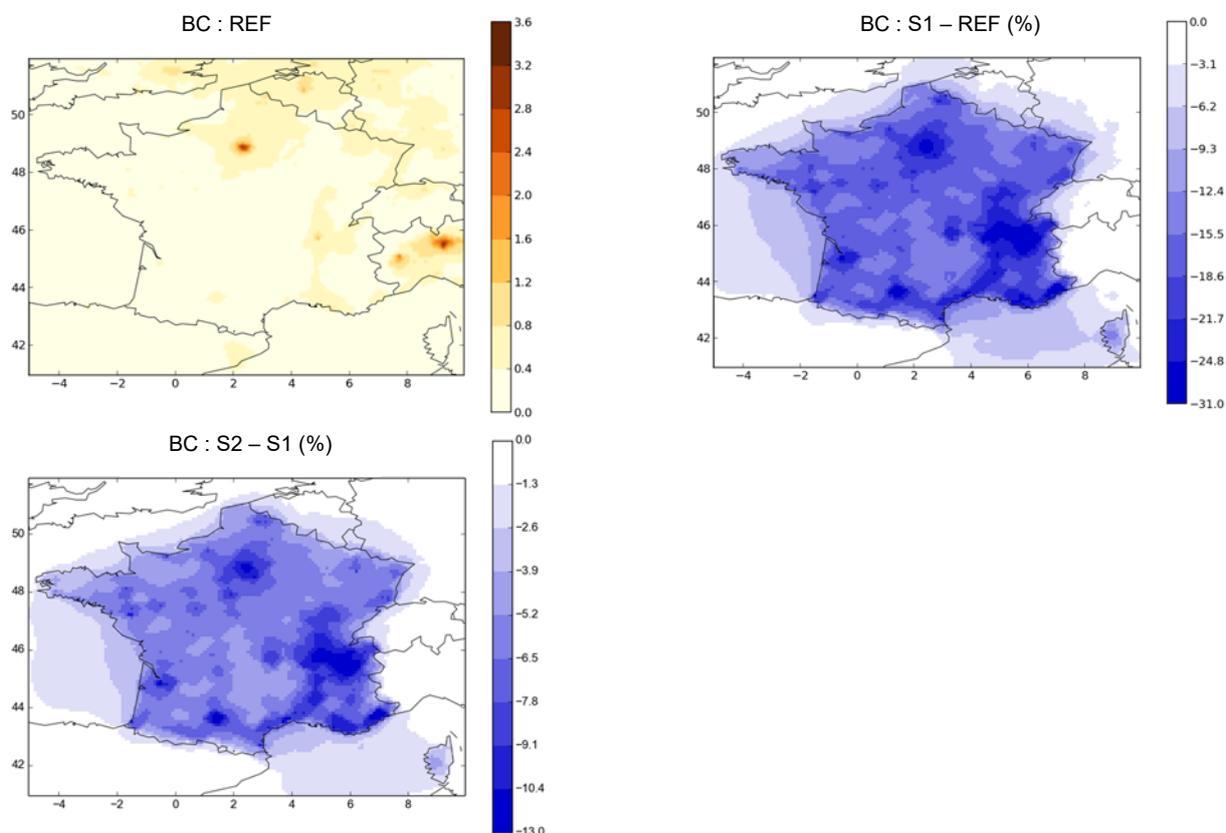


Figure 77 : Concentrations moyennes annuelles de BC sur la France (en haut à gauche) en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Différences relatives entre les concentrations moyennes du scénario FAP (S1) et celles de la simulation de référence en % (en haut à droite). Différences relatives entre les concentrations annuelles du scénario Essence (S2) et celles du scénario FAP (S1) en % (en bas)

Les concentrations en composés inorganiques sont relativement uniformes sur la France, avec des concentrations partout supérieures à $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figure 78). Les composés inorganiques sont formés de sodium, chlorure, sulfate, nitrate et ammonium. Les scénarios influent particulièrement sur les concentrations de nitrate d'ammonium. Sur la France, la formation du nitrate d'ammonium des inorganiques est limitée par les concentrations en acide nitrique et en nitrate (Sartelet et al. 2007a). Ainsi les réductions des composés inorganiques par les scénarios sont induites par la baisse des précurseurs d'acide nitrique, c'est-à-dire par la baisse des émissions de NO_2 . Le scénario FAP (S1) induit une réduction des concentrations en inorganiques entre 1 et 15 %. Cette réduction est surtout importante en Rhône-Alpes car c'est la région où les émissions de NO_2 sont les plus réduites par rapport aux émissions totales.

Par rapport à ce scénario, le scénario Essence (S2) induit une baisse de quelques pourcents supplémentaires des concentrations en inorganiques sur la région Rhône-Alpes, mais une très légère hausse ($< +0,8 \%$) en Île-de-France.

Cette hausse du scénario Essence (S2) par rapport au scénario FAP (S1) en Île-de-France est due à l'augmentation des oxydants sur cette région qui annule le bénéfice de la réduction plus importante dans le scénario Essence (S2) des émissions de NO_2 , précurseurs des inorganiques.

La comparaison des scénarios des simulations Île-de-France avait montré une tendance inverse, c'est-à-dire que les concentrations en inorganiques sur l'Île-de-France baissaient dans le scénario

Essence (S2) par rapport au scénario FAP (S1). Cette différence entre les simulations France et Île-de-France est due aux différences de résolution (taille des mailles). Dans la simulation France, sur une maille large de l'Île-de-France, la baisse du précurseur (NO_2) est moins importante que les baisses observées localement (mailles de 2 km x 2 km) dans la simulation Île-de-France elle-même. Ainsi, les baisses des précurseurs de la simulation France pour le scénario Essence (S2) comparé à FAP (S1) ne sont pas assez importantes localement pour contrecarrer l'augmentation des oxydants et, en conséquence, les concentrations en inorganiques secondaires augmentent. Cependant, ces baisses sont localement plus importantes dans la simulation Île-de-France à cause de la résolution spatiale plus fine, entraînant une baisse des composés secondaires. Il faut noter que les différences entre les deux scénarios Essence (S2) et FAP (S1), à la hausse ou à la baisse, sont faibles sur l'Île-de-France et que les concentrations en inorganiques diminuent dans toutes les simulations lorsque les scénarios sont comparés à la référence.

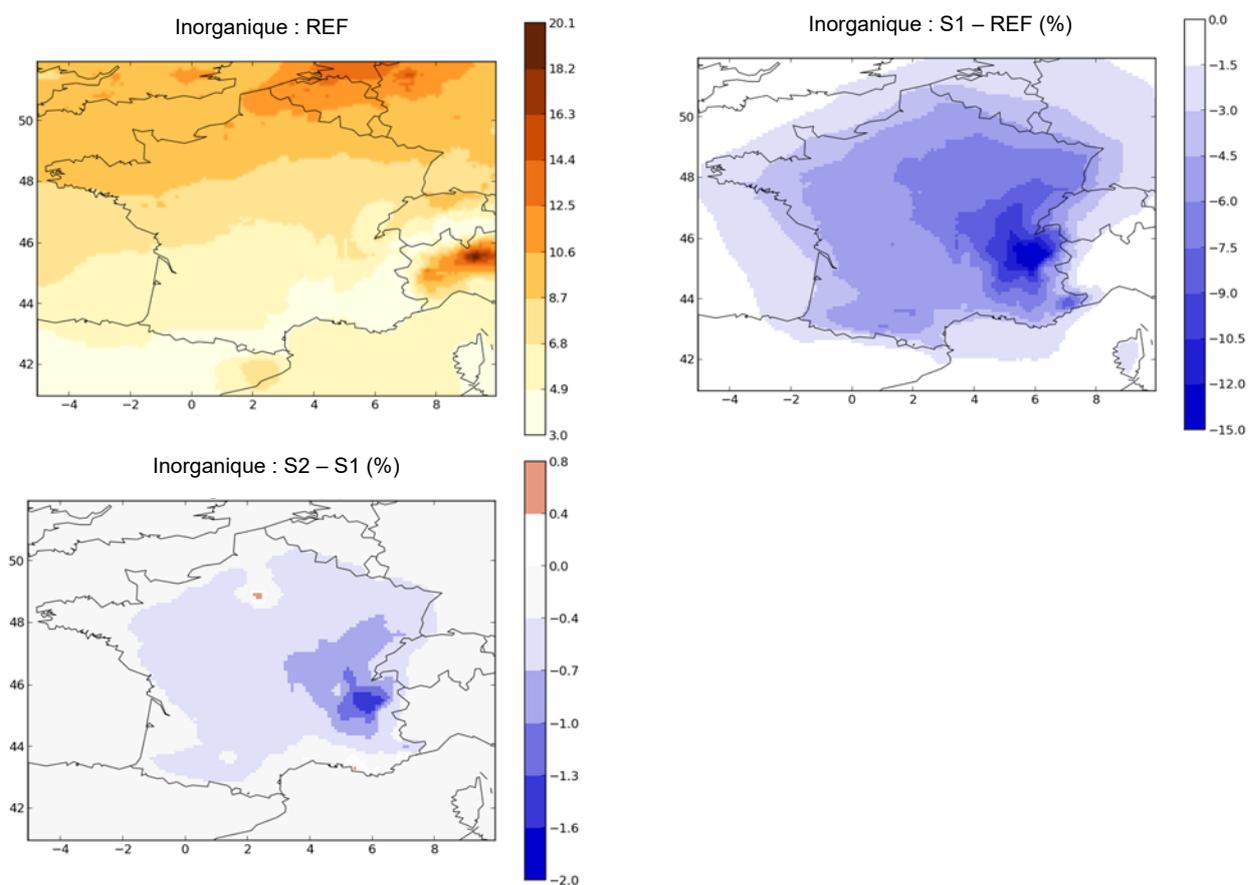


Figure 78 : Concentrations moyennes annuelles des inorganiques sur la France (en haut à gauche) en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Différences relatives entre les concentrations moyennes du scénario FAP (S1) et celles de la simulation de référence en % (en haut à droite). Différences relatives entre les concentrations annuelles du scénario Essence (S2) et celles du scénario FAP (S1) en % (en bas)

Les concentrations des organiques sont supérieures à $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur toute la France (Figure 79). De plus fortes concentrations sont observées dans le sud-est de la France, en Rhône-Alpes, dans les Landes et à Paris. Les fortes concentrations dans les grandes villes comme Paris et Lyon sont dues en partie aux organiques anthropiques, tandis que les fortes concentrations dans les Landes et dans le sud-est sont plutôt dues aux organiques biogéniques. À proximité des forêts émettrices de composés biogéniques, les composés biogéniques gazeux sont oxydés et peuvent ainsi former des aérosols organiques secondaires.

Comparé à la référence, le scénario FAP (S1) entraîne une diminution des concentrations d'organiques (jusqu'à -16 %), notamment dans les régions émettrices de composés biogéniques. En effet, dans ces régions, les scénarios entraînent une diminution des oxydants car le régime chimique est limité en NOx, et donc une diminution de l'oxydation des composés biogéniques gazeux et des aérosols organiques secondaires (AOS) biogéniques.

Comparé au scénario FAP (S1), le scénario Essence (S2) accentue de 2 % environ cette baisse de concentrations en organiques, sauf sur l'Île-de-France. Sur l'Île-de-France, les variations des concentrations d'organiques sont surtout dues aux composés anthropiques (les COSV) qui sont plus ou moins oxydés. Comme pour les composés inorganiques, sur l'Île-de-France, les concentrations de COSV du trafic diminuent localement de manière plus importante dans la simulation Île-de-France que dans la simulation France. Ainsi, les baisses des COSV de la simulation France pour le scénario Essence (S2) comparé à FAP (S1) ne sont pas assez importantes localement pour contrecarrer l'augmentation des oxydants, et les concentrations en organiques secondaires augmentent. Comme pour les inorganiques, il faut noter que les différences entre les deux scénarios Essence (S2) et FAP (S1) (à la hausse ou à la baisse) sont faibles sur l'Île-de-France et que les concentrations en organiques diminuent dans toutes les simulations lorsque les scénarios sont comparés à la référence. En dehors de l'Île-de-France, le scénario Essence (S2) est légèrement plus favorable que le scénario FAP (S1) car les oxydants sont légèrement plus réduits dans le scénario Essence (S2) (régime limité en NOx avec une plus forte réduction des émissions de NOx dans le scénario Essence (S2)), induisant une baisse de l'oxydation des COV biogéniques et donc une baisse des AOS biogéniques.

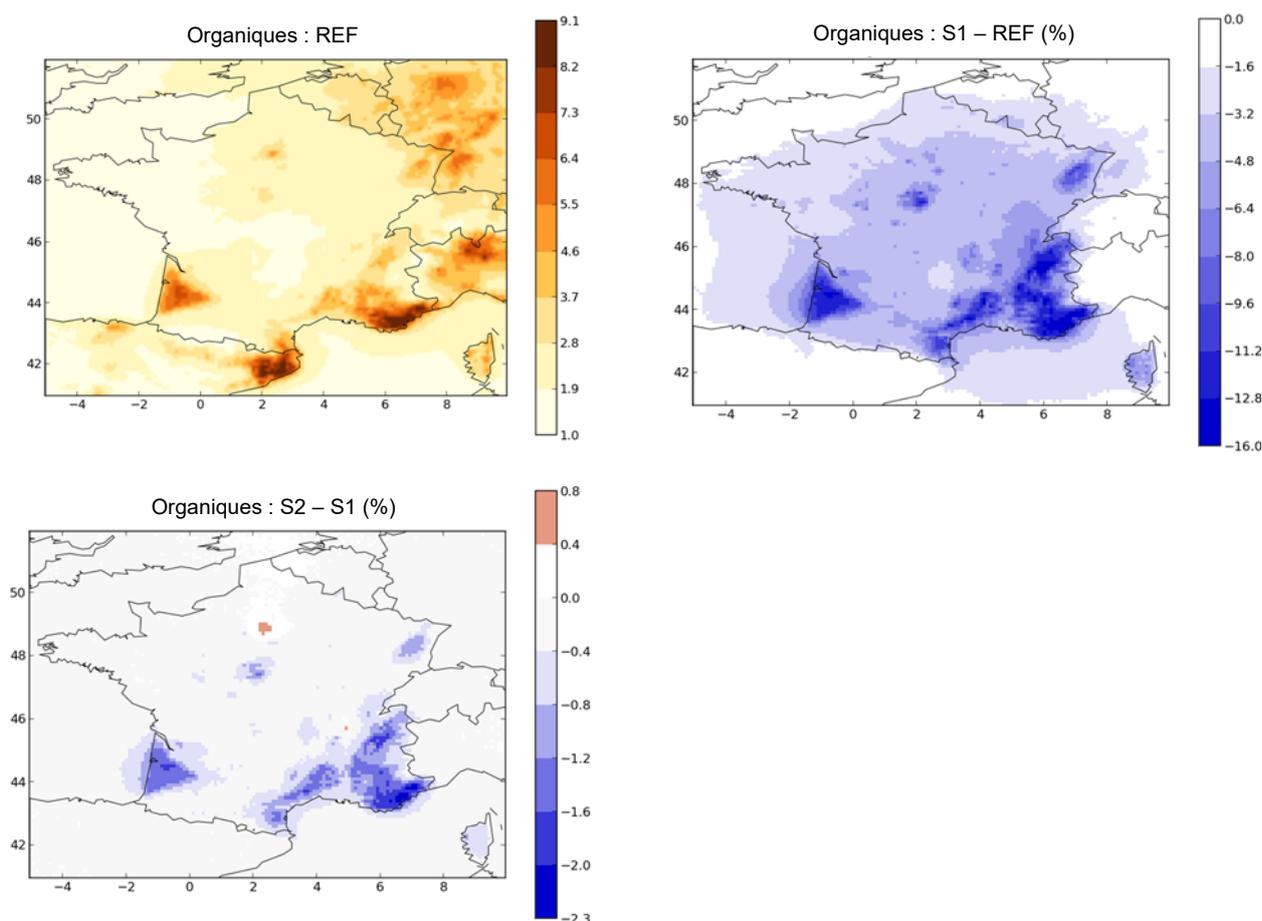


Figure 79 : Concentrations moyennes annuelles des organiques sur la France (en haut à gauche) en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Différences relatives entre les concentrations moyennes du scénario FAP (S1) et celles de la simulation de référence (en haut à droite). Différences relatives entre les concentrations annuelles du scénario Essence (S2) et celles du scénario FAP (S1) (en bas)

Pour la simulation de référence et pour les différents scénarios, le Tableau 50 montre différentes statistiques des concentrations sur la France métropolitaine. Pour chacun des polluants d'intérêt, la concentration moyenne annuelle est donnée ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), ainsi que l'écart type correspondant à la variation spatiale (sur les différentes mailles) des concentrations moyennes annuelles.

Tableau 50 : Statistiques des concentrations pour les différents scénarios – France métropolitaine (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sauf pour le nombre de particules PNC en $\#/\text{cm}^3$)

	PM _{2,5}	PM ₁₀	PM ₁₀ inorg.	PM ₁₀ .org.	BC	PNC*	NO ₂	O ₃
Seuil long terme (VG-OMS _{LT})	10	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Seuil court terme (VG-OMS _{CT})	25	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Référence								
• Concentration moyenne	13,5	14,3	7,1	2,6	0,3	3471	3,5	78,9
• Ecart type (var. spat.)	1,9	2,1	2,1	1,1	0,2	745	2,6	2,8
• P98 réf	34,8	36,2	19,7	8,8	0,9	8513	15,7	130,3
• > VG OMS _{LT} (%)	98,7	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
• > VG OMS _{CT} (%)	7,4	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
• > P98 réf (%)	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Scénario FAP (S1 - Généralisation du filtre à particules)								
• Concentration moyenne	13,0	13,7	6,7	2,4	0,3	3317	2,6	77,8
Variation p.r. réf (%)	-4,2	-4,0	-5,3	-5,1	-16,2	-4,4	-24,4	-1,4
• P98	33,9	35,3	19,0	8,2	0,8	8327	12,4	127,9
• > VG-OMS _{LT} (%)	97,8	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Variation p.r. réf (%)	-1,0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
• > VG-OMS _{CT} (%)	6,4	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Variation p.r. réf (%)	-13,0	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
• > P98 réf (%)	1,8	1,8	1,6	1,5	1,0	1,8	1,1	1,6
Variation p.r. réf (%)	-8,4	-8,7	-17,6	-24,9	-47,7	-9,1	-43,2	-22,4
Scénario Essence (S2 - promotion des motorisations essence, véhicules légers)								
• Concentration moyenne	12,9	13,7	6,7	2,4	0,3	3276	2,6	77,7
Variation p.r. réf (%)	-4,6	-4,4	-5,7	-5,5	-20,9	-5,6	-26,7	-1,6
• P98	33,8	35,2	19,0	8,1	0,7	8291	12,2	127,7
• > VG-OMS _{LT} (en %)	97,7	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Variation p.r. réf (%)	-1,1	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
• > VG-OMS _{CT} (%)	6,3	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Variation p.r. réf (%)	-14,2	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
• > P98 réf (%)	1,8	1,8	1,6	1,5	0,9	1,8	1,1	1,5
Variation p.r. réf (%)	-9,1	-9,4	-18,6	-27,3	-56,8	-10,9	-46,0	-23,9

* PNC : concentration en nombre de particules par cm^3 d'air n/a : non applicable

Comparé à la moyenne annuelle, les plus grands écarts types sont observés pour le NO₂ et le BC, car ces deux polluants sont des polluants de proximité principalement émis par le trafic, ainsi que pour les organiques, qui sont en partie émis par le trafic (COSV) et qui sont très sensibles aux concentrations en oxydants et donc en NO_x en zone rurale.

Comme pour les simulations sur l'Île-de-France, des seuils long terme VG-OMS_{LT} et court terme VG-OMS_{CT} – établis à partir des valeurs guides de qualité de l'air ambiant de l'OMS discutés en section 4.7 et définis dans le Tableau 13 – ont été utilisés pour quantifier l'influence des scénarios sur les niveaux de concentrations en PM_{2,5}. Ils sont rappelés en tête du Tableau 50. Pour quantifier l'influence sur les fortes concentrations horaires, le percentile 98 (P98) du scénario de référence, également décrit en section 4.7, a été utilisé comme seuil statistique.

Le seuil VG-OMS_{LT} pour les PM_{2,5} est pratiquement toujours dépassé (plus de 98 % des mailles), tandis que le seuil VG-OMS_{CT} est dépassé sur environ 7 % des mailles.

Ces statistiques corroborent les analyses faites à partir des cartes. Les statistiques qui comparent les différents scénarios à la référence sont semblables, sauf pour le BC qui est réduit de manière plus significative dans le scénario Essence (S2). Les concentrations ainsi que les occurrences de dépassements de seuils diminuent pour chacun des scénarios comparés à la référence. Les scénarios influencent plus les fortes concentrations journalières et horaires que les concentrations moyennes annuelles. Ainsi, les scénarios réduisent plus les occurrences de dépassement de seuils court terme (VG-OMS_{CT}, P98réf) que les concentrations moyennes.

Les plus fortes différences entre les scénarios et la référence sont observées pour le NO₂ (-24 % à -27 % en moyenne annuelle), le BC (-16 % à -21 % en moyenne annuelle, de -48 % à -57 % pour les occurrences de dépassement du seuil P98réf pour les plus fortes concentrations horaires), ainsi que pour les fortes concentrations horaires d'organiques (-25 % à -27 % pour les occurrences de dépassement du seuil P98réf). Pour les particules (PM_{2,5}, PM₁₀) et les composés secondaires des particules (inorganiques, organiques), la baisse des concentrations moyennes annuelles est faible (entre -4 % et -6 %), tandis que la baisse des occurrences de dépassements du seuil P98réf est plus importante (de -8 % à -27 %). Le nombre de particules baisse également légèrement en moyenne annuelle (-4 % à -6 %) et de manière plus importante pour les occurrences de dépassements du seuil P98réf (-9 % à -11 %).

Comme l'avait montré l'analyse des cartes ci-dessus, les statistiques du scénario Essence (S2) sont proches de celles du scénario FAP (S1). Pour les différents polluants, le scénario Essence (S2) est toujours plus favorable que le scénario FAP (S1), bien que les différences soient faibles. Les plus grosses différences sont observées pour BC, car c'est un polluant inerte dont les émissions sont nettement réduites dans le scénario Essence (S2). En dehors des villes, le régime chimique est NOx limité. Ainsi, le scénario Essence (S2) qui émet légèrement moins de NOx que le scénario FAP (S1) est plus favorable pour les polluants secondaires.

La Figure 80 résume l'évolution des concentrations moyennes annuelles de polluants gazeux et particulaires à l'échelle de la France métropolitaine au travers des différents scénarios simulés, par rapport au scénario de référence (année 2014).

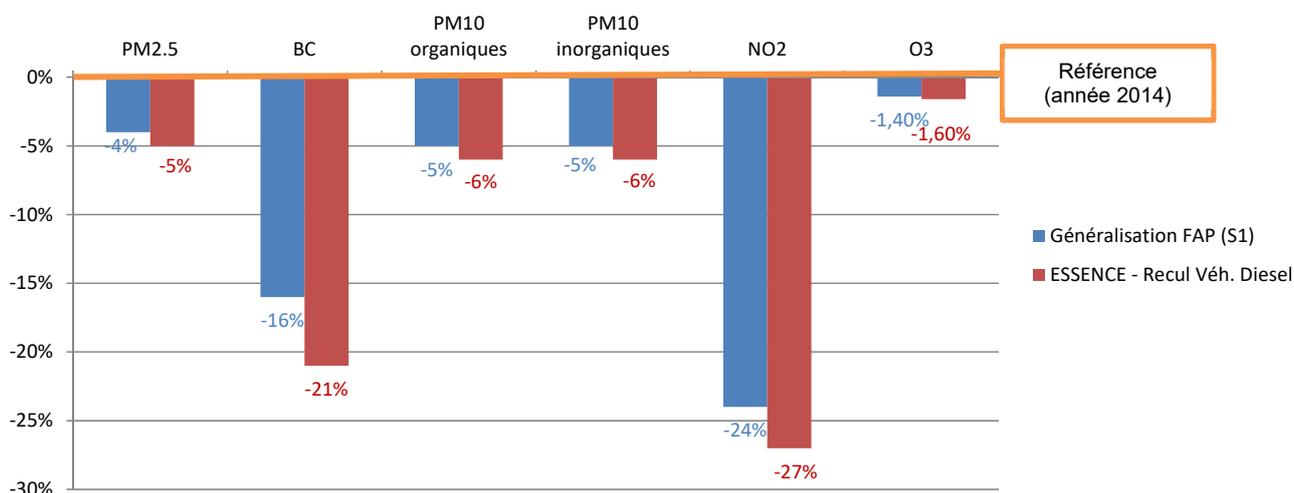


Figure 80 : Évolution des concentrations moyennes annuelles ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de PM_{2,5}, BC, PM₁₀ organiques, PM₁₀ inorganiques, NO₂ et O₃ : Différences relatives (en %) entre les scénarios prospectifs et le scénario de référence, en France

Analyses mensuelles locales

Les analyses précédentes ont été faites en moyenne sur toute une année. Cependant, elles cachent des disparités saisonnières, liées notamment aux caractéristiques météorologiques. Ces différences saisonnières impactent surtout les composés secondaires : O_3 , les composés inorganiques et organiques des particules.

En dehors des villes, l'influence des scénarios est identique quelle que soit la saison : le régime chimique étant limité en NO_x , les concentrations diminuent. Comme les émissions des précurseurs inorganiques et organiques (NO_2 et COSV) diminuent elles aussi, les concentrations des différents polluants diminuent. Par contre, dans les villes, l'influence des scénarios peut être différente selon les saisons.

Dans l'analyse présentée ci-dessous, il faut garder à l'esprit que par la résolution spatiale grossière de la simulation France ($0,1^\circ \times 0,1^\circ$), l'augmentation des oxydants peut mener à une augmentation artificielle ou à une faible diminution des concentrations en inorganiques et organiques sur les villes. Une meilleure estimation des variations des inorganiques et organiques serait obtenue avec une résolution plus fine (comme pour les simulations Île-de-France).

Dans les analyses mensuelles présentées, trois villes sont considérées : Marseille, Bordeaux et Lyon (Figure 81). Pour chacune de ces grandes agglomérations, une ville voisine géographiquement mais également proche des lieux d'émissions biogéniques est également analysée (Draguignan pour Marseille, Mimizan pour Bordeaux, Grenoble pour Lyon).

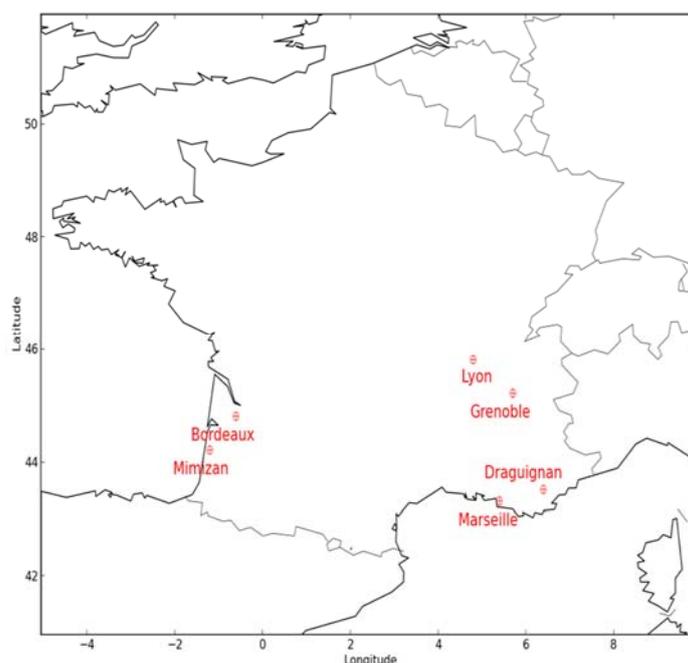


Figure 81 : Localisation des points choisis pour les analyses mensuelles

Comme le montre la Figure 82, l' O_3 augmente dans toutes les villes (Lyon, Grenoble, Bordeaux, Marseille) en hiver, tandis qu'il diminue en été. Cependant, en été, cette baisse n'est observée qu'en juillet à Marseille. Cette différence saisonnière est due aux variations de régime chimique avec les saisons. En hiver, les émissions de COV biogéniques sont faibles et les zones urbanisées sont plutôt limitées en COV. La forte réduction des émissions en NO_x engendrée par les scénarios entraîne une baisse des oxydants et de l' O_3 . En été, les émissions de COV biogéniques sont importantes et les zones urbanisées peuvent devenir limitées en NO_x , et la forte réduction des émissions en NO_x par les scénarios entraîne une hausse des oxydants et de l' O_3 . Cependant, à l'intérieur de Paris

(intra-A86) qui est très urbanisé et éloigné des lieux de fortes émissions biogéniques, l'O₃ augmente toute l'année.

Les variations de régime chimique expliquent également que les augmentations d'O₃ sont plus fortes (hiver) et les diminutions plus faibles (été) sur les grandes villes que sur les régions environnantes qui sont moins urbanisées. Ainsi, l'O₃ diminue fréquemment à Draguignan et Mimizan, alors qu'à la même période, il augmente à Marseille et à Bordeaux. Le scénario Essence (S2) accentue systématiquement les différences avec la référence, car les émissions de NO_x sont plus réduites que dans le scénario FAP (S1) : quand l'O₃ augmente dans le scénario FAP (S1), il augmente plus dans le scénario Essence (S2) (le régime chimique est alors COV limité et une diminution des NO_x entraîne une augmentation de l'O₃) ; quand l'O₃ diminue dans le scénario FAP (S1), il diminue plus dans le scénario Essence (S2) (le régime chimique est alors NO_x limité et une diminution des NO_x entraîne une diminution de l'O₃).

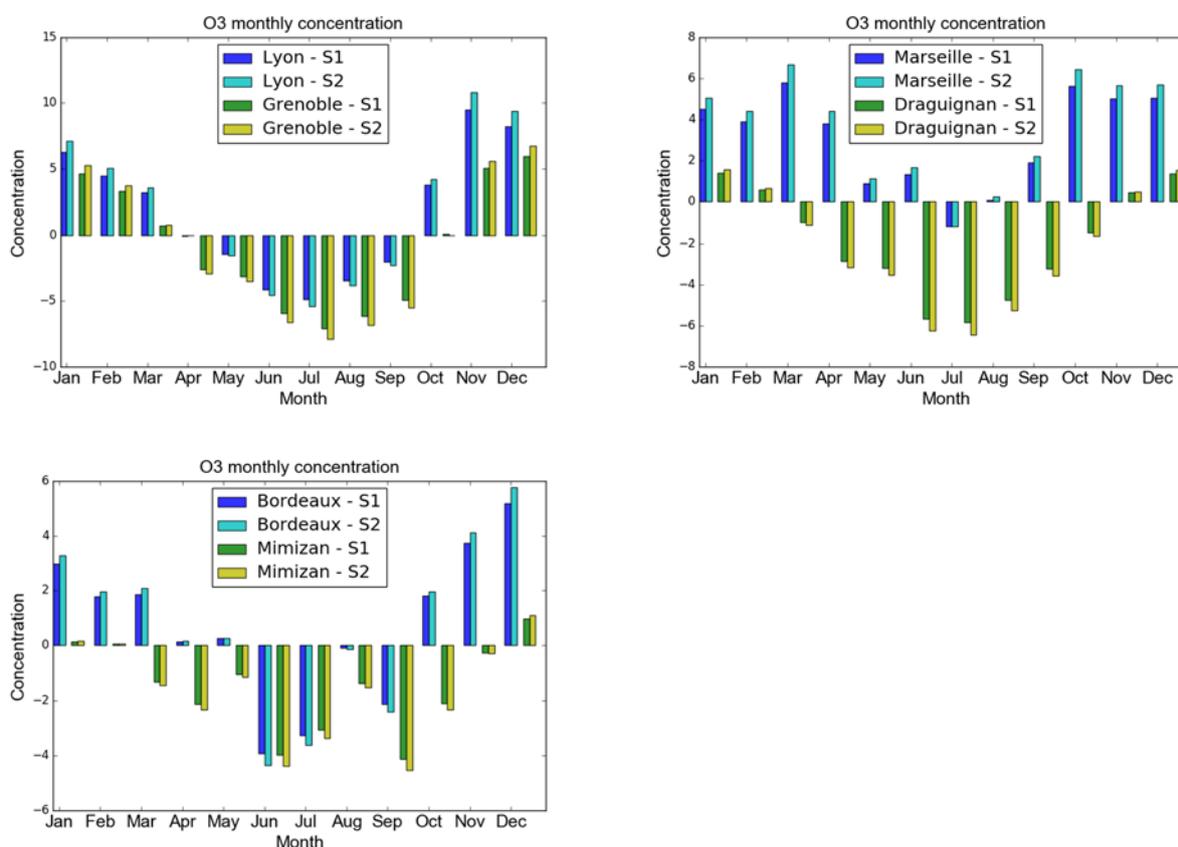


Figure 82 : Différences mensuelles par rapport à la simulation de référence, des concentrations d'O₃ (en µg/m³) des scénarios FAP (S1) et Essence (S2) à Lyon et Grenoble (en haut à gauche), à Marseille et Draguignan (en haut à droite), à Bordeaux et Mimizan (en bas)

De manière similaire à l'analyse sur l'Île-de-France, bien que les concentrations d'O₃ augmentent en hiver dans les grandes villes, les concentrations en inorganiques et organiques diminuent pour tous les scénarios toute l'année en moyenne mensuelle (Figure 83 et Figure 84).

Pour les organiques, en hiver, les réductions de concentrations sont plus faibles qu'en été, car les réductions proviennent de la baisse des émissions de précurseurs anthropiques (COSV). Cette baisse est suffisamment grande comparée à l'augmentation des concentrations en oxydants pour permettre une réduction des concentrations en organiques. En été, la réduction des concentrations est plus importante qu'en hiver car elle provient de la réduction des oxydants, qui induit une réduction des AOS biogéniques. Ainsi, en été, les réductions à Grenoble, Draguignan et Mimizan (plus

proches des lieux d'émissions biogéniques) sont plus importantes que celles à Lyon, Marseille et Bordeaux respectivement.

En hiver, le scénario Essence (S2) entraîne une diminution légèrement plus faible des concentrations d'organiques que le scénario FAP (S1) à Lyon et Marseille. Cependant, comme ces deux scénarios diffèrent principalement par les concentrations d'organiques anthropiques, cette différence pourrait être inversée avec une résolution plus fine, comme constaté pour l'Île-de-France. Une baisse plus forte pour le scénario Essence (S2) serait alors liée à une baisse localement plus importante des émissions de COSV.

En été, le scénario Essence (S2) entraîne une diminution légèrement plus importante des concentrations d'organiques que le scénario FAP (S1), car les oxydants sont plus réduits dans le scénario Essence (S2), entraînant une baisse plus importante des concentrations en AOS biogéniques.

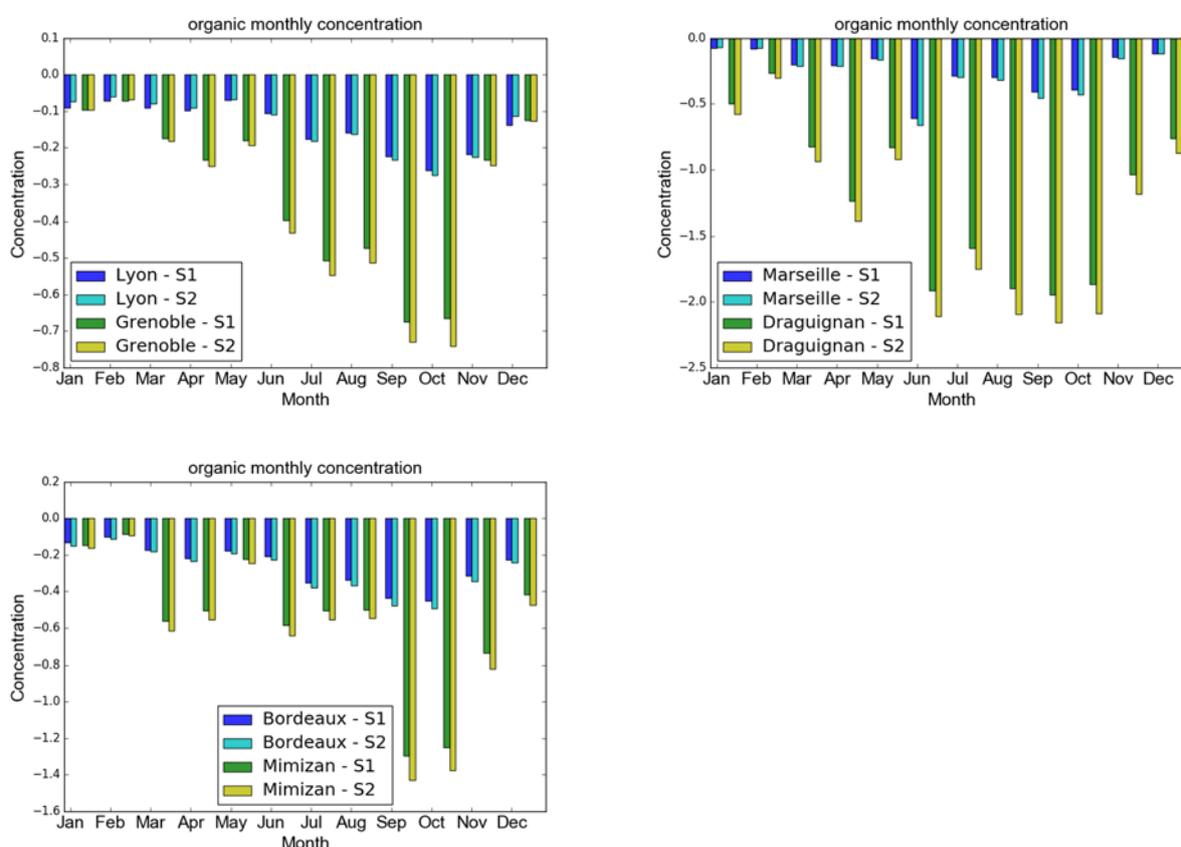


Figure 83 : Différences mensuelles par rapport à et la simulation de référence, des concentrations d'organiques ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) des scénarios FAP (S1) et Essence (S2), à Lyon et Grenoble (en haut à gauche), à Marseille et Draguignan (en haut à droite), à Bordeaux et Mimizan (en bas)

Pour les inorganiques, la baisse des concentrations est due à la baisse des émissions de NO_2 , qui en hiver est suffisamment grande pour contrecarrer l'augmentation des concentrations en oxydants. Les baisses mensuelles les plus grandes en valeur absolue sont en mars et en septembre-octobre, quand les concentrations en inorganiques sont les plus fortes. Les baisses en inorganiques sont plus fortes à Marseille et à Bordeaux qu'à Draguignan et à Mimizan respectivement, car les émissions de NO_2 y sont plus réduites dans les zones urbanisées.

Les concentrations en inorganiques du scénario Essence (S2) sont en général plus basses que celles du scénario FAP (S1), car les émissions de NO_2 sont plus réduites. Cependant, à Marseille, les concentrations du scénario FAP (S1) sont plus basses que celles du scénario Essence (S2), car

les oxydants augmentent moins avec ce scénario FAP (S1). Comme pour l'Île-de-France, cette différence entre les scénarios pourrait être inversée avec une résolution plus fine, ce qui entraînerait localement des diminutions plus importantes de NO₂, qui pourraient éventuellement compenser l'augmentation des oxydants.

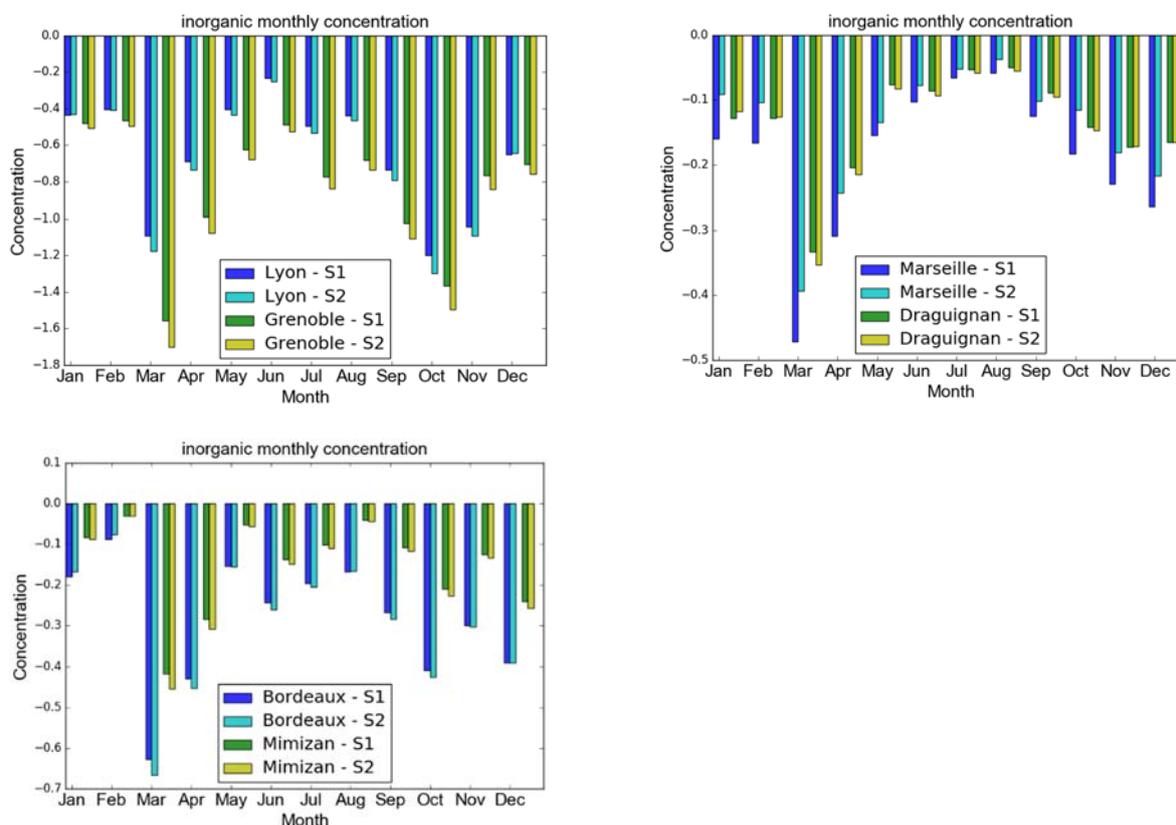


Figure 84 : Différences mensuelles par rapport à et la simulation de référence, des concentrations d'inorganiques ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) des scénarios FAP (S1) et Essence (S2), à Lyon et Grenoble (en haut à gauche), à Marseille et Draguignan (en haut à droite), à Bordeaux et Mimizan (en bas)

6.4 Conclusions

Les simulations des émissions et concentrations de polluants sur la France métropolitaine conduisent à des conclusions assez similaires à celles des simulations sur l'Île-de-France, mais les réductions moyennes des émissions totales par les scénarios sont plus faibles (moindre poids des émissions du trafic sur le territoire national qu'en Île-de-France).

Comme pour l'île de France, il existe cependant une forte variabilité géographique (agglomérations, régions boisées) et saisonnière. Les polluants émis dans l'atmosphère sont transportés et subissent différentes transformations chimiques. La chimie étant non linéaire, les réductions des concentrations ne sont pas directement proportionnelles à celles des émissions pour les polluants secondaires et dépendent du régime chimique.

Les différences entre les scénarios et la simulation de référence peuvent être importantes, surtout pour NO₂, BC et les fortes concentrations d'organiques. Cependant, les différences entre les scénarios sont faibles par rapport aux différences observées entre un scénario et la simulation de référence. Les scénarios influencent plus les fortes concentrations que les concentrations moyennes annuelles.

Statistiquement, des réductions des concentrations sont également observées pour tous les polluants, mais pour l'ozone, les grandes agglomérations peuvent voir leurs concentrations augmenter.

Globalement le scénario Essence (S2, promotion des véhicules légers essence au détriment des Diesel) présente un avantage sur le scénario FAP (S1, généralisation du filtre à particule dans un scénario quasi au fil de l'eau), conduisant généralement à une baisse supplémentaire des concentrations par rapport à ce dernier.

Dans les régions où le régime chimique est NO_x limité, les concentrations de tous les polluants baissent dans les scénarios par rapport à la situation de référence. C'est le cas des régions rurales et à proximité des régions de fortes émissions biogéniques : dans les Landes au Sud-Ouest, dans le Languedoc et les Cévennes au Sud-Est, dans le centre en Auvergne et dans l'Est avec le Jura, le régime chimique est NO_x limité. C'est aussi le cas de certaines grandes villes en été.

Dans les régions où le régime chimique est COV limité, les concentrations de tous les polluants baissent sauf celles d'ozone qui augmentent (mais les concentrations y sont faibles). C'est le cas des grandes villes de France, particulièrement en hiver. Cette augmentation de l'ozone et des oxydants dans les grandes villes peut entraîner une augmentation de la production d'aérosols secondaires (inorganiques et organiques) si les émissions des précurseurs gazeux des particules ne sont pas maîtrisées (NO₂ et composés organiques).

Les PM_{2,5} sont réduits dans les scénarios. La baisse est de -4 % sur l'ensemble du territoire et peut aller jusqu'à -11 % en moyenne annuelle pour le scénario FAP (S1). Par rapport au scénario FAP (S1), le scénario Essence (S2) mène à une légère baisse supplémentaire (1 %). Cependant, la baisse des PM_{2,5} diffère selon les composés des particules.

Le BC est un composé inerte et émis principalement par le trafic routier. Les plus fortes concentrations sont donc observées dans les zones de trafic. Le scénario FAP (S1) induit une forte réduction de ces concentrations (-16 % sur l'ensemble du territoire et jusqu'à -31 % localement). Les concentrations de BC sont réduites aux endroits où les émissions sont les plus fortes. Par rapport au scénario FAP (S1), le scénario Essence (S2) induit une réduction qui va jusqu'à -13 %.

Sur la France, la diminution des concentrations des composés inorganiques des particules est due à la baisse des émissions de NO₂. Le scénario FAP (S1) induit une réduction des concentrations en inorganiques entre -1 % et -15 % (-5 % en moyenne). Le scénario Essence (S2) accentue légèrement cette baisse (-2 %).

Pour les concentrations des composés organiques des particules, le scénario FAP (S1) entraîne une diminution des concentrations d'organiques (jusqu'à -16 %), notamment dans les régions émettrices de composés biogéniques. Comparé au scénario FAP (S1), le scénario Essence (S2) accentue de -2 % environ cette baisse de concentrations en organiques, sauf sur l'Île-de-France. Pour les organiques, en hiver dans les villes, les diminutions de concentrations sont plus faibles qu'en été. Une diminution plus importante nécessiterait une réduction plus nette des émissions des précurseurs gazeux d'aérosols organiques secondaires.

7 Avantages et limites de l'approche, et incertitudes

Dans ce chapitre, le groupe de travail s'est attaché à identifier les différentes sources d'incertitudes de l'ensemble de la démarche de simulation des émissions et concentrations de polluants pour différents scénarios d'évolution technologique, telle que développée aux chapitres précédents. Les simulations comportent un nombre important d'hypothèses, de données d'entrées, de mécanismes et d'interactions entre ces différents éléments qui sont discutés ci-après et dont les principales incertitudes sont analysées. Les modèles d'émissions / pollution atmosphérique incluent un grand nombre de modules, dont la précision peut varier en lien avec le niveau des connaissances. La comparaison des simulations avec des mesures de concentrations atmosphériques démontre cependant la validité de l'approche.

La première partie de ce chapitre analyse de manière qualitative les avantages / qualités et les limites de l'approche, notamment en regard des incertitudes des simulations et des hypothèses retenues. Elle est complétée par une synthèse des travaux menés lors de l'élaboration du PREPA (Plan National de Réduction des Émissions de Polluants Atmosphériques) et formule également des recommandations.

Dans une seconde partie seront renseignées, à partir de la littérature scientifique et technique, les incertitudes associées à différentes données et éléments de la modélisation, aux facteurs d'émission et aux résultats, ainsi que la sensibilité des estimations à certains paramètres.

Enfin des analyses spécifiques menées dans ce cadre contribueront à documenter la sensibilité des résultats à certains paramètres importants des simulations.

7.1 Avantages et limites de l'approche

En regard de la question posée : « investiguer l'évolution rétro-prospective des émissions de particules liées au trafic routier et l'impact des technologies de dépollution », l'approche et les principales options retenues (simulation des émissions et des concentrations de polluants sous différents scénarios, modèles et échelles d'analyses et hypothèses diverses des calculs) sont discutées dans cette section en regard de leurs avantages et limites.

7.1.1 Simulation des émissions et des concentrations de polluants

Seule la simulation permettait d'aborder quantitativement l'aspect prospectif de l'évolution des émissions. Ne considérer que les émissions aurait été insuffisant pour la prise en compte de l'impact des transports sur la pollution de l'air et pour cette raison le recours à la simulation atmosphérique s'imposait également.

Le choix a été fait de mettre en œuvre les outils parmi les plus avancés pour ces travaux de simulation, notamment :

- les outils de calcul des émissions de polluants du trafic basés sur la méthodologie européenne COPERT4, qui fait l'objet d'un large consensus et permet d'estimer les émissions réelles en tenant compte de nombreux paramètres (conditions ambiantes, vitesses de circulation, etc.) et notamment la composition détaillée du parc automobile ;
- la plate-forme de simulation atmosphérique Polyphemus, qui est à ce jour celle qui intègre en accord avec l'état de l'art scientifique le plus grand nombre de phénomènes intervenant dans la pollution atmosphérique et contribuant spécifiquement à la pollution particulaire.

Ces outils ont été mis en œuvre sur la région Île-de-France, avec les données les plus fines disponibles sur ce territoire, pour une simulation précise des phénomènes et de la pollution. Les émissions sont ainsi simulées au pas horaire et par mailles de 1 km x 1 km, et les concentrations de polluants à une échelle quasi-équivalente (2 km x 2 km). Ces échelles spatio-temporelles permettent une bonne représentation et analyse de la pollution de fond, qui est l'enjeu majeur actuel

de la pollution atmosphérique. Elles permettent également la validation de l'approche pour la situation de référence, par la comparaison des valeurs simulées avec les concentrations mesurées (à l'exception des sites de proximité des sources d'émission).

Ces échelles sont par contre insuffisantes pour appréhender la pollution de proximité (notamment autour des grands axes routiers) et par conséquent pour caractériser l'exposition des personnes qui habitent à proximité de, ou fréquentent ces axes. Ce point sera discuté plus loin (section 7.1.4).

Les simulations ont été effectuées en considérant les imports de pollution aux échelles supérieures (de l'Europe vers la France, de la France vers l'Île-de-France) permettant une prise en compte exhaustive des pollutions selon leurs origines. Les simulations sur la France considèrent une évolution des émissions du trafic en France similaire à celle observée en Île-de-France, évitant ainsi une discontinuité artificielle des niveaux d'émissions aux frontières de la région et permettant une analyse des scénarios sur le territoire national et selon les contextes locaux.

7.1.2 Approche par scénarios dans un contexte invariant

L'approche par scénarios permet de tester en prospective différentes hypothèses d'évolution des technologies (et du trafic).

La comparaison de ces scénarios et le souhait d'isoler leur effet spécifique a conduit cependant à maintenir invariantes de nombreuses autres conditions. C'est ainsi que la météorologie, l'activité (volume total de trafic et activité des autres secteurs émetteurs), les émissions de polluants des autres secteurs, la population, etc. ont été fixées, tandis que seules les émissions du trafic routier variaient, et seulement en fonction de l'évolution des technologies (invariance de la répartition du trafic, des conditions de circulation, des comportements, etc.). De même les simulations atmosphériques à échelle européenne sont invariantes.

Ces aspects, ainsi que le recours à des profils d'activité, sont discutés ci-après.

7.1.2.1 Émissions constantes des autres secteurs

Cette hypothèse de constance des émissions des autres secteurs permet d'analyser l'influence des émissions du trafic sous différents scénarios. Elle n'induit d'ailleurs vraisemblablement pas de biais dans les comparaisons de scénarios compte tenu des résultats contrastés en émissions.

En Île-de-France, les émissions du secteur résidentiel et du trafic sont prédominantes, tandis que l'agriculture a un impact (saisonnier) sur les pics de pollution (section 3.3). Dans les scénarios prospectifs, seules les émissions du trafic diminuent, alors que les émissions des autres secteurs devraient également évoluer et probablement baisser, de même que les imports de polluants des échelles supérieures. Ceci pourrait donc amplifier les diminutions des concentrations de polluants.

La comparaison des scénarios technologiques prospectifs entre eux pourrait cependant être affectée par la prise en compte de l'évolution des émissions des autres secteurs à l'horizon 2025, en raison de leurs impacts potentiels sur la chimie atmosphérique et donc sur la production d'ozone ou d'aérosols secondaires. Mais dans un contexte d'émissions totales globalement à la baisse, il est vraisemblable que cette influence soit limitée.

Recommandations pour aller plus loin sur cette question :

- considérer les évolutions prospectives des émissions des autres secteurs au travers des travaux européens (EMEP 2020⁶⁰) et nationaux (travaux de l'INERIS). Des incertitudes élevées seraient cependant liées à ces évolutions et à leur prise en compte ;
- simuler les scénarios (émissions / concentrations) avec une hypothèse basse des émissions des autres secteurs et ainsi conforter la stabilité des résultats.

⁶⁰ http://www.ceip.at/ms/ceip_home1/ceip_home/webdab_emepdatabase/webdab_usersguide/

7.1.2.2 Autres invariants des scénarios

D'autres hypothèses ont été considérées comme invariantes dans les scénarios (trafic, conditions climatiques, population et comportements de mobilité, zones urbaines, etc.), répondant ainsi à l'objectif de comparaison d'options technologiques des véhicules. Le choix d'une année météorologique moyenne et récente (2014) garantit une certaine représentativité des résultats.

La prise en compte de l'évolution des trafics, de la répartition modale, de l'extension urbaine ou encore des comportements de mobilité aurait nécessité le recours à de nombreux autres champs d'expertise et, de ce fait, dépassait largement le cadre de ces travaux.

7.1.2.3 Simulation sur des données statistiques annuelles d'activité

Certaines données d'activité (trafic, résidentiel) permettent un calcul horaire des émissions de polluants, mais globalement les inventaires d'émissions sont agrégés annuellement. Les simulations des concentrations atmosphériques reposent donc sur une désagrégation des émissions annuelles régionales et nationales (trafic, autres secteurs), par des profils d'activités empiriques (mensuel, journalier, horaire), qui rendent compte de la variabilité temporelle des activités des différents secteurs. Ces profils d'activité sont actuellement très simplifiés :

- les profils horaires des jours de semaine sont constants par exemple et insensibles aux variations météorologiques ; ils reposent sur peu de données pour certains secteurs d'activité ;
- pour la France entière et l'Europe, les mêmes profils d'activités sont considérés, alors que des variations régionales sont probables.

L'utilisation de ces données statistiques d'activités permet cependant la comparaison des scénarios simulés tout en garantissant une certaine représentativité. Compte tenu de leur influence sur les émissions, il serait intéressant d'analyser la sensibilité des simulations à ces profils.

7.1.3 Avantages et limites liés aux modèles

Les méthodologies retenues sont parmi les plus avancées. Mais les modèles restent des simplifications de la réalité et des phénomènes complexes de la pollution atmosphérique, et certains phénomènes sont moins bien connus (facteurs d'émissions de polluants non réglementés, spéciations, abrasion, etc.) ou estimés plus grossièrement (émissions par évaporation, abrasion) en raison de la fragilité des connaissances. La disponibilité et la qualité des données d'entrée des modèles sont d'autres sources d'approximation. Ces différents aspects sont décrits ici.

7.1.3.1 Modèle d'émissions de polluants du trafic

Plusieurs aspects sont à considérer : les fragilités intrinsèques aux modèles (faiblesse de connaissance sur certains polluants ou phénomènes) d'une part, et des approximations liées à leur mise en œuvre liées notamment à la disponibilité et la qualité des données d'entrée des calculs. La remise en suspension de particules et l'évaporation sont aussi discutées.

Fragilités intrinsèques des modèles de calcul des émissions du trafic

Le modèle d'émissions consiste en des facteurs et fonctions d'émissions (pour chacun des polluants) établis par catégories détaillées de véhicules, en raison de la forte variabilité des émissions selon les technologies / motorisations et réglementations (pollution) auxquelles elles se réfèrent. Ces modèles / fonctions ont été élaborés à partir de mesures d'émissions en laboratoire voire sur route, dans des conditions déterminées et représentatives des conditions de circulation européennes (plusieurs cycles de conduite, conditions ambiantes lors des tests). Généralement, ce sont des échantillons de quelques véhicules (3 à 10) qui sont testés pour représenter une catégorie. Les expérimentations sont menées dans différents laboratoires européens (généralement sans exercice d'inter-comparaison) et les données sont mises à disposition de groupes de travail qui en assurent l'analyse et notamment la construction des modèles.

Les connaissances selon les polluants et selon les mécanismes d'émission sont cependant très hétérogènes. Ainsi, les polluants « réglementés » à l'échappement ont été l'objet de nombreux tests

sur l'ensemble des catégories de véhicules et les fonctions d'émission peuvent être considérées comme fiables. Les polluants non réglementés ou émergents (particules selon leur taille, précurseurs, espèces ou familles de COV, HAP, métaux lourds) sont moins bien connus (peu de tests, risques de contaminations pour les métaux), de même que les émissions hors échappement (abrasion – approchée principalement par la littérature et des expérimentations *in situ*, en laboratoire pour les freins et pneus).

Concernant l'échappement, une modélisation statistique des émissions de polluants est réalisée, selon la vitesse, la température, l'humidité, le kilométrage, la taille, le chargement, etc. Plusieurs phénomènes d'émission sont considérés : émissions à chaud, surémissions liées au démarrage à froid, à l'évaporation (selon les usages, la météorologie moyenne mensuelle), à la climatisation, etc. Des fonctions de correction des émissions peuvent être appliquées (selon le chargement, la pente de la route, etc.), mais elles le sont rarement en réalité.

De nombreux paramètres sont implicites (non paramétrés) dans la modélisation. Ainsi, sont considérées des conditions moyennes de l'état d'entretien, de l'âge (pour une même catégorie), du fonctionnement et de l'usage des véhicules (longueurs / nombre / durées de trajets), un carburant moyen et sans tenir compte de l'heure du trajet, du jour / mois dans l'année (sauf par la température moyenne et un gradient mini-maxi mensuel).

La classification des véhicules est relativement simplifiée (3 ou 4 classes de cylindrées, classes assez larges de PTAC pour les véhicules lourds, quelques types principaux de motorisations, déclinaison détaillée selon les classes réglementaires), en lien avec la difficulté et le coût d'élaboration des facteurs d'émissions à partir de tests sur banc d'essai.

Fragilités liées à la mise en œuvre des modèles de calcul des émissions du trafic

La classification des véhicules associée aux lacunes de connaissance sur *les compositions du parc automobile en circulation* induit une imprécision des calculs d'émissions. Lors des calculs d'inventaires nationaux d'émissions du trafic, un bouclage sur la consommation des différents types de carburants permet d'ajuster les estimations, mais ce n'est pas le cas pour des estimations régionales.

D'autres hypothèses de calcul des émissions du trafic sont également sources d'imprécision des estimations. Ce sont notamment :

- pour les simulations régionales (cas de l'Île-de-France) :
 - o les vitesses de circulation du trafic : estimées à partir de modèles de trafic et de données de comptages, les vitesses moyennes horaires minimisent la congestion et peuvent être surestimées ; elles rendent peu compte de la variabilité temporelle et spatiale des conditions de circulation,
 - o les hypothèses de démarrage à froid : elles sont souvent assez arbitraires (% de trajet effectué à froid selon les types de réseaux ou en / hors zone urbaine), mais difficilement quantifiables dans la réalité,
 - o finalement, les imprécisions de localisation et de répartition temporelle liées à la simulation du trafic d'une part et aux calculs des émissions notamment de démarrage à froid et d'évaporation d'autre part, induisent une approximation de la répartition spatiale et temporelle des émissions ;
- pour les simulations nationales (France), les hypothèses de vitesse de circulation et de démarrage à froid / évaporation sont beaucoup plus macroscopiques ou agrégées (urbain, rural, autoroute), et les estimations doivent être considérées à des échelles spatio-temporelles assez larges.

Se reporter à la section 7.2 pour des éléments quantitatifs ou qualitatifs sur les incertitudes des facteurs d'émissions et des calculs.

Cas particulier des simulations Île-de-France (plate-forme Heaven)

Les facteurs d'émission utilisés à l'échelle régionale sont issus du guide méthodologique EMEP/EEA 2013 mis à jour en septembre 2014 (EEA 2013) et correspondent aux valeurs du logiciel COPERT 4 v11.3 (juin 2015)⁶¹.

Comme évoqué précédemment, les facteurs d'émission liés à l'abrasion (freins, pneus, route) sont entachés de fortes incertitudes. Or, les émissions hors échappement représentent entre 30 et 50 % des émissions du trafic et cette part devrait augmenter avec la baisse des émissions à l'échappement.

Les facteurs d'émission à l'échappement (NO_x, CO, COV, PM...) sont mieux connus, mais leur connaissance est limitée pour les véhicules les plus récents par le faible nombre de tests / mesures d'émissions. Les facteurs d'émissions de particules sont également questionnables du fait de la procédure d'échantillonnage (taux de dilution faibles devant ceux entre l'échappement et l'atmosphère) et de l'absence d'une prise en compte explicite des composés semi-volatils. De plus, ces facteurs d'émission « agrégés » (fonction de la vitesse moyenne) ne rendent pas compte de la variabilité des conditions réelles de conduite (par exemple, la variabilité entre différentes situations ou différents comportements de conduite pour une vitesse moyenne). Par ailleurs, les données horaires de vitesses de circulation (utilisées dans les calculs d'émissions) ne rendent pas non plus compte de cette variabilité.

Pour les HAP, le guide méthodologique EMEP/EEA indique que les facteurs d'émission ne sont que des ordres de grandeur. Ils ne dépendent pas du type d'émission (à froid ou à chaud) et ont été déterminés à partir de spéciations anciennes (1989, 1993 et 1994).

Remise en suspension de particules

La principale difficulté d'estimation de la remise en suspension de particules par le trafic est liée à la multiplicité des origines et natures des particules déposées sur le sol et potentiellement remises en suspension dans l'atmosphère. De plus, de nombreux facteurs ont un impact direct sur la remise en suspension : le type de routes (urbaine, autoroute...) et leurs états, le type de véhicules (véhicules légers ou poids lourds), la vitesse de circulation et les conditions météorologiques. Ainsi, une étude réalisée par Amato et al. (2016) sur la remise en suspension à Paris montre une grande hétérogénéité de résultats. Dans cette étude, les auteurs ont mesuré la quantité de particules PM₁₀ déposées sur différentes routes de la ville et la remise en suspension sur le Boulevard Périphérique au niveau de la porte d'Auteuil. Les résultats montrent de grandes disparités en fonction du type de route. Ainsi, la quantité de PM₁₀ mesurée sur 6 routes à Paris s'échelonne entre 0,66 mg/m² avenue d'Italie et 2,43 mg/m² sur le Boulevard Périphérique. Une quantité très supérieure, 10,28 mg/m², est observée avenue de la Grande Armée, probablement en raison des pavés qui la compose. Sur le Boulevard Périphérique, les PM₁₀ issues de la remise en suspension représente 22 % contre 78 % provenant de l'échappement et de l'abrasion (pneus et freins) suivant cette étude.

Ces résultats montrent que la prise en compte de la remise en suspension dans les modèles de chimie-transport est complexe et requiert de nombreux développements. Néanmoins, des travaux expérimentaux réalisés avec les sorties du modèle de trafic d'Airparif semblent indiquer que les simulations actuelles sont représentatives des niveaux observés en Île-de-France. Ainsi, dans le modèle Heaven, des tests ont été réalisés afin de comparer les concentrations simulées et celles observées sur le réseau de mesure d'Airparif (Figure 85). Ces deux types de concentrations ne présentent pas de biais systématique sur l'ensemble des stations. En effet, sur plusieurs des stations en proximité de trafic (avenue des Champs-Élysées, Boulevard Périphérique d'Auteuil, porte de Pantin...) le modèle a tendance à sous-estimer les concentrations, tandis que sur d'autres stations (Place Victor Basch, RN6, place de l'Opéra, Haussmann...) le modèle a tendance à les surestimer. Enfin, les concentrations sont correctement simulées pour la station de l'autoroute A1. Les différences entre les concentrations simulées et observées sont néanmoins satisfaisantes sur la majorité des stations.

⁶¹ <http://emisiam.com/products/copert/versions>

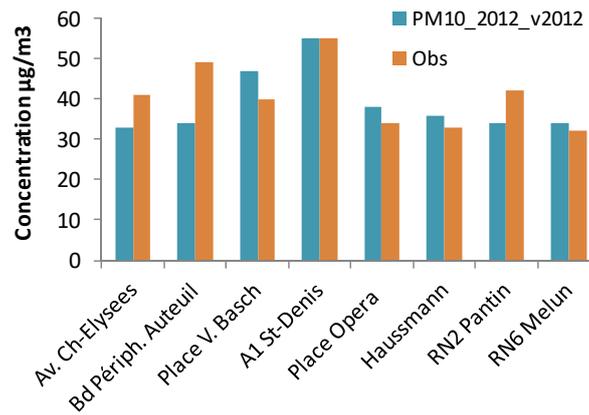


Figure 85 : Comparaison entre les concentrations annuelles observées sur les stations de proximité au trafic en Île-de-France et les résultats de simulation

De même, la part de particules issue de l'échappement et la part de celles émises hors échappement (abrasion, remise en suspension...) ont également été calculées avec le modèle Heaven en combinaison avec des observations *in situ*. Les pourcentages des émissions de particules hors échappement s'échelonnaient entre 37 et 42 % des émissions totales du trafic. Cette proportion est cohérente avec les résultats de la littérature pour les zones tempérées.

Ainsi, bien que la remise en suspension ne soit pas représentée en tant que telle dans le modèle Heaven, mais uniquement prise en compte de façon simplifiée dans l'abrasion des routes, ceci ne semble pas avoir un impact significatif sur le calcul des émissions hors échappement.

Cette conclusion semble valide pour les zones tempérées (en particulier l'Île-de-France et une bonne partie de la France). Il est cependant vraisemblable que dans certaines zones du sud de la France (aridité) et de montagne (salage/sablage), les émissions par remise en suspension soient plus importantes.

Émissions par évaporation de carburant des véhicules en stationnement

Pour l'Île-de-France, le modèle Heaven calcule les émissions de COV dues à l'évaporation, en distinguant l'évaporation lorsque les véhicules sont en circulation (*running losses*), l'évaporation après arrêt du moteur (*hot soak*) et celle du véhicule en stationnement (*diurnal losses*). Concernant l'évaporation des véhicules en stationnement, celle-ci n'a été prise en compte que de manière globale à l'échelle de l'Île-de-France pour le calcul des concentrations, car les données permettant de spatialiser les stationnements et les émissions qui en résultent ne sont pas disponibles. Les émissions des véhicules au stationnement ne pouvant pas être spatialisées avec les outils Heaven, elles ont été prises en compte dans les bilans globaux d'émissions du trafic de l'Île-de-France, mais pas dans les calculs spatialisés (intra-A86, Paris, etc.), ni pour le calcul des concentrations de PM à l'échelle de l'Île-de-France (incidence locale sur la production d'aérosols secondaires).

Les émissions par évaporation de COV du trafic du scénario de référence représentent entre 20 % et 40 % des émissions totales du trafic selon qu'on inclut ou non l'évaporation de stationnement. Cependant, le trafic est assez faiblement impliqué dans la production de COV (13 % des émissions totales de l'Île-de-France), et par ailleurs ses émissions sont fortement réduites dans les scénarios technologiques par amélioration / renouvellement du parc (-30 % à -40 % sauf scénario Essence (S2) -12 % à l'échelle de l'Île-de-France). Cette approximation aurait donc un impact limité sur les estimations et comparaisons de scénarios compte tenu des faibles quantités de COV dues au trafic, mais cependant le potentiel de formation des aérosols secondaires varie selon les composés.

Pour aller plus loin, il serait possible d'envisager une spatialisation des lieux de stationnement liée à la densité de l'habitat en première approche, voire en intégrant les principaux parking et places dans les rues. La prise en compte de spéciations précises des COV (combustion, évaporation), pour les différents scénarios serait également nécessaire.

Pour la France, l'évaporation de carburant est évaluée globalement et distribuée spatialement comme le trafic.

7.1.3.2 Estimation des émissions des autres secteurs

La détermination des émissions de polluants des secteurs d'activité autres que le trafic repose sur :

- la connaissance des émissions spécifiques des sources et leur recensement ;
- la spatialisation des émissions nationales pour l'inventaire européen spatialisé EMEP :
 - o les émissions hors GSP (grandes sources ponctuelles) sont notamment spatialisées selon la densité de population et la couverture des sols (Corine Land Cover),
 - o les émissions de l'agriculture sont estimées par cantons et spatialisées selon la couverture des sols (Corine Land Cover), etc. ;
- la temporalisation des émissions, au travers des profils d'activité utilisés pour l'inventaire national spatialisé⁶².

L'incertitude sur l'émission annuelle totale est liée à la connaissance des sources, de leur activité et de leurs émissions spécifiques. L'incertitude locale et temporelle est beaucoup plus variable.

7.1.3.3 Modèles d'estimation des concentrations de polluants

Les simulations de la qualité de l'air sont associées à des incertitudes, qui ont différentes origines :

- les données d'entrée du modèle : les émissions peuvent être incomplètes et/ou inexactes, les conditions initiales et limites sont également entachées d'incertitudes ;
- la météorologie et les paramétrisations sous maille (exemple : diffusion verticale) ;
- les processus physiques et chimiques qui peuvent être paramétrés, peu connus et/ou manquants ;
- les approximations numériques.

Dans le cadre de ces travaux, les incertitudes liées à la météorologie, aux conditions initiales et limites, et aux approximations numériques sont de moindre importance, car il s'agit de comparer des scénarios. Les incertitudes liées aux émissions et à certains processus physico-chimiques mal connus sont au contraire prépondérantes. Les émissions de COSV non connues dans les inventaires d'émissions et estimées *a posteriori* sont très incertaines. Une étude de sensibilité à ces émissions est proposée en section 7.3.2.

7.1.4 **Pollution de proximité et exposition**

7.1.4.1 Pollution de proximité et pollution de fond

Les outils utilisés dans ce cadre ne rendent pas compte de la pollution en proximité immédiate du trafic routier. Cette pollution de proximité ne pourrait être estimée qu'avec d'autres outils, une résolution spatiale plus fine et la prise en compte des caractéristiques topographiques et de voirie (largeur et élévation de la route, hauteur du bâti...).

Les distances d'influence de la pollution du trafic varient de quelques dizaines à centaines de mètres des axes routiers. Les simulations réalisées avec des mailles de 1 km² sur l'Île-de-France et 50 km² sur la France ne permettent donc pas d'estimer les gradients de concentration en proximité immédiate du trafic.

Ce point constitue une limite importante des simulations, les concentrations de particules n'étant *de facto* pas précisément estimées sur les zones où elles sont les plus élevées même en dehors des pics de pollution (Afsset 2009), et où la composition physico-chimique et la toxicité de la pollution peuvent être sensiblement différentes de celles de la pollution de fond (Schlesinger et al. 2006). De plus, la densité de population exposée est importante en proximité des axes routiers et de nombreux établissements recevant des publics sensibles (jeunes enfants, personnes âgées ou hospitalisées) s'y trouvent.

⁶² <http://emissions-air.developpement-durable.gouv.fr/index.html>

L'analyse géographique précise des émissions de polluants du trafic (t/an/km²) et de la densité de population (nombre d'habitants par km²) apporte cependant une indication qualitative de la pollution de proximité selon les zones. Ainsi, les zones les plus denses (> 15 000 hab/km², avec environ 11 % du trafic et 9 à 16 % des émissions du trafic) subissent une intensité d'émission relative (par unité de surface) de l'ordre de 9 à 16 fois plus élevée que la moyenne de l'Île-de-France. Cette intensité d'émission est de 5 à 7 pour les zones de densité comprise entre 7 500 et 15 000 hab/km² et de 0,7 à 0,8 pour les zones de moins de 7 500 hab/km².

Bien que l'approche ne rende pas compte des gradients de concentration en proximité immédiate du trafic, l'analyse effectuée permet néanmoins d'estimer l'impact moyen de scénarios technologiques sur la pollution régionale ou nationale.

7.1.4.2 Exposition

L'estimation de l'exposition des populations sous différents scénarios reste délicate. Néanmoins les résultats exposés en section 5.4 permettent de caractériser davantage l'impact des scénarios sur l'exposition de la population et sont ainsi des indicateurs de bénéfices potentiels pour la population selon les différents scénarios.

Pour une évaluation précise de l'exposition à la pollution de l'air, il conviendrait de tenir compte de l'exposition « au cours de la journée et des activités » en utilisant par exemple les budgets espace-temps pour estimer l'exposition (durée et niveau de concentration) dans les logements, au travail, les ERP, les transports comme le fait actuellement Airparif (concentrations mesurées dans l'habitacle d'une voiture, en vélo, dans les gares souterraines). De même, la pollution à l'intérieur des locaux et le transfert de pollution de l'extérieur vers l'intérieur seraient à prendre en compte. Peu de travaux concernent ces aspects, et l'exposition est généralement estimée seulement sur le lieu du domicile en considérant que l'ensemble des habitants d'un immeuble réside au rez-de-chaussée.

D'autres approches de comparaison des scénarios et indicateurs des gains sanitaires ont été envisagés dans le cadre du groupe de travail, notamment l'intégration spatiale sur un territoire du produit des écarts de concentrations par les nombres de personnes concernées.

Une réflexion globale sur ces différents aspects de l'exposition et l'expression des bénéfices de différentes mesures est recommandée.

7.1.5 Positionnement et apports méthodologique des travaux du PREPA

Ces travaux (décrits en détail en Annexe 13) ont été menés en vue de la définition du Plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques (PREPA), visant à améliorer la qualité de l'air sur le territoire national. Ils concernent des mesures de réduction pour l'ensemble des secteurs d'activités, qui sont évaluées « individuellement » et sous forme de scénarios les agrégeant, aux horizons 2020 et 2030. Émissions, concentrations (et exposition) sont simulées à l'échelle nationale. L'analyse est complétée par l'évaluation des impacts sanitaires et par une évaluation multicritère des impacts environnementaux, coûts, faisabilité et acceptabilité.

Plusieurs aspects méthodologiques sont intéressants : la définition d'indicateurs de dépassements de seuils, d'exposition moyenne, d'impact géographique permettant un classement plus aisé de différentes mesures. Les concentrations simulées sont corrigées par les biais observés sur les sites des stations de mesure (écarts entre concentrations simulées et mesurées). Cependant les comparaisons des mesures et scénarios ne comptabilisent que les dépassements aux stations de mesure (et non sur l'ensemble du territoire). Les impacts sanitaires sont également quantifiés (méthodologie européenne d'évaluation des impacts sanitaires). L'approche multi-secteurs et l'évaluation en comparaison à un scénario tendanciel prédéfini (avec évolution démographique, énergétique, etc.), l'évaluation des impacts sanitaires (assez succincte) et finalement la hiérarchisation de différentes mesures pour différents secteurs constituent la principale valeur ajoutée de ces travaux.

7.2 Incertitudes

Les informations relatives aux incertitudes des calculs d'émission et concentrations de polluants atmosphériques sont assez rares et souvent indicatives ou qualitatives. Différentes informations relatives aux facteurs et calculs d'émissions du trafic sont récapitulées ici.

7.2.1 Éléments sur les incertitudes des facteurs d'émissions du trafic routier

Il n'y a pas d'incertitudes quantifiées disponibles pour les facteurs d'émission du trafic routier, mais plutôt des indications qualitatives donnant le niveau de confiance (relatif) entre les différents polluants. Ces appréciations qualitatives sont récapitulées en Tableau 51 pour les polluants les plus couramment mesurés à l'échappement.

Tableau 51 : Appréciation qualitative des facteurs d'émission à l'échappement de la méthodologie COPERT et du Guidebook pour les calculs d'émissions du trafic routier (EEA 2016)

Vehicle Category	Pollutant							
	NO _x	CO	NMVOG	CH ₄	PM	N ₂ O	NH ₃	CO ₂
Petrol passenger cars								
Without catalyst	A	A	A	A	-	C	C	A
With catalyst	A	A	A	A	-	A	A	A
Diesel passenger cars								
All technologies	A	A	A	A	A	B	B	A
LPG passenger cars								
Without catalyst	A	A	A	-	D	C	C	A
With catalyst	D	D	D	D	D	D	D	A
2-stroke passenger cars	B	B	B	D	-	D	D	B
Light commercial vehicles								
Petrol	B	B	B	C	-	B	B	A
Diesel	B	B	B	C	A	B	B	A
Heavy-duty vehicles								
Petrol	D	D	D	D	-	D	D	D
Diesel	A	A	A	B	A	B	B	A
Two-wheel vehicles								
< 50 cm ³	A	A	A	B	-	B	B	A
> 50 cm ³ 2-stroke	A	A	A	B	-	B	B	A
> 50 cm ³ 4-stroke	A	A	A	B	-	B	B	A
Cold-start emissions								
Pass. Cars conventional	B	B	B	-	-	-	-	B
Pass. Cars Euro 1 and later	B	B	B	A	-	-	-	A
Pass. Cars diesel Conv.	C	C	C	-	C	-	-	B
Pass. Cars diesel Euro I	A	A	A	A	A	-	-	A
Pass. Cars LPG	C	C	C	-	-	-	-	B
Gas. Light commercial vehicles	D	D	D	-	-	-	-	D
Diesel light commercial vehicles	D	D	D	-	D	-	-	D

A : Facteurs d'émission statistiquement significatifs basé sur un nombre suffisamment large de données mesurées et évaluées ;
B : Facteurs d'émission non statistiquement significatifs basé sur un faible nombre de données mesurées réévaluées ;
C : Facteurs d'émission estimés sur la base de la littérature disponible ;
D : Facteurs d'émission estimés en appliquant des considérations et/ou des extrapolations similaires.

Le Tableau 52 qualifie de la même manière les facteurs d'émissions de particules hors échappement, mais ajoute des plages de variations (ou incertitudes) autour des valeurs moyennes, qui sont fréquemment de l'ordre d'un facteur 2.

Finalement, le Tableau 53 donne les incertitudes des ratios permettant d'estimer BC et OM à partir des émissions de particules (PM₁₀), et pour des catégories détaillées de véhicules. Compte tenu des incertitudes sur les mesures de particules, il est vraisemblable que ces indications sont sous-estimées.

Tableau 52 : Appréciation qualitative des facteurs d'émission de particules de la méthodologie COPERT et du Guidebook pour les calculs d'émissions du trafic routier (EEA 2016)

Usure des pneus (TSP)

Vehicle class (j)	TSP emission factor (g/km)	Uncertainty range (g/km)	Quality code
Two-wheel vehicles	0.0046	0.0042–0.0053	B
Passenger cars	0.0107	0.0067–0.0162	B
Light-duty trucks	0.0169	0.0088–0.0217	B
Heavy-duty vehicles	Equation 3	0.0227–0.0898	B–C

Usure des freins (TSP)

Vehicle category (j)	TSP emission factor (g/km)	Range (g/km)	Quality code
Two-wheel vehicles	0.0037	0.0022 – 0.0050	D
Passenger cars	0.0075	0.0044 – 0.0100	B
Light-duty trucks	0.0117	0.0088 – 0.0145	B
Heavy-duty vehicles	Equation 6	0.0235 – 0.0420	B–C

Abrasion de la route / chaussée (TSP)

Vehicle category (j)	Emission factor (g/km)	Quality code
Two-wheel vehicles	0.0060	C–D
Passenger cars	0.0150	C–D
Light-duty trucks	0.0150	C–D
Heavy-duty vehicles	0.0760	C–D

Ratios BC et OC

Category	f-BC	f-OC	+/- uncertainty (%)
Road abrasion	0.0106	0.135	50

- A** : Facteurs d'émission statistiquement significatifs basé sur un nombre suffisamment large de données mesurées et évaluées ;
B : Facteurs d'émission non statistiquement significatifs basé sur un faible nombre de données mesurées réévaluées ;
C : Facteurs d'émission estimés sur la base de la littérature disponible ;
D : Facteurs d'émission estimés en appliquant des considérations et/ou des extrapolations similaires.

Tableau 53 : Incertitudes sur les ratios BC/PM₁₀ et OC/BC de la méthodologie COPERT et du Guidebook pour les calculs d'émissions du trafic routier (EEA 2016)

Category	Euro standard	BC/PM _{2.5} (%)	OM/BC (%)	Uncertainty (%)
Petrol PC and LCV	PRE-ECE	2	4900	50
	ECE 15 00/01	5	1900	50
	ECE 15 02/03	5	1900	50
	ECE 15 04	20	400	50
	Open loop	30	233	30
	Euro 1	25	250	30
	Euro 2	25	250	30
	Euro 3	15	300	30
	Euro 4	15	300	30
Diesel PC and LCV	Conventional	55	70	10
	Euro 1	70	40	10
	Euro 2	80	23	10
	Euro 3	85	15	5
	Euro 4	87	13	5
	Euro 3, Euro 4, Euro 5 Equipped with DPF and fuel additive	10	500	50
Diesel HDV	Euro 3, Euro 4, Euro 5 equipped with a catalyzed DPF	20	200	50
	Conventional	50	80	20
	Euro I	65	40	20
	Euro II	65	40	20
	Euro III	70	30	20
	Euro IV	75	25	20
	Euro IV	75	25	20
Euro VI	15	300	30	
Two-wheel vehicles	Conventional	10	900	50
	Euro 1	20	400	50
	Euro 2	20	400	50
	Conventional	15	560	50
	Euro 1	25	300	50
	Euro 2	25	300	50
Euro 3	25	250	50	

La Figure 86 illustre les variations observées pour les facteurs d'émissions de NOx des voitures particulières Diesel (moins de 2 litres de cylindrées), selon leur catégorie réglementaire et avec les versions successives des outils COPERT et leurs révisions, sur la période 2006-2017.

Les catégories les plus anciennes (pré-Euro à Euro 2) varient peu, sans doute parce qu'elles n'ont pas été l'objet de nouvelles mesures sur banc et que leur enjeu diminue considérablement avec le renouvellement du parc. Pour les réglementations Euro 3 à Euro 5, des corrections assez importantes sont observées avec les premières révisions méthodologiques. Les fortes variations pour les réglementations Euro 6, 6c, 6d rendent compte de réductions d'émission nettement moins optimistes par les technologies de dépollution.

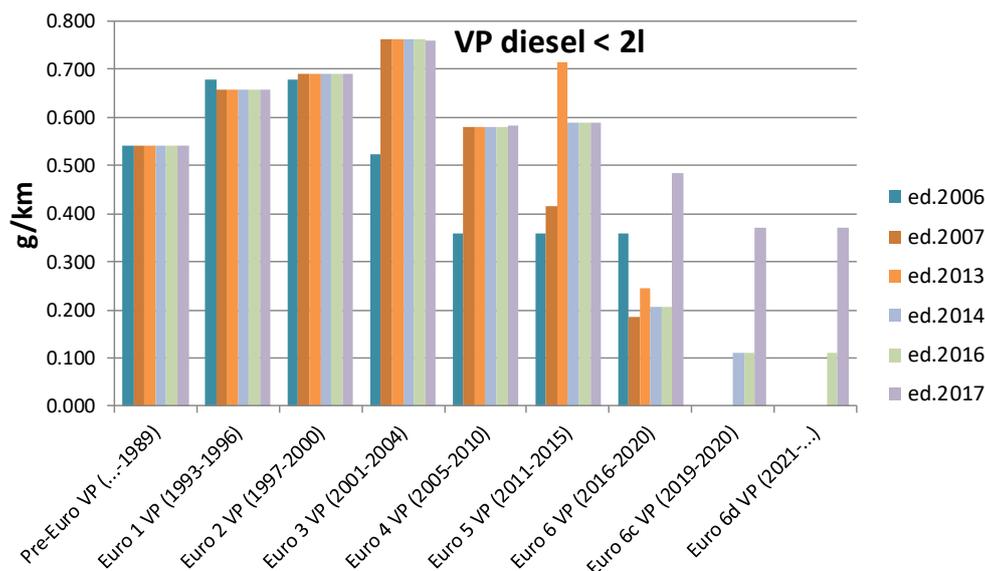


Figure 86 : Facteurs d'émission de NOx par norme des VP Diesel < 2l pour différentes versions de Copert (ed.2006 = Copert III, ed.2007 à 2016 = Copert 4, ed.2017 = Copert 5)

Ces éléments montrent que l'estimation des émissions de polluants du trafic reste entachée de fortes incertitudes. Ce n'est d'ailleurs pas que le cas des émissions du trafic. Le bouclage des inventaires par les consommations de carburant et la validation des simulations des concentrations par les mesures *in situ* restent les deux principaux moyens d'ajuster globalement les simulations et de diminuer les biais liés à ces incertitudes.

7.2.2 Éléments sur les incertitudes constatées dans les exercices d'inventaire national des émissions du transport et des autres secteurs

Comme pour les facteurs d'émissions, peu d'éléments sur les incertitudes des exercices d'inventaires nationaux ou régionaux sont disponibles. Les émissions anthropiques totales de la plupart des secteurs d'activité sont estimées annuellement et ajustées selon les consommations annuelles de carburants. Cet ajustement par les consommations du secteur permet de limiter les biais, mais il n'est pas possible pour des estimations régionales.

Le Tableau 54 récapitule les incertitudes de l'inventaire national pour l'année 2015, par polluant tous secteurs émetteurs confondus. Le rapport d'inventaire annuel (rapport CEE-NU)⁶³ documente également les incertitudes par polluant et par secteur émetteur.

⁶³ <http://www.citepa.org/fr/activites/inventaires-des-emissions/cee-nu>

Suivant les polluants, les incertitudes sont comprises entre 12 % pour le SOx et près de 300 % pour le cuivre. Les émissions de SOx sont estimées directement et proportionnellement aux consommations d'énergie à partir du contenu en soufre des énergies. Les émissions de cuivre (dont la source principale est le transport routier, notamment l'usure des plaquettes de freins) sont plus incertaines car elles dépendent de l'incertitude sur les émissions totales de particules d'une part, et de celle sur le contenu en cuivre d'autre part.

Tableau 54 : Estimation des incertitudes des inventaires des émissions anthropiques totales de polluants atmosphériques utilisant la méthode TIER1 de la méthodologie européenne

Polluant	Emission en		Unité	CITEPA-incertitudes-polluant.xlsx		Format
	source CITEPA / Format CEE-NU - Février 2017			Incertitudes	Incertitudes	
	1990	2015		année (%)	sur l'évolution	
SOx	3 185	153	Gg	12	0.3	
NOx	2 026	835	Gg	19	3.1	
NH3	685	679	Gg	18	7.9	
COVNM	2 186	529	Gg	34	5.6	
Zn	2 218	476	Mg	97	17	
Cr	393	20	Mg	46	2.2	
CO	13 099	2 994	Gg	45	6.3	(a)
Pb	4 296	111	Mg	163	3.3	
Hg	25	3	Mg	34	1.9	
PCDD-F	1 782	114	g I-Teq	36	2.8	
Cd	21	3	Mg	39	3.6	
HCB	1 196	6	Kg	60	0.5	
Ni	293	40	Mg	49	2.2	
PCB	183	46	Kg	41	15	
HAP	45	19	Mg	64	7.1	
Cu	222	212	Mg	289	62	
As	17	5	Mg	80	7.8	
Se	15	11	Mg	84	10	
TSP	1 247	841	Gg	151	34	
PM10	564	266	Mg	52	12	
PM2,5	420	165	Gg	49	4.1	

(a) : le périmètre géographique de la CEE-NU correspond au périmètre géographique Secten, i.e. la métropole
Calédonie
chapter 5 "Uncertainties")

7.2.3 Autres indications relatives aux incertitudes des calculs d'émissions

Il serait souhaitable d'explorer ultérieurement d'autres sources d'information sur les incertitudes des calculs d'émissions. Il s'agit notamment d'informations du rapport PREPA, des méthodologies d'inventaires territoriaux, de travaux sur la sensibilité des calculs (source JRC Ispra), du projet TRANSPHORM et d'autres sources à identifier. Cependant, l'apport de ces travaux est vraisemblablement limité.

7.2.4 Incertitudes liées aux données d'entrée des simulations

La précision des estimations des émissions et concentrations de polluants (trafic et autres secteurs) dépend également de la qualité des données d'entrée des simulations. Dans le présent rapport, les données d'entrée qui ne varient pas avec les scénarios (« données contextuelles ») sont distinguées de celles qui « déterminent » les scénarios (principalement les compositions du parc).

7.2.4.1 Les données contextuelles

Ce sont toutes les données et hypothèses qui sont stables entre les scénarios (météorologie, activité et émissions des autres secteurs, populations et leur répartition géographique, comportements de déplacements et de conduite, volumes de trafic totaux et par catégories de véhicules et leur répartition géographique et temporelle, vitesses de circulation, etc.).

Les incertitudes sur ces données peuvent être importantes (par exemple : les émissions des autres secteurs, la répartition spatio-temporelle des sources d'émissions et trafics, etc.) mais elles sont difficilement quantifiables. Cependant, le fait que ces données ne varient pas avec les scénarios limite l'influence de leur imprécision sur les comparaisons / résultats.

Cependant, le poids relatif des émissions des autres secteurs d'activité (et des émissions naturelles) d'une part, et des émissions du trafic d'autre part, peut influencer les écarts des scénarios en concentrations, notamment pour les polluants secondaires. Le niveau absolu de ces émissions doit donc être estimé précisément.

De même, diverses données des simulations peuvent avoir une influence sur le niveau de l'émission du trafic (par exemple, les vitesses de circulation sur le réseau routier en Île-de-France ou les vitesses moyennes en urbain / rural / autoroute en France, les hypothèses de démarrage à froid, d'évaporation, de chargement des camions, etc.). Il est malheureusement difficile d'estimer la qualité de ces hypothèses.

Enfin, la répartition spatiale et temporelle des émissions du trafic est liée :

- à la simulation du trafic (volumes et vitesses selon l'heure de la journée) sur le réseau routier de l'Île-de-France, simulation empreinte d'approximations (simplification du réseau, affectation du trafic, etc.). Les volumes de trafic sont contraints par les comptages à l'échelle régionale (axes principaux), mais les vitesses sont plus approximatives. *In fine*, la répartition spatiale de l'ensemble des émissions (toutes sources) et la cartographie des concentrations qui en résultent sont liées à l'agrégation par maille (1 km x 1 km ou 2 km x 2 km en Île-de-France) ;
- aux variations locales de la composition du parc automobile (plus ou moins de Diesel, véhicules récents peu polluants ou plus anciens, etc.). Différents travaux ont démontré une variabilité territoriale de la composition du parc, même à l'échelle départementale de l'Île-de-France, mais cependant les statistiques actuelles ne permettaient pas d'en tenir compte.

Ces différentes approximations territoriales peuvent bien sûr affecter les estimations de l'exposition des populations.

En conclusion, plusieurs ensembles de données contextuelles peuvent influencer les résultats de simulation, en particulier ceux qui déterminent les niveaux relatifs d'émissions du trafic et des autres secteurs, et ceux qui conditionnent la répartition spatio-temporelle des émissions et concentrations. Dans une approche de comparaison de scénarios, cette influence est sans doute limitée, mais les incertitudes associées ne peuvent cependant pas être quantifiées. Il conviendrait d'effectuer des analyses de sensibilité afin de mesurer leur importance dans les simulations.

7.2.4.2 Les données variables avec les scénarios

Ce sont principalement les compositions des parcs automobiles (structures selon les motorisations, technologies de dépollution et réglementations européennes en émissions de polluants).

L'inégalité de précision des facteurs d'émissions des véhicules selon leur réglementation (incertitude plus élevée sur les véhicules récents en raison de niveaux d'émissions plus faibles) associée à l'évolution forte des compositions de parc vers des véhicules plus récents est aussi considérée.

Remarque : pour l'un des scénarios, les volumes de trafic (voitures, camions) et la répartition entre transports individuels (voitures, véhicules utilitaires légers, deux-roues) et transports publics (autobus et autocars) sont modifiés, mais ce scénario a un caractère très exploratoire (pas de réelle simulation des mobilités et trafics) et cela n'aurait pas beaucoup de sens de discuter des incertitudes liées à ces hypothèses.

Les compositions des parcs automobiles

Compte tenu de la complexité d'une composition de parc (plusieurs centaines de catégories de véhicules), il est très difficile de leur affecter une incertitude ou d'effectuer des analyses de sensibilité.

Des variations importantes des compositions de parc ont été observées entre les départements de l'Île-de-France, par des observations vidéo et par l'analyse de l'enquête globale transport (Carteret, Andre, and Pasquier 2015). Une plus forte diésélisation et la présence de véhicules plus anciens dans les départements les moins favorisés sont observées. Lors d'un calcul des émissions du trafic à l'heure de pointe sur l'Île-de-France, la prise en compte du parc observé et de sa variabilité territoriale induit des différences qui peuvent varier de 10 à 70 % selon les polluants. Des écarts plus importants sont observés par familles de véhicules, ainsi que des écarts selon les zones géographiques avec des sous-estimations marquées hors Paris et Boulevard Périphérique (70 % de CO et COV). Les estimations de NOx et PM restent cependant plus stables (sous-estimation de 6 % des NOx).

D'autres travaux ont également montré la sensibilité des calculs d'émissions à la composition du parc sans toutefois documenter quelle en est l'incertitude. Dans la suite, il serait intéressant de développer des indicateurs de variabilité des compositions de parc (diésélisation, âge moyen, etc.), leur affecter un niveau de confiance, et en analyser l'influence sur les calculs d'émissions.

Incidence de l'inégalité de précision des facteurs d'émission selon les catégories de véhicules

L'incertitude sur les facteurs d'émission varie théoriquement selon les catégories de véhicules et leur réglementation : elle est plus élevée sur les véhicules récents compte tenu de niveaux beaucoup plus faibles d'émission et de leur plus forte variabilité entre les véhicules et selon les conditions de fonctionnement. Elle peut également varier entre véhicules essence et véhicules Diesel, équipés ou non de filtres à particules. L'incertitude sur les estimations d'émission varie donc au prorata du poids des catégories de véhicules. Or les scénarios d'évolution technologique induisent principalement des variations du poids des catégories et voient en particulier le nombre de véhicules récents augmenter. Le niveau d'incertitude devrait donc être plus élevé que dans le scénario de référence.

Ce point n'a probablement jamais été étudié. Par contre il faut observer que les écarts d'émissions entre les différentes catégories réglementaires Euro sont très importants. L'incidence d'une variation de l'incertitude est donc probablement négligeable par rapport aux écarts d'émissions observés.

Il convient de souligner que l'incertitude varie fortement selon les polluants. Elle est assez élevée pour les particules et encore plus pour les composés particulaires et spéciations, mais ceci est indépendant des catégories de véhicules. Comme précédemment, il est donc vraisemblable que les résultats contrastés des scénarios par rapport à la situation de référence soient peu sensibles à la variation de l'incertitude entre les catégories de véhicules, même pour les polluants les moins bien caractérisés. Il en est de même pour les comparaisons entre les scénarios, car tous évoluent vers des véhicules récents, gommant les écarts d'incertitudes forts entre véhicules anciens et récents.

Concernant l'émission de NO₂, elle est déterminée par un taux NO₂/NOx variant fortement selon les normes. Cependant, il y a déjà de grosses incertitudes sur l'émission de NOx et il serait difficile d'apprécier l'incertitude induite par ce taux.

7.2.5 Autres paramètres d'incertitude

Plusieurs paramètres des calculs d'émissions affectent les estimations : ce sont notamment le taux de chargement des véhicules lourds, les hypothèses de démarrage à froid, les vitesses de circulation, ainsi que la distribution spatiale du trafic, la prise en compte de la pente de la route, etc. Il serait souhaitable d'identifier et analyser des études de sensibilité à ces paramètres. De même, les travaux d'intercomparaison d'outils ou plates-formes de calcul d'émissions (COPERT, Heaven, HBEFA, etc.) ou de modèles de qualité de l'air (travaux INERIS) doivent permettre de mieux apprécier les incertitudes sur les simulations.

7.3 Analyses spécifiques et de sensibilité

Deux analyses spécifiques et complémentaires aux simulations sont proposées ici :

- les facteurs d'émissions de NO_x et NO₂ des véhicules ont été récemment réévalués. Les évolutions sont analysées et l'incidence potentielle sur les résultats des simulations est discutée ;
- la production d'aérosols organiques secondaires est fortement liée à l'émission de COSV, ceux-ci n'étant pas estimés dans les inventaires et peu documentés dans la littérature. Une analyse de sensibilité des simulations des différents scénarios est proposée ici en considérant une approche alternative de détermination des COSV.

7.3.1 Sensibilité aux facteurs d'émission - cas des NO_x et NO₂

7.3.1.1 Facteurs d'émission de NO_x

Depuis la réalisation des calculs, de nouvelles versions du guide méthodologique EMEP/EEA (EEA, 2016) et du logiciel COPERT sont sorties. Les mises à jour concernent les facteurs d'émission de NO_x des voitures et véhicules utilitaires légers Diesel et font suite aux révélations du « Dieselgate » (Figure 87).

Ntziachristos et al. (2016) explicitent les modifications apportées dans le logiciel et dans le guide méthodologique. Cela concerne uniquement les facteurs d'émission Euro 6 et ultérieurs des VP, et Euro 5 et ultérieurs des VUL qui sont réévalués à la hausse.

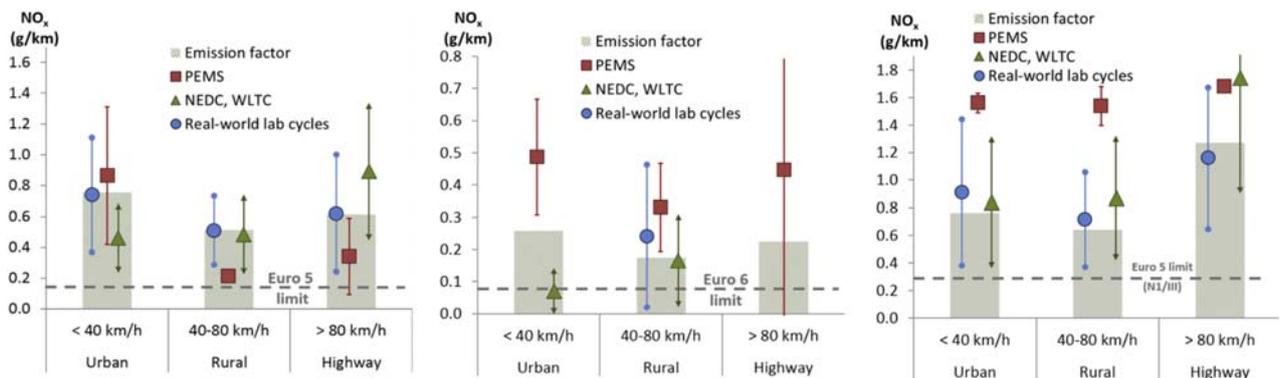


Figure 87 : Évolution entre les facteurs d'émission de NO_x utilisés dans COPERT et les valeurs mesurées dans différentes conditions dont des mesures embarquées. De gauche à droite, les graphiques correspondent à VP Euro 5, VP Euro 6 et VUL Euro 5 respectivement

La Figure 88 montre que les facteurs d'émission utilisés pour les simulations (ligne rouge) sous-estiment les émissions, mais qu'à terme (ligne verte), ils les surestimeraient.

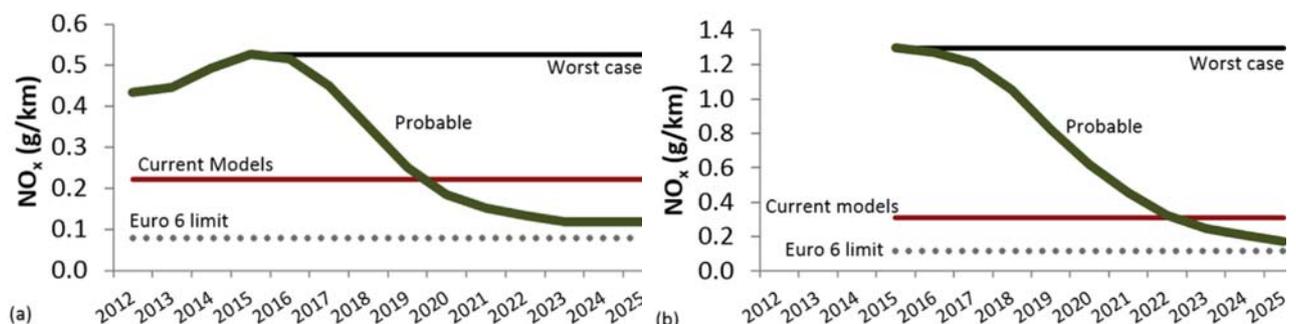


Figure 88 : Évolution possible des facteurs d'émission de NO_x des VP (a) et VUL (b) dans les années à venir et comparaison vis-à-vis des facteurs d'émission de COPERT 4 v11.3

L'utilisation de ces nouveaux facteurs d'émission de NOx pour les VP les VUL Diesel amènerait les évolutions représentées dans le Tableau 55.

Tableau 55 : Évolution des facteurs d'émission de NOx entre les éditions 2013 et 2016 du guide méthodologique

VP Diesel		VUL Diesel	
Euro 5	0 %	Euro 5	56 %
Euro 6	128 %	Euro 6	282 %
Euro 6c	210 %	Euro 6c	255 %
Euro 6d	58 %	Euro 6d	85 %

7.3.1.2 Facteurs d'émission de NO₂

Dans une étude récente, O'Driscoll et al. (2016) montrent que la teneur en NO₂ des véhicules Diesel Euro 6 (soit 30 %) serait sous-estimée dans COPERT en moyenne d'un ratio 1,5 (soit une teneur en NO₂ de 44 %).

Ces deux mises à jour modifieraient les émissions de la référence et des deux scénarios comme indiqué en Tableau 56.

Tableau 56 : Évolution des émissions sur la France (pour la référence, le scénario FAP (S1) et le scénario Essence (S2)), par rapport aux émissions présentées dans ce rapport, en appliquant les mises à jour des facteurs d'émission de NOx et de NO₂

	Référence		Scénario FAP (S1)		Scénario Essence (S2)	
	NOx	NO ₂	NOx	NO ₂	NOx	NO ₂
VP	+0 %	-	+53 %	+91 %	+29 %	+54 %
VUL	+9 %	-	+97 %	NA	+86 %	NA
Total tous véhicules	+2 %	-	+48 %	+54 %	+33 %	+28 %

Les émissions de NOx dans le scénario de référence pour la France ne seraient au total quasiment pas modifiées (+2 %). Par contre, les émissions des différents scénarios seraient actuellement sous-estimées de 48 % et 33 % pour les NOx et de 54 % et 28 % pour le NO₂.

Pour l'Île-de-France, compte tenu des poids respectifs des véhicules légers par rapport aux émissions du trafic routier, les réductions d'émissions du trafic en NOx entre le scénario de référence et les scénarios FAP (S1) et Essence (S2) en Île-de-France seraient ramenées de -53 % et -62 % à -34 % et -51 % respectivement. Dans le bilan d'émissions tous secteurs, les réductions d'émissions de NOx seraient également atténuées, passant de -35 % et -39 % pour les scénarios FAP (S1) et Essence (S2), à environ -20 % et -30 % respectivement.

La réduction plus limitée des émissions d'oxydes d'azote doit se traduire par des concentrations plus fortes en oxydes d'azote, et donc une réduction plus faible des oxydants en campagne, surtout pour le scénario FAP (S1). Cela va entraîner une baisse plus faible des concentrations des composés secondaires (ozone, composés inorganiques et organiques des particules). Ainsi, les concentrations d'organiques biogéniques secondaires en campagne diminueront moins, surtout pour le scénario FAP (S1). En ville, dans les grands centres urbains, l'augmentation des concentrations en oxydants sera moins importante que présentée dans les résultats des simulations. Les concentrations en inorganiques seront moins réduites car elles dépendent fortement des émissions du précurseur NO₂ qui seront plus importantes.

7.3.2 Sensibilité des simulations au schéma de COSV

Les émissions de COSV ne sont pas fournies dans les inventaires d'émission, mais elles participent de manière significative à la formation de particules organiques. Par conséquent, ces émissions sont souvent estimées à partir des émissions de OM, comme fait précédemment, en utilisant l'approximation $\text{COSV/OM} = 2,5$ (Kim et al. 2016, Zhu et al. 2016a). Cependant, comme la mesure des émissions de OM dépend de la température, l'utilisation d'un rapport COSV/NMHC est préconisé dans des publications récentes (Zhao et al. 2015, 2016), où NMHC représente les hydrocarbures non méthaniques. La sensibilité des résultats à une modélisation différente des émissions de COSV est étudiée ici, c'est-à-dire en utilisant une modélisation basée sur le rapport COSV/NMHC plutôt que COSV/OM .

7.3.2.1 Méthodologie alternative pour l'estimation des émissions de COSV à partir du rapport COSV/NMHC

Les COSV peuvent être répartis en différentes classes de volatilité : intermédiaire (COSVI, souvent appelé IVOC dans la littérature anglo-saxonne), moyenne (COSVM ou SVOC dans la littérature anglo-saxonne) et basse (COSVB ou LVOC dans la littérature anglo-saxonne).

Les émissions de COSVI sont estimées à partir des rapports COSVI/NMHC préconisés par Zhao et al. (2015). Ces derniers préconisent d'utiliser un rapport $\text{COSVI/NMHC} = 0,6 \pm 0,1$ pour les véhicules Diesel sans filtre à particules et $\text{COSVI/NMHC} = 1,5 \pm 0,8$ pour les véhicules Diesel avec filtre à particules (FAP). Zhao et al. (2016) préconisent d'utiliser $\text{COSVI/NMHC} = 0,04 \pm 0,02$ pour les véhicules essence à froid et $\text{COSVI/NMHC} = 0,17 \pm 0,12$ pour les véhicules essence à chaud. Bien que NMHC soit défini comme le total des hydrocarbures non méthaniques, Zhao et al. (2015, 2016) ont montré que NMHC n'inclut pas tous les COSV et qu'il est difficile d'estimer la partie de COSV incluse dans le NMHC mesuré. Zhao et al. (2015) suggèrent qu'environ 2/3 des COSVI ne sont pas pris en compte dans les mesures de NMHC pour les véhicules Diesel sans filtre à particules. Dans ce travail, étant donné les incertitudes importantes dans la détermination du rapport COSVI/NMHC et la partie des COSVI incluse dans la valeur de NMHC mesurée, le rapport COSVI/COV est supposé égal au rapport COSVI/NMHC et les émissions de COV sont donc utilisées pour calculer celles de COSVI. Cette approximation est correcte pour les véhicules essence pour lesquels les émissions de COSVI sont faibles par rapport aux émissions de COV, ainsi que pour les véhicules Diesel sans filtre à particules. En effet, s'il est supposé que 2/3 des COSVI sont inclus dans les NMHC, alors pour les véhicules Diesel sans filtre à particules, le rapport COSVI/COV est égal à 0,68, c'est-à-dire très proche du rapport COSVI/NMHC de $0,6 \pm 0,1$; et pour les véhicules essence, le rapport COSVI/COV est exactement égal au rapport COSVI/NMHC à la deuxième décimale près ($\text{COSVI/COV} = 0,04$ à froid et $\text{COSVI/COV} = 0,17$ à chaud). Cependant, cette méthodologie pourrait sous-estimer les COSV des véhicules Diesel avec FAP pour lesquels $\text{COSVI/NMHC} = 1,5 \pm 0,8$ et $\text{COSVI/COV} = 6$ si 2/3 des COSVI ne sont pas pris en compte dans les mesures de NMHC. Cependant, les émissions de COSVI des véhicules Diesel avec FAP étant moins volatiles que celles des véhicules Diesel sans filtre à particules (Tableau 57, Tableau 59), il est probable que la fraction de COSVI dans NMHC préconisée pour les Diesel avec FAP ne soit pas correcte pour les Diesel sans filtre à particules.

Les émissions de COSVM et COSVB sont estimées à partir des émissions de COSVI en utilisant les répartitions des émissions des COSV en classes de volatilité déterminées par Zhao et al. (2015, 2016). Neuf classes de volatilité sont définies dans Zhao et al. (2015, 2016). Les émissions de la classe la plus volatile ne sont pas considérées, elles sont supposées être trop volatiles pour former des AOS de manière efficace. Les huit classes de volatilité restantes sont agrégées en trois classes de volatilité (basse, moyenne et haute), correspondant aux espèces utilisées dans Polyphemus (Tableau 57, Tableau 58, Tableau 59). Les calculs pour les véhicules Diesel avec FAP sont effectués en utilisant les données de Zhao et al. (2015) qui sont résumées dans le Tableau 59. Cependant, la fraction massique pour la classe de volatilité $\log(C^*) < -1$, qui n'a pas été mesurée par Zhao et al. (2015), a été estimée telle que la somme des fractions massiques soit égale à 1, comme pour les véhicules Diesel sans filtre à particules.

Tableau 57 : Répartition des émissions des véhicules Diesel sans filtre en classes de volatilité

Log(C*)	Fraction massique dans COIV+COSV+COFV	Espèces modèles	C*	Fraction massique dans COIV+COSV+COFV
<-1	0,034	POAIP (basse volatilité)	-0,04	0,041
-1	0,007			
0	0,008	POAmP (volatilité moyenne)	1,93	0,058
1	0,025			
2	0,025			
3	0,079	POAhP (haute volatilité)	3,5	0,612
4	0,203			
5	0,330			
6	0,289			

Tableau 58 : Répartition des émissions des véhicules essence en classes de volatilité

Log(C*)	Fraction massique dans COIV+COSV+COFV	Espèces modèles	C*	Fraction massique dans COIV+COSV+COFV
<-1	0,026	POAIP (basse volatilité)	-0,04	0,031
-1	0,005			
0	0,018	POAmP (volatilité moyenne)	1,93	0,184
1	0,098			
2	0,068			
3	0,057	POAhP (haute volatilité)	3,5	0,247
4	0,059			
5	0,131			
6	0,5			

Tableau 59 : Répartition des émissions des véhicules Diesel avec filtre en classes de volatilité

Log(C*)	Fraction massique dans COIV+COSV+COFV	Espèces modèles	C*	Fraction massique dans COIV+COSV+COFV
<-1	0,024	POAIP (basse volatilité)	-0,04	0,026
-1	0,002			
0	0,114	POAmP (volatilité moyenne)	1,93	0,23
1	0,058			
2	0,058			
3	0,068	POAhP (haute volatilité)	3,5	0,529
4	0,180			
5	0,281			
6	0,214			

En résumé, pour les COSV, les émissions des espèces modèles POAIP, POAmP et POAhP de Polyphemus sont estimées à partir des émissions de COV, en utilisant les formules récapitulées en Tableau 60.

Tableau 60 : Formules utilisées pour la détermination des espèces selon les classes de volatilité

	essence à chaud		essence à froid		Diesel sans FAP		Diesel avec FAP	
POAhP =	0,0562	x COV	0,0132	x COV	0,407	x COV	1,068	x COV
POAmP =	0,745	x POAhP	0,745	x POAhP	0,09477	x POAhP	0,0491	x POAhP
POAIP =	0,1255	x POAhP	0,1255	x POAhP	0,067	x POAhP	0,435	x POAhP

7.3.2.2 Les émissions de COSV

Les formules détaillées ci-dessus sont utilisées pour estimer les émissions de COSV selon la motorisation des véhicules sur l'Île-de-France (approche de sensibilité). Le Tableau 36 (section 5.3.3) rappelle les émissions de COSV estimées avec l'approximation $COSV/OM = 2,5$ (approche initiale).

Simulation de référence

En moyenne sur l'Île-de-France, les émissions de COSV estimées à partir des rapports COSV/OM et COSV/COV sont similaires. Cependant, de fortes variations spatiales existent. La Figure 89 montre les émissions de COSV estimées à partir du rapport COSV/OM et les différences relatives entre celles déterminées à partir du rapport COSV/COV et celles estimées à partir de COSV/OM. Les émissions de COSV dérivées du rapport COSV/COV sont beaucoup plus importantes en zones urbaines (jusqu'à +267 %), mais plus faibles le long des axes autoroutiers (jusqu'à -68 %). Ces différences sont dues aux différences spatiales des émissions d'OM et de COV, comme le montre la Figure 90. En effet, les émissions de COV sont plus importantes en zone urbaine que sur les autoroutes.

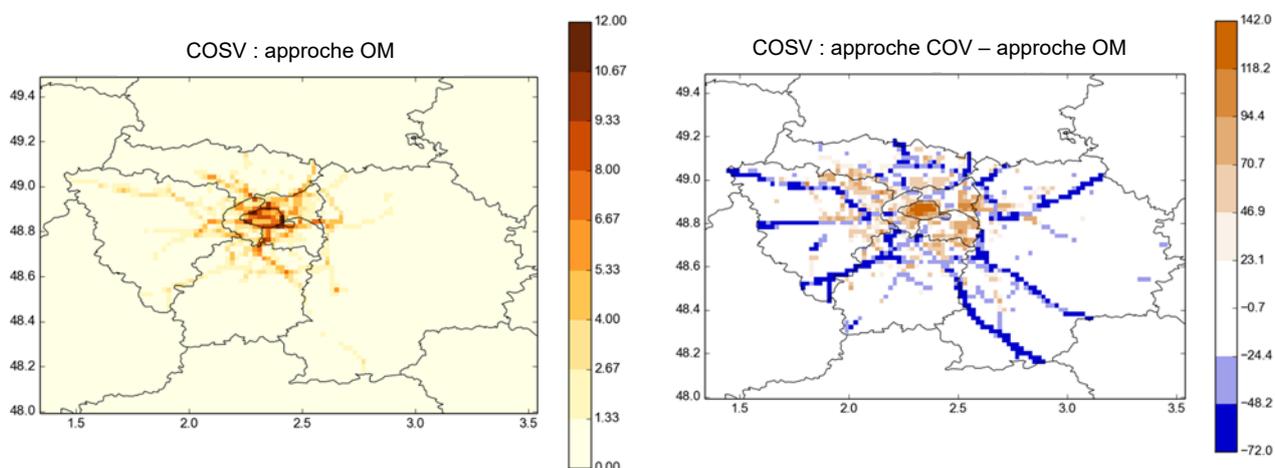


Figure 89 : Émissions de COSV en tonnes/an par le trafic, estimées à partir des émissions de composés organiques particulaires OM (simulation de référence, à gauche), et différence relative (%) entre les émissions de COSV de l'étude de sensibilité (approche COV) et la référence (approche OM)

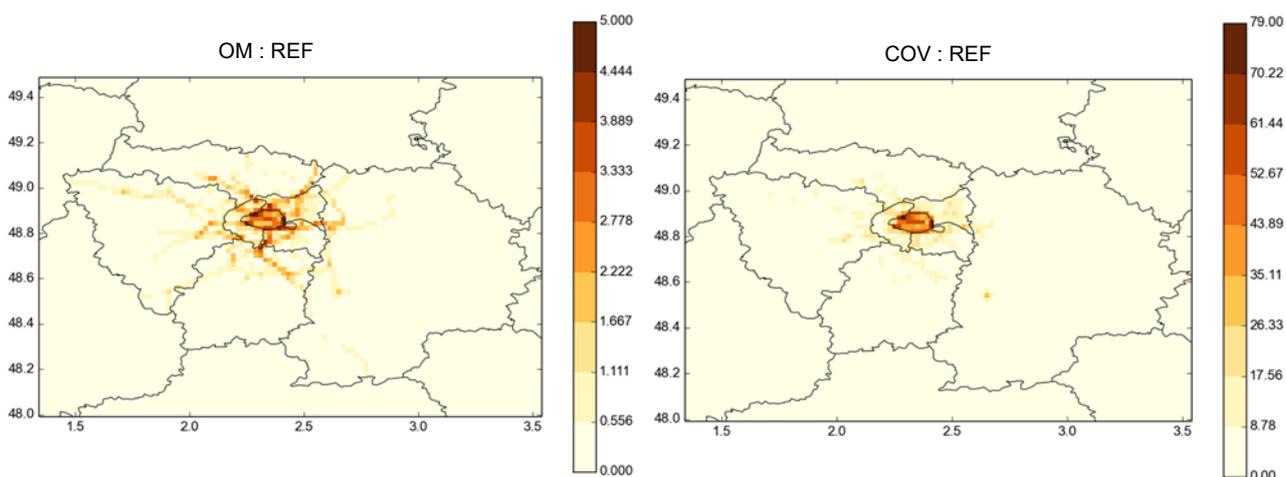


Figure 90 : Émissions de OM (à gauche) et des COV (à droite) en tonnes/an par le trafic

Les scénarios

Dans les scénarios, les émissions de COSV varient de manière similaire par rapport à la référence, pour les deux modes de calcul des émissions de COSV (approches COSV/OM ou COSV/COV). La Figure 91 montre les différences des émissions trafic entre le scénario FAP (S1) et la référence quand elles sont calculées à partir du rapport COSV/OM (à gauche) et quand le rapport COSV/COV est utilisé (à droite). Les réductions sont plus importantes dans Paris avec l'approche COSV/COV, car les émissions de COV dues au trafic y sont plus réduites que les émissions de OM dues au trafic.

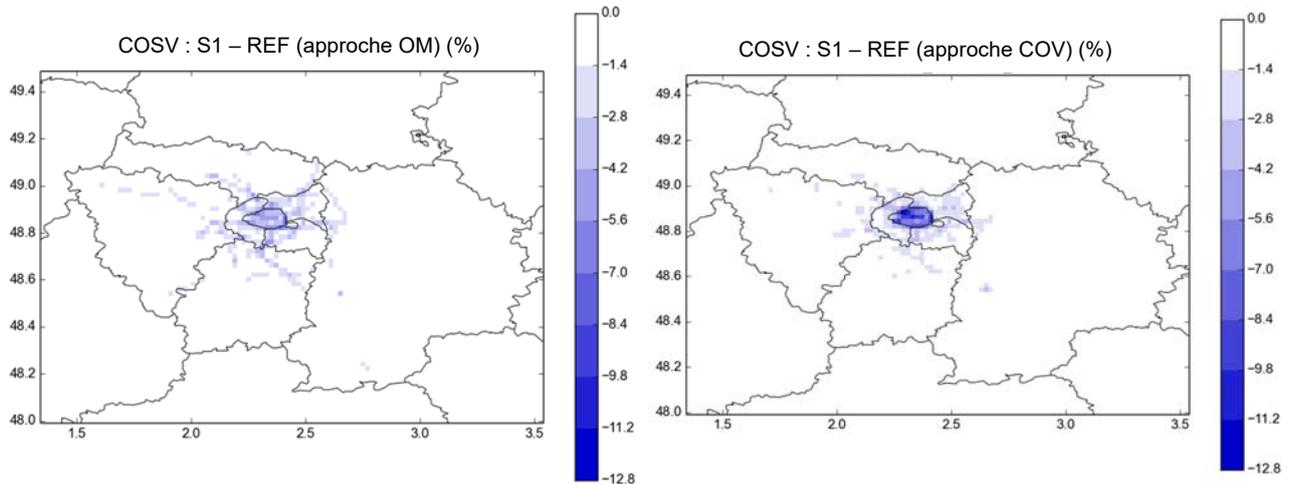


Figure 91 : Différences relatives (%) des émissions trafic entre le scénario FAP (S1) et la référence si les émissions de COSV sont calculées à partir du rapport COSV/OM (à gauche), et si les émissions de COSV sont calculées à partir du rapport COSV/COV (à droite)

La Figure 92 montre les différences des émissions trafic entre le scénario Essence (S2) et le scénario FAP (S1) lorsque ces émissions sont calculées à partir du rapport COSV/OM (à gauche) et lorsque le rapport COSV/COV est utilisé (à droite). Les différences entre les scénarios FAP (S1) et Essence (S2) sont plus importantes dans les simulations de référence que dans celles de sensibilité.

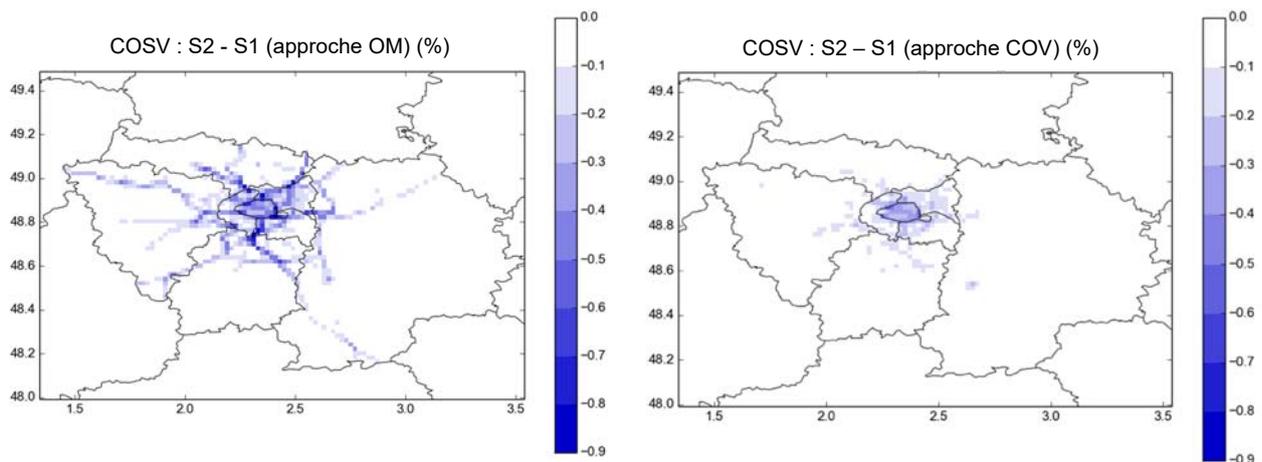


Figure 92 : Différences relatives des émissions trafic entre le scénario Essence (S2) et le scénario FAP (S1) si les émissions de COSV sont calculées à partir du rapport COSV/OM (à gauche) et si les émissions de COSV sont calculées à partir du rapport COSV/COV (à droite)

7.3.2.3 Les concentrations

Les émissions de COSV influencent les concentrations des composés organiques des particules.

Simulation de référence

Pour la simulation de référence, les concentrations en composés organiques des particules obtenues à partir du rapport COSV/COV sont plus basses que celles obtenues à partir du rapport COSV/OM, surtout le long des autoroutes où les émissions de COSV sont plus basses de jusqu'à -60 % (Figure 93). Cela est aussi vrai dans Paris, bien que les émissions de COSV y soient jusqu'à plus de deux fois plus élevées que dans la simulation réalisée à partir du rapport COSV/OM.

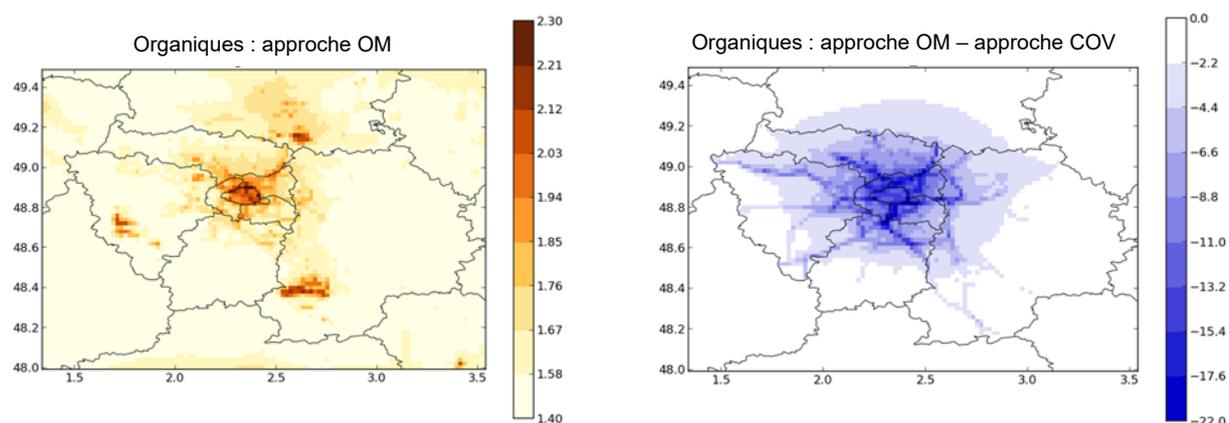


Figure 93 : Concentrations en organiques en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (à gauche) et différences relatives (en %) entre les concentrations obtenues avec des émissions estimées à partir du rapport COSV/COV et celles obtenues avec des émissions estimées à partir du rapport COSV/OM (à droite)

Cette différence dans le signe de variations des émissions et des concentrations s'explique par les différences de volatilité des émissions estimées à partir du rapport COSV/OM et celles estimées à partir du rapport COSV/COV. Ces dernières sont réparties dans des classes de volatilité supérieures à celles calculées à partir du rapport COSV/OM. Ainsi la fraction de COSV en phase particulaire est plus faible lorsque les émissions sont calculées à partir du rapport COSV/COV.

En effet, la Figure 94 montre que les concentrations totales en organiques (gaz et particules) sont plus élevées de 25 % dans la simulation obtenue avec des émissions en fonction du rapport COSV/COV que dans celle où les émissions sont estimées à partir de COSV/OM, en accord avec les variations observées entre les émissions des deux simulations (jusqu'à +267 % dans Paris). Les différences sur les émissions sont cependant relativement plus importantes que celles sur les concentrations.

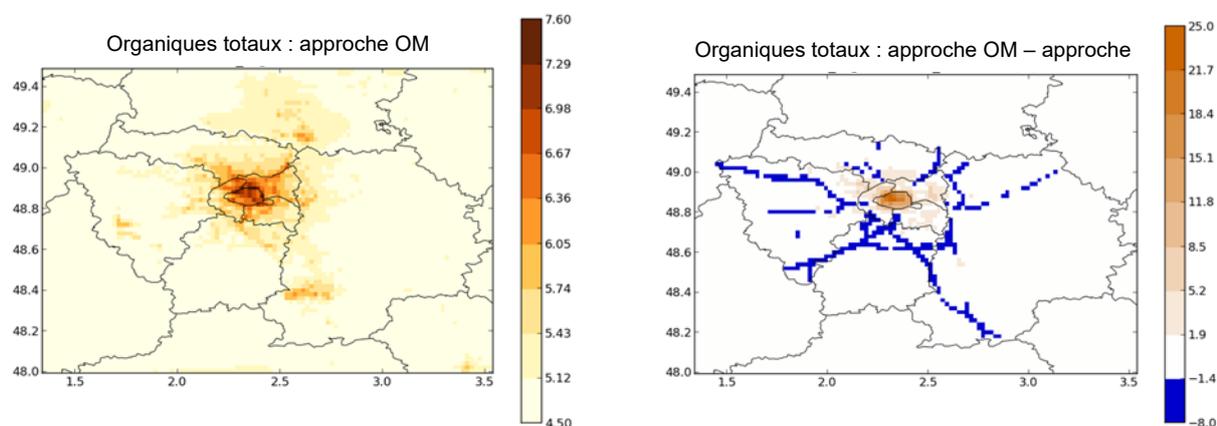


Figure 94 : Concentrations en organiques totaux (gaz + particules) en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (à gauche) et différences relatives (en %) entre les concentrations obtenues avec des émissions estimées à partir du rapport COSV/COV et celles obtenues avec des émissions estimées à partir du rapport COSV/OM (à droite)

Les scénarios

Les scénarios entraînent une diminution des concentrations en particules organiques par rapport au scénario de référence (Figure 95). Pour le scénario FAP (S1), cette différence est moins marquée quand les COSV sont calculés à partir du rapport COSV/OM que quand ils sont calculés à partir du rapport COSV/COV. Au niveau des émissions, l'inverse est observé, c'est-à-dire que la différence entre le scénario FAP (S1) et le scénario de référence est moins marquée quand les COSV sont calculés à partir du rapport COSV/COV que quand ils sont calculés à partir du rapport COSV/OM.

Cette contradiction entre l'évolution des différences pour les émissions et les concentrations s'explique comme précédemment par les différences de volatilité des émissions calculées à partir du rapport COSV/OM et celles calculées à partir du rapport COSV/COV, celles-ci se répartissant dans des classes de volatilité supérieures à celles calculées à partir de COSV/OM. Ainsi la fraction de COSV en phase particulaire est plus faible dans la simulation où les émissions sont calculées à partir du rapport COSV/COV.

Concernant les organiques totaux (gaz + particules), les différences entre le scénario FAP (S1) et la référence sont plus importantes, surtout dans Paris quand les émissions de COSV sont calculées à partir de COSV/COV que quand elles le sont à partir de COSV/OM (Figure 96). Entre les scénarios FAP (S1) et Essence (S2), les différences sont faibles en émissions (< 1 %, Figure 92) et en concentrations.

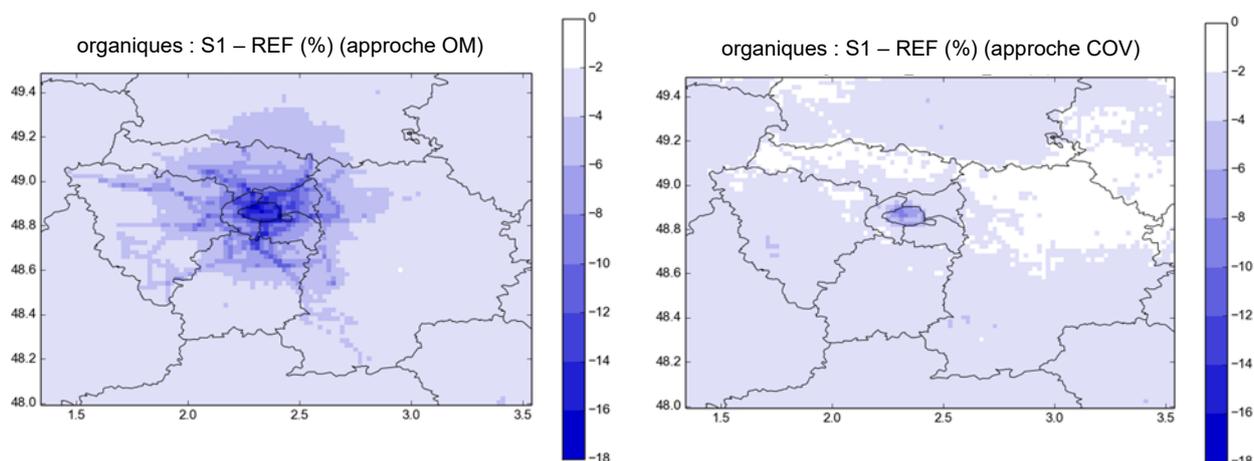


Figure 95 : Différences en % des concentrations en particules organiques entre le scénario FAP (S1) et la référence quand les émissions de COSV sont calculées à partir du rapport COSV/OM (à gauche) et quand les émissions de COSV sont calculées à partir du rapport COSV/COV (à droite)

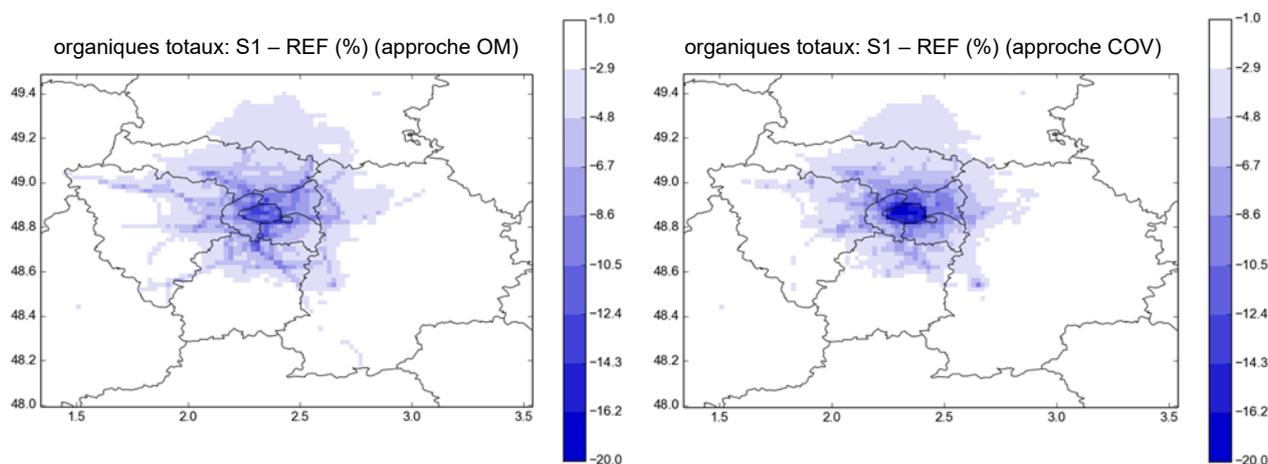


Figure 96 : Différences en % des concentrations en organiques (gaz + particules) entre le scénario FAP (S1) et la référence quand les émissions de COSV sont calculées à partir du rapport COSV/OM (à gauche) et quand les émissions de COSV sont calculées à partir du rapport COSV/COV (à droite)

En conclusion, selon que le rapport COSV/OM ou COSV/NMHC est utilisé pour calculer les émissions de COSV, les variations de concentration de l'ozone avec les scénarios sont assez faibles. Les écarts de concentrations de PM_{2,5} sont principalement liés aux variations des composés organiques.

7.3.3 Analyses complémentaires à envisager

En complément des travaux précédents, il serait souhaitable de confronter les facteurs d'émission de la méthodologie COPERT avec d'autres travaux issus de la littérature ou de travaux expérimentaux récents, notamment : les données particulières (BC, matière organique, HAP particulières), les émissions de particules hors échappement (frein, pneu, remise en suspension), les spéciations de COV, les facteurs d'émission de précurseurs comme NH₃, etc. en lien avec les technologies et carburants. Des analyses de sensibilité à ces facteurs d'émission ainsi qu'à différents paramètres de simulation seraient également souhaitables.

7.4 Discussion / conclusions

L'approche mise en œuvre pour évaluer l'influence de diverses évolutions technologiques sur les émissions, les concentrations de polluants voire l'exposition des personnes, a mobilisé des outils, des données et des connaissances parmi les plus avancés et en accord avec l'état de l'art scientifique.

L'analyse critique développée dans ce chapitre a permis d'explicitier les choix méthodologiques (approche par scénarios, invariance de nombreux éléments de contexte, outils, hypothèses diverses), tout en identifiant leurs limites éventuelles et en proposant des pistes qui permettraient de prolonger ces travaux.

En raison de la complexité des simulations et des interactions entre les phénomènes, du manque d'informations quantitatives sur les incertitudes des facteurs d'émissions (du trafic ou des autres secteurs) et de la difficulté d'affecter des intervalles de confiance aux multiples données d'entrée, notamment les compositions de parc automobile, il est difficile d'apporter un éclairage précis sur les incertitudes qui affectent les simulations. Quelques informations sont disponibles pour les exercices d'inventaires d'émissions, mais elles concernent des estimations très macroscopiques. Des analyses spécifiques des données d'entrée (qualité de l'estimation) et de sensibilité des estimations à ces données permettraient d'en relativiser l'enjeu.

Globalement, l'approche ne rend pas compte de la pollution en proximité des sources (trafic), mais les tendances observées sur les concentrations de fond, de même que le croisement de ces concentrations avec les populations, constituent des indications pertinentes des évolutions attendues par les scénarios retenus.

Plusieurs aspects méthodologiques questionnent la robustesse des comparaisons entre les scénarios et la signification statistique des écarts obtenus par la simulation. Ce sont notamment l'invariance des émissions des autres secteurs, les incertitudes sur les facteurs d'émissions actuels et futurs, la spatialisation et la temporalisation des activités et émissions, etc. L'approche comparative par scénarios justifiait ces choix et limite probablement les biais potentiels. Des travaux complémentaires – notamment par des analyses de sensibilité – permettraient de le confirmer.

Deux aspects spécifiques ont enfin été analysés quant à leur influence sur les simulations : la révision des facteurs d'émissions de NO_x et NO₂ d'une part et la détermination des composés organiques semi-volatils.

Les émissions de COSV (non documentées dans les inventaires d'émission) participent de manière significative à la formation de particules organiques surtout en zone urbaine. La sensibilité des résultats à la paramétrisation qui permet de déterminer les COSV a été étudiée. En moyenne sur l'Île-de-France, les émissions de COSV estimées à partir de deux paramétrisations (basées sur OM et NMHC respectivement) sont similaires, mais de fortes variations spatiales existent, avec

notamment des émissions beaucoup plus élevées en zone urbaine et plus faibles le long des axes autoroutiers avec la paramétrisation NMHC. Les différences sur les émissions sont cependant plus importantes que celles observées sur les concentrations.

Dans les deux cas, les scénarios prospectifs entraînent une diminution des émissions de COSV et des concentrations en particules organiques par rapport à la référence, notamment dans Paris (pour le scénario FAP (S1) : jusqu'à -18 % avec la paramétrisation OM et jusqu'à -10 % avec la paramétrisation NMHC). Les concentrations simulées diffèrent non seulement parce que l'intensité des émissions est différente dans Paris, mais aussi en raison de la volatilité différente des émissions selon les paramétrisations.

Cette analyse montre donc qu'il existe encore une incertitude élevée sur les émissions de COSV et leurs transformations dans l'atmosphère, malgré leur contribution forte à la qualité de l'air urbaine. Connaître la volatilité de ces émissions et leur réactivité chimique est important pour estimer les concentrations en particules formées suite à ces émissions.

8 Conclusions

8.1 Outils et scénarios

Des outils de simulation des émissions et concentrations de polluants ont été mis en œuvre pour l'évaluation de l'impact de scénarios d'évolution des parcs automobiles, sur la qualité de l'air en Île-de-France et en France

En réponse à la question de l'impact différencié des technologies sur les émissions de particules du trafic routier, une approche par simulation des émissions et concentrations de polluants sur l'Île-de-France⁶⁴ et sur le territoire national (France) a été développée et mise en œuvre.

Cette approche combine des outils existants (plate-forme Heaven d'Airparif pour le calcul des émissions de polluants du trafic sur le réseau routier de la région Île-de-France, en s'appuyant sur la méthodologie européenne COPERT4 ; plate-forme Polyphemus de simulation de la pollution atmosphérique pour l'échelle régionale). Elle a également mobilisé de nombreuses données : trafic modélisé sur l'ensemble du territoire Île-de-France, données météorologiques régionales et nationales, inventaires Île-de-France et France des émissions de polluants des secteurs d'activités autres que le transport routier, inventaire européen des émissions, etc. Globalement, la démarche prend en compte les émissions de polluants de tous les secteurs d'activités, les émissions naturelles et les imports d'émissions des échelles supérieures (Europe vers France, France vers Île-de-France). Elle intègre la plupart des interactions physico-chimiques connues entre les polluants.

Des scénarios technologiques d'évolution des compositions des parcs automobiles ont été élaborés et les émissions du trafic routier régional et national ont été simulées en fonction de ces scénarios. Dans ce but, les données de composition des parcs automobiles de 2014 (Île-de-France et France) ont été considérées, et un modèle a été utilisé pour simuler l'évolution / le renouvellement du parc automobile à l'horizon 2025 sous différentes hypothèses :

- généralisation du filtre à particule (scénario FAP ou S1), ainsi qu'une variante avec diminution importante des COV par annulation des émissions des deux-roues motorisés supposés alors électriques (S1 – 2R élec) et évolution réglementaire à cet horizon ;
- recul marqué des motorisations Diesel au profit des motorisations essence pour les véhicules légers (scénario Essence ou S2), obtenu par une prévision de chute à 5 % des véhicules neufs Diesel vendus en 2025, avec toujours la même évolution réglementaire.

En complément de la situation de référence (année 2014), ces scénarios ont été simulés en émissions et concentrations de polluants sur l'Île-de-France (résolution fine) et sur la France, en faisant varier les émissions de polluants du trafic par les compositions de parc (approche Heaven en Île-de-France, transposition de l'inventaire national sur le reste du territoire).

Deux autres scénarios ont été testés et simulés seulement en émissions et sur l'Île-de-France :

- le scénario Technologies Alternatives, avec la promotion marquée de véhicules électriques sur le réseau routier urbain, pour toutes les catégories des véhicules (prévision de ventes à 2025 de 40 % des voitures en électriques, de 60 % des véhicules utilitaires légers, et conversion en électriques de tous les camions et autobus Euro 3 et antérieurs et de tous les deux-roues motorisés de moins de 250 cm³), tandis que sur le reste du territoire circule le parc du scénario FAP (S1) ;
- le scénario Ambition Air, avec une réduction de 20 % du trafic dans le périmètre très urbanisé intra-A86 et une conversion de ce trafic en électrique conformément au scénario Technologies Alternatives, tandis que sur le reste du territoire circule le parc du scénario FAP (S1).

⁶⁴ La région Île-de-France a été choisie en raison de la disponibilité des outils et données à échelle fine et de l'enjeu important de pollution, tandis que l'analyse sur le territoire national permet une représentativité élargie ainsi qu'une analyse selon les lieux et contextes.

Différents travaux (études d'impacts du plan de déplacement de l'Île-de-France et de zone de restriction de la circulation) ainsi que l'évolution rétrospective des émissions et concentrations de polluants en France et Île-de-France complètent ces travaux par simulation.

Les résultats des simulations ont été élaborés en lien avec les problématiques d'exposition et d'impacts sanitaires, combinant des statistiques d'évolution des valeurs moyennes mais aussi de dépassements de seuils, des analyses territoriales, ainsi que des nombres de personnes exposées.

L'analyse des résultats repose sur une description « phénoménologique » détaillée permettant une meilleure interprétation et compréhension des mécanismes qui peuvent conduire à une amélioration ou dégradation de la pollution et des enjeux.

Au final, les travaux présentés dans ce cadre constituent une expérience assez unique par la mobilisation de moyens, données, compétences complémentaires en vue de la simulation des émissions et concentrations de polluants atmosphériques, ainsi que l'exposition de la population sous différents scénarios. Les approches et outils développés constituent un cadre mobilisable pour des travaux ultérieurs investiguant l'impact de scénarios d'évolution des émissions du trafic et d'autres sources sur la pollution atmosphérique et la santé.

Une analyse critique de l'approche est proposée, qui explicite les choix méthodologiques et les hypothèses tout en identifiant leurs limites et propose des pistes d'approfondissement. La littérature apporte un éclairage partiel sur les incertitudes, tandis qu'une analyse des facteurs d'émissions et de la détermination des COSV illustre la sensibilité des simulations.

8.2 Émissions de polluants (quantités annuelles, t/an)

Le trafic routier représente actuellement un enjeu important en NOx, BC, OM, PM_{2,5}, accru en zone urbaine, avec des contributions très différenciées selon les familles de véhicules.

Les simulations en Île-de-France montrent l'importance de la contribution du trafic à la pollution de l'air et permettent d'identifier les enjeux (catégories de véhicules, émissions, polluants) :

- ainsi, la contribution du trafic routier aux émissions de polluants totales (tous secteurs) en Île-de-France est forte pour les oxydes d'azotes NOx (58 %), plus modérée pour les particules PM₁₀, PM_{2,5} (20-25 %), mais forte pour le carbone suie BC (54 %) et la matière organique OM (37 %) ; elle est relativement limitée pour les COV (11 %) et l'ammoniac NH₃ (9 %). Dans le périmètre très urbanisé intra-A86, cette contribution du trafic est accrue pour BC (58 %), OM (43 %) et NH₃ (94 %) ;
- au sein du transport routier, les voitures sont prépondérantes en volume de trafic et émissions de polluants (71 % du trafic, 40-50 % des émissions des polluants étudiés). Les véhicules utilitaires légers (VUL) Diesel sont moins nombreux (15 % du trafic) mais encore peu équipés de filtre à particules ; ils produisent autant de particules que les voitures et sont même prédominants pour les particules très fines PM_{1,0} ou la matière organique OM. Les véhicules lourds (camions / bus et cars) (6 % du trafic) contribuent fortement aux émissions de NOx (36 %) et plus faiblement aux émissions de particules (10-14 %). Les deux-roues actuels qui ne représentent guère que 8 % du trafic, sont fortement émetteurs de COV (45 %), avec les voitures essence (41 %).

À un horizon d'une dizaine d'années, les différents scénarios technologiques retenus induisent une forte diminution (entre -30 et -60 %) des émissions de polluants du trafic en Île-de-France et en France.

- ***La promotion de véhicules légers essence au détriment des véhicules légers Diesel avec pour conséquence un renouvellement accéléré du parc (scénario Essence ou S2) se traduit par des réductions supplémentaires des émissions de particules mais par une réduction moindre des COV et NH₃.***

- ***En Île-de-France, la promotion des véhicules électriques en zone urbaine et surtout la réduction du trafic des véhicules légers au profit des transports en commun et des deux-roues permettent des réductions plus marquées et surtout localisées en zone urbanisée et peuplée intra-A86.***

En comparaison à la situation de référence (année 2014), tous les scénarios technologiques à 2025 diminuent fortement les émissions du trafic par l'équipement en FAP et par l'évolution réglementaire. Ainsi, en Île-de-France, la généralisation du filtre à particules sur les véhicules Diesel (scénario FAP (S1) quasi au fil de l'eau d'ici 2025) diminue les émissions du trafic : de -60 % pour les particules liées à la combustion (PM_{1,0}, BC, PN) ; les réductions d'émission de PM_{2,5} (-40 %) et de PM₁₀ (-30 %) sont plus modestes car l'abrasion (pneus, freins, route) ne diminue pas ; enfin, l'évolution réglementaire concomitante contribue à une réduction de -30 % des COV, -50 % pour NOx et NO₂ et -36 % de NH₃.

Dans un bilan sur l'ensemble des secteurs d'activité, les réductions d'émission de polluants selon les différents scénarios sont atténuées au prorata de ce que représentent les émissions du trafic. Ainsi, les réductions globales d'émissions par les scénarios FAP (S1) et Essence (S2) sont respectivement de -31 et -36 % pour les NOx (au lieu de -53 et -62% de réduction des émissions du trafic), de -33 et -40 % pour le BC (au lieu de -62 % et -74 % pour les émissions du trafic). Les réductions des émissions des autres polluants sont plus atténuées : -11 et -13 % pour PM_{2,5}, -3 % et -1 % pour COV, -7 % et 8 % pour PM_{2,5-10}, -2 % et -3 % pour NH₃ à l'échelle de la région Île-de-France.

Vis-à-vis du changement climatique, une baisse de -10 % des émissions de CO₂ du trafic routier est observée à l'échelle de l'Île-de-France pour les scénarios FAP (S1) et Essence (S2), avec des réductions supplémentaires de -10 et -7 % pour respectivement les scénarios Technologies Alternatives et Ambition Air.

En prenant comme référence le scénario FAP (S1), qui constitue quasiment un scénario au fil de l'eau, les autres options technologiques donnent les résultats suivants :

- un recul des véhicules légers Diesel au profit de véhicules essence avec pour conséquence un renouvellement accéléré du parc (scénario Essence ou S2) se traduit globalement par des diminutions supplémentaires de l'ordre de -30 % des émissions de particules de combustion (BC), de -10 à -15 % des émissions de PM_{2,5} et PM₁₀, et de -20 % des émissions de NOx, mais par une augmentation de +15 % des émissions de COV et +30 % pour celles de NH₃ ;
- les scénarios Technologies Alternatives (électriques) et de réduction du trafic en intra-A86 (Ambition Air), se traduisent également par des diminutions supplémentaires des émissions à l'échelle de la région Île-de-France, plus faibles que celles obtenues avec le scénario Essence (S2) pour les particules, mais plus avantageuses pour le CO₂ (gaz à effet de serre), les COV et le NH₃ ;
- les améliorations apportées par les scénarios Technologies Alternatives (électriques) et de réduction du trafic sont surtout plus marquées en intra-A86, ce qui constitue un enjeu local fort en raison des densités de population beaucoup plus élevées dans ce périmètre urbanisé : -18 à -29 % des émissions de particules de combustion et -30 % des émissions de polluants gazeux (sauf NH₃ et CO₂) avec les véhicules électriques, -34 à -43 % des émissions de particules de combustion et -20 à -44 % des polluants gazeux. Ces réductions sont liées notamment à une réduction du trafic d'environ 17 % dans ce périmètre.

8.3 Concentrations de polluants (moyennes annuelles et valeurs élevées ou « pics »)

Pour rappel, les concentrations de polluants ont été simulées sur la France et la région Île-de-France, en ne considérant que les scénarios FAP (S1), S1-2R élec (sensibilité aux COV) et Essence (S2) en complément de la situation de référence.

En moyenne annuelle, en France et en Île-de-France, tous les scénarios prospectifs conduisent à des diminutions des concentrations atmosphériques de polluants, par rapport à la situation de référence (2014).

- **Ces diminutions sont plus limitées que celles observées pour les émissions. Elles sont importantes pour des polluants émis plus particulièrement par le trafic (BC, NO₂), plus limitées pour les particules (PM_{2,5}) et leurs fractions organique et inorganique provenant de processus de transformation dans l'atmosphère.**
- **Pour l'ozone, les concentrations peuvent cependant augmenter en zone urbaine.**

Entre les différents scénarios prospectifs eux-mêmes, les variations de concentrations sont assez faibles.

Avec l'évolution réglementaire entre la situation de référence (2014) et l'horizon 2025 et la baisse des émissions qui en résulte par le renouvellement du parc à cet horizon, les différents scénarios d'évolution technologique du parc automobile conduisent à des réductions des concentrations de polluants. Ces réductions sont assez faibles et plus limitées que celles observées pour les émissions du trafic du fait de la multitude des sources d'émissions, et – pour les concentrations particulières – en raison de leur formation dans l'atmosphère par processus physico-chimiques.

- Ainsi sur l'Île-de-France, la réduction forte des émissions de NO_x (-39 % pour le scénario Essence (S2) et -35 % pour le scénario FAP (S1)) et la diminution de COV (-5 %) entraînent une baisse importante des concentrations moyennes annuelles de NO₂ (avec des variations spatiales importantes allant de -1 % à -60 % pour le scénario Essence (S2) et -1 % à -54 % pour le scénario FAP (S1)). Par contre, les concentrations d'ozone ont tendance à augmenter avec des disparités selon les territoires (en Île-de-France -4 % à +27 % pour le scénario Essence (S2) et -4 % à +23 % pour le scénario FAP (S1)).
- La réduction des émissions de PM_{2,5} (-14 %) entraîne une baisse moins importante des concentrations (-3 % à -12 % selon les lieux) en Île-de-France car de nombreux composés inorganiques et organiques des particules sont secondaires (formés dans l'atmosphère). Les composés primaires et non réactifs des particules (carbone suie BC), dont l'émission diminue fortement avec les scénarios prospectifs (-42 % pour le scénario Essence (S2) et -36 % pour le scénario FAP (S1)), sont réduits aussi de manière importante en concentrations dans l'atmosphère (-17 % à -56 % selon les lieux pour le scénario Essence (S2) et de -13 % à -47 % pour le scénario FAP (S1)).

Les différences observées entre les différents scénarios prospectifs et la situation de référence peuvent être importantes tandis que les différences entre les scénarios prospectifs eux-mêmes sont plus limitées. Ceci est lié à l'importante évolution réglementaire entre la situation de référence et les scénarios prospectifs, à la baisse des émissions par le renouvellement du parc à l'horizon 2025, ainsi qu'au fait que les écarts d'émissions entre les technologies sont atténués à cet horizon.

Pour rappel, ces scénarios varient uniquement en composition technologique du parc (motorisations, technologies de dépollution) tandis que les autres paramètres sont invariants (trafic, modes de déplacement, autres secteurs émetteurs, conditions météorologiques).

Globalement, il est observé pour chacun des scénarios prospectifs FAP (S1) et Essence (S2) étudiés que :

- excepté pour l'ozone (O₃) dont les concentrations augmentent en zone urbaine, les émissions et les concentrations atmosphériques diminuent pour tous les autres polluants étudiés : carbone suie (BC), NO₂, PM_{2,5}, les fractions organique et inorganique des particules, les COV et les COSV⁶⁵ ;

⁶⁵ Seule l'évolution des émissions en t/an de COV et COSV a été étudiée, et non l'évolution en concentration atmosphérique de COV et COSV.

- les diminutions des concentrations atmosphériques de NO₂ (environ -40 % et -25 % en moyenne annuelle sur l'Île-de-France et la France) et de BC (environ -30 % et -20 % en moyenne annuelle sur l'Île-de-France et la France) sont plus fortes que celles des PM_{2,5} et des fractions organiques et inorganiques des particules (environ -5 % en moyenne annuelle sur l'Île-de-France et la France). Le dioxyde d'azote (NO₂) et le carbone suie (BC) sont des polluants pour lesquels la contribution du trafic est prédominante par rapport aux autres secteurs d'activité et pour lesquels les évolutions technologiques envisagées par les scénarios (filtre à particules, promotion des véhicules essence) contribuent à baisser considérablement les émissions.

Les concentrations de polluants atmosphériques élevées (pics) sont plus fortement réduites que les concentrations moyennes annuelles.

- la diminution des fortes concentrations atmosphériques est plus importante que celle des concentrations moyennes annuelles. En d'autres termes, les évolutions technologiques envisagées du parc sont plus à même de réduire l'intensité des pics de pollution que les niveaux annuels de pollution ;
- le nombre annuel de dépassements de la valeur guide journalière de l'OMS pour les PM_{2,5} diminue (environ -15 % sur l'Île-de-France). En revanche, le nombre de dépassements de la valeur guide annuelle de l'OMS reste constant et concerne toujours la quasi-totalité du territoire.

Les concentrations d'ozone peuvent augmenter dans les grandes agglomérations. Cette augmentation est préoccupante, car elle indique une augmentation des oxydants dans l'atmosphère, susceptibles de contribuer à une augmentation de la formation des composés secondaires (inorganiques et organiques), si les gaz précurseurs de ces composés ne sont pas réduits.

Les variations des polluants secondaires comme l'O₃, ainsi que les composés particuliers inorganiques et organiques dépendent du régime chimique de l'atmosphère (via la formation d'oxydants), qui est une caractéristique du territoire considéré (selon sa situation : urbanisée ou non, et selon les différentes sources et proportions d'émissions des différents polluants dont la présence ou non d'émissions biogéniques). Le contexte peut ainsi être favorable à la diminution de la pollution en lien avec une réduction des émissions dans certains cas, tandis que les conditions peuvent être moins favorables dans d'autres lieux.

Les régimes chimiques qui régissent la formation de l'O₃ et des composés secondaires sont en grande partie contrôlés par le rapport COV/NOx. Ainsi, dans les grandes villes de France (Paris, Lyon, Marseille, Lille, Bordeaux, Toulouse, Nantes, etc.) et dans le nord et l'est de la France, la formation d'ozone et de composés secondaires dépend fortement des concentrations en COV⁶⁶. À l'inverse, à proximité des régions à fortes émissions biogéniques (Landes, Languedoc, Cévennes, Auvergne et Jura), cette formation dépend fortement des concentrations en NOx.

Ainsi, les scénarios entraînent une diminution de l'ozone sauf dans les grandes villes où il augmente, surtout en hiver (mais pour des concentrations initialement faibles). De plus, les augmentations ou diminutions des concentrations d'ozone sont accentuées dans les deux sens par le scénario Essence (S2), comparé au scénario FAP (S1).

⁶⁶ En régime « COV limité » ou COV/NOx faible, une diminution des COV entraîne une diminution de l'ozone, tandis qu'une diminution des NOx entraîne une augmentation de l'ozone.

Pour les concentrations de particules, le scénario de promotion des véhicules légers essence est légèrement plus favorable que le scénario au fil de l'eau avec généralisation du filtre à particules Diesel.

En ce qui concerne les émissions et concentrations atmosphériques en particules, le scénario Essence (S2) est toujours légèrement plus favorable que le scénario quasi au fil de l'eau FAP (S1). La différence est plus marquée pour les particules primaires du trafic (BC) que pour les particules incluant des composés secondaires (PM_{2,5}, fractions organiques et inorganiques). La différence est également marquée pour le NO₂.

Ce léger avantage du scénario Essence (S2) par rapport au scénario FAP (S1) est dû en grande partie aux différences d'émission entre ces technologies (80 % et 60 % de la réduction d'émission en PM_{2,5} et BC respectivement). Il est également lié au renouvellement accéléré du parc automobile avec le scénario Essence (S2) qui se traduit par de plus fortes proportions de véhicules récents ou équipés de FAP : 92 % de véhicules Euro 5 et Euro 6, et 7 % de véhicules légers Diesel sans FAP dans le parc roulant urbain de véhicules légers en Île-de-France contre respectivement 79 % et 15 % dans le scénario FAP (S1). Ce renouvellement accéléré du parc contribue ainsi au bénéfice du scénario Essence (S2), cette contribution étant cependant minoritaire (20 % et 40 % de la réduction d'émission en PM_{2,5} et BC respectivement).

Bien que les processus de formation des particules secondaires diffèrent selon les lieux et en lien avec les émissions naturelles et des autres secteurs (constants ici), tous les scénarios prospectifs se traduisent dans tous les cas par des baisses des particules organiques et inorganiques.

La diminution des émissions des précurseurs de particules⁶⁷ induite par les scénarios prospectifs entraîne une baisse des concentrations de particules organiques et inorganiques, même en zone urbaine où les oxydants peuvent augmenter.

Ainsi, pour les composés organiques des particules, les scénarios induisent une réduction des concentrations en zones urbaines, le long des axes routiers, mais également à proximité des forêts et parcs naturels ; cette baisse est due à la diminution des oxydants à proximité des forêts et à la diminution des émissions de précurseurs en zone urbaine et le long des axes routiers. De même, le remplacement des deux-roues à moteur thermique par des deux-roues électriques, en plus de la généralisation des filtres à particules Diesel (scénario S1 – 2R élec), mène à des concentrations similaires à celles du scénario FAP (S1) seul sur l'Île-de-France, mais à des réductions plus marquées dans le domaine intra-A86, en particulier pour les organiques, en raison de la diminution des émissions de COV dans ce scénario. En effet, cette diminution des COV induit une diminution des oxydants et donc des organiques secondaires dans le domaine intra-A86 et dans Paris, où le régime est limité en COV. À noter que l'estimation de la concentration des particules organiques secondaires dans les scénarios reste incertaine en raison des incertitudes sur les émissions de COSV du trafic.

8.4 Exposition de la population

Le croisement des concentrations de polluants avec les densités de populations – bien qu'indicatif – montre une amélioration de la qualité de l'air dans les zones denses.

Bien que la pollution de proximité ne soit pas prise en compte, l'analyse conjointe des variations des concentrations moyennes annuelles de polluants (PM₁₀ et NO₂) simulées et de la densité de

⁶⁷ NO₂, polluant plutôt lié aux motorisations Diesel, COV liés aux motorisations essence, notamment les deux-roues motorisés, COSV liés aux motorisations Diesel et essence.

population résidente permet d'estimer un impact potentiel sur l'exposition à la pollution par maille de 1 km² sur l'Île-de-France.

Les diminutions de concentrations étant plus importantes dans les zones de forte densité de population et le long des axes routiers, l'amélioration de la qualité de l'air est donc accentuée dans les zones les plus peuplées. Les gains les plus importants sont observés avec le scénario Essence (S2), mais les écarts avec le scénario FAP (S1) sont faibles.

Ainsi, pour les PM₁₀, l'ensemble de la population d'Île-de-France réside dans un lieu où la concentration moyenne annuelle dans l'air ambiant extérieur diminuerait d'au moins 0,4 µg/m³. Les réductions les plus conséquentes (au moins 2 µg/m³) concerneraient 0,4 % de la population avec le scénario FAP (S1) et 1,6 % avec le scénario Essence (S2).

Pour le NO₂, la tendance est à une diminution importante des concentrations de NO₂ pour une grande partie de la population. Ainsi, 42 % de la population bénéficient d'une diminution d'au moins 10 µg/m³ selon le scénario FAP (S1) et 49 % selon le scénario Essence (S2). Une diminution maximale d'au moins 18 µg/m³ en concentration moyenne annuelle dans l'air ambiant extérieur concerne 1,4 % de la population avec le scénario FAP (S1) et 11 % avec le scénario Essence (S2).

8.5 Analyse rétrospective

Les résultats des simulations montrent des évolutions cohérentes avec les observations rétrospectives en France et en Île-de-France.

Les analyses rétrospectives montrent une baisse des émissions des polluants particuliers et gazeux du trafic et des autres secteurs sur les deux dernières décennies, liée notamment aux systèmes de dépollution et à l'amélioration des carburants du trafic routier, ceci malgré une hausse du trafic et un accroissement de la diésélisation du parc. Les particules primaires issues des transports routiers sont principalement émises par les véhicules Diesel non équipés de filtre à particules, les véhicules anciens contribuant fortement aux émissions du trafic malgré un nombre de kilomètres parcourus relativement faible.

Les baisses d'émissions de particules à l'échappement font émerger les émissions liées à l'usure (freins, pneus, route) et à la remise en suspension, qui deviennent prépondérantes en masse. Cette évolution concerne les particules PM₁₀ principalement.

Globalement, les baisses d'émission se sont traduites par des diminutions des concentrations (PM₁₀, PM_{2,5}, NO₂) avec cependant des disparités fortes notamment en proximité du trafic où des dépassements des normes sanitaires fixées par la réglementation européenne (directives 2008/50/CE et 2004/107/CE) subsistent en certains points du territoire national.

En Île-de-France, les concentrations particulières (PM₁₀, PM_{2,5}) en moyennes annuelles ont diminué de 25 % en 15 ans et de 45 % en proximité du trafic. Ces dernières années, il est noté par ailleurs une légère baisse du trafic total, notamment des camions (-20 % entre 2000 et 2012), avec cependant une augmentation forte du trafic des véhicules utilitaires légers et des deux-roues motorisés en zone urbaine.

En France, le trafic routier a augmenté de +1,2 % par an en moyenne ces dernières années et à un rythme plus soutenu en 2015 (+2,2 %) et 2016 (+2,5 %) (CCFA 2017), cette augmentation concernant aussi bien les voitures particulières que les bus, cars et poids lourds pour le transport de marchandises. Le trafic de voitures les plus modernes (Euro 5 et plus) représente 41 % du trafic total de voitures (hors véhicules utilitaires légers) en 2016 (CITEPA/Ominea 2018). Les motorisations alternatives (électriques, hybrides) restent, malgré leur progression, à un niveau très limité avec 21 758 voitures particulières électriques et 7 482 véhicules hybrides rechargeables immatriculés en 2016⁶⁸.

⁶⁸ Source : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/developpement-des-vehicules-propres>, consulté le 1^{er} février 2017

8.6 Synthèse des résultats

En réponse à la question B de la saisine (p.23), sont résumés dans les Tableau 61 et Tableau 62 les impacts différenciés des scénarios prospectifs variant en composition technologique du parc automobile roulant (motorisations, systèmes de dépollution) sur les émissions du trafic routier et sur les concentrations atmosphériques respectivement, pour les principaux polluants particulaires et gazeux.

Ces tableaux reprennent sous forme de flèches et d'un code couleurs la direction et l'intensité des évolutions simulées des émissions du trafic routier (Tableau 61) et des concentrations atmosphériques (Tableau 62).

Tableau 61 : Synthèse de l'impact des scénarios sur les émissions des polluants particulaires et gazeux du trafic routier

		PM _{2,5}	PM ₁₀	OM	PNC*	BC	NO ₂	COV	NH ₃	CO ₂
scénarios prospectifs comparés au scénario de référence (2014)	scénario FAP (S1) généralisation du filtre à particules Diesel, quasi au fil de l'eau à 2025	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓
	scénario Essence (S2) décroissance de 60 % en 2014 à 5 % en 2025 des ventes de véhicules légers Diesel au profit des essence	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓	↓
Variation de l'émission moyenne annuelle du trafic en intra-A86 comparée au scénario de référence (t/an)**. ↓/↑ : diminution/augmentation modérée : [8 % ; 15 %] ; ↓↓/↑↑ : diminution/augmentation forte : [28 % ; 78 %]										
scénarios prospectifs comparés au scénario FAP (S1)	scénario Essence (S2) (mécaniquement, renouvellement du parc accentué avec le scénario Essence (S2) par rapport au scénario FAP (S1) impliquant une part plus faible de véhicules pré-Euro 5 dans le parc Ile-de-France (8 % vs 21 %)	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↑↑	=↗
	scénario Technologies Alternatives en urbain : - évolution du marché pour atteindre en 2025 40 % des ventes de voitures particulières et 60 % de véhicules utilitaires légers en électrique, et seulement 5 % en Diesel - camions et autobus Euro 3 et antérieurs, et deux-roues < 250 cm ³ tous remplacés en électrique en 2025 hors urbain : parc du scénario FAP (S1)	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓↓	=↘	↓
	scénario Ambition Air en intra-A86 : - parc du scénario Technologies Alternatives - réduction du trafic (-25 % des voitures particulières, -20% des véhicules utilitaires légers et camions) compensé par +75% du trafic bus Diesel et électriques, +50% du trafic deux-roues (essence et électrique) hors intra-A86 : parc du scénario FAP (S1)	↓	↓	↓	↓	↓	↓↓	↓	↓	↓↓
Variation de l'émission moyenne annuelle du trafic en intra-A86 comparée au scénario FAP (t/an)**. =↘/↗ : équivalence ou diminution/augmentation faible : [0 % ; 2 %] ; ↓/↑ : diminution/augmentation modérée : [5 % ; 17 %] ; ↓↓/↑↑ : diminution/augmentation forte : [21 % ; 24 %]										

* PNC : concentration en nombre de particules

** Les intervalles présentés incluent les valeurs de variation de tous les polluants auxquels ils se rapportent. En d'autres termes, ces intervalles ne se rapportent pas à un polluant spécifiquement.

Tableau 62 : Synthèse de l'impact des scénarios sur les concentrations des polluants particulaires et gazeux

		PM _{2,5}	PM ₁₀ organiques	PM ₁₀ inorganiques	PNC*	BC	NO ₂	O ₃ en urbain	O ₃ hors urbain
scénarios prospectifs comparés au scénario de référence (2014)	scénario FAP (S1) généralisation du filtre à particules Diesel, quasi au fil de l'eau à 2025	↓	↓	↓	↓	↓↓	↓↓	↑	=↓
	scénario Essence (S2) décroissance de 60 % en 2014 à 5 % en 2025 des ventes de véhicules légers Diesel au profit des essence	↓	↓	↓	↓	↓↓	↓↓	↑	=↓
Variation de la concentration atmosphérique moyenne annuelle comparée au scénario de référence (µ/m ³)**									
<ul style="list-style-type: none"> PM_{2,5}, PM₁₀ organiques, PM₁₀ inorganiques et PNC : ↓ : diminution modérée : [3,3 % ; 6,2 %] (variation en France et en Île-de-France) BC et NO₂ : ↓↓ : diminution forte : [30 % ; 47 %] pour BC et [19 µg/m³ ; 25 µg/m³] pour NO₂ (variation maximale en Ile-de-France sur les mailles urbaines) O₃ : =↓ : équivalence ou diminution faible : [4 %] ; ↑ : augmentation modérée : [15 % ; 30 %] (variation maximale sur les mailles urbaines ou rurales en France et en Ile-de-France) 									
scénario Essence (S2) comparé au scénario FAP (S1)	scénario Essence (S2) (mécaniquement, renouvellement du parc accentué avec le scénario Essence (S2) par rapport au scénario FAP (S1) : 8 % vs 21 % de véhicules pré-Euro 5 dans le parc Ile-de-France)	=↓	=↓	=↓	=↓	↓	↓	=↗	=↓
Variation de la concentration atmosphérique moyenne annuelle comparée au scénario FAP (µ/m ³)**									
<ul style="list-style-type: none"> PM_{2,5}, PM₁₀ organiques, PM₁₀ inorganiques et PNC : =↓/↗ : équivalence ou diminution faible : [0,4 % ; 1,2 %] (variation en France et en Île-de-France) BC et NO₂ : ↓ : diminution modérée : [17 %] pour BC et [6 µg/m³] pour NO₂ (variation maximale en Ile-de-France sur les mailles urbaines) O₃ : =↓/↗ : équivalence ou diminution/augmentation faible : [0,3 % ; 5 %] (variation maximale sur les mailles urbaines ou rurales en France et en Ile-de-France) 									

* PNC : concentration en nombre de particules

** Les intervalles présentés incluent les valeurs de variation de tous les polluants auxquels ils se rapportent. En d'autres termes, ces intervalles ne se rapportent pas à un polluant spécifiquement. Pour les PM_{2,5}, PM₁₀ organiques, PM₁₀ inorganiques et PNC, il n'existe pas d'équivalence ou diminution faible (=↓/↗) ni de diminution/augmentation forte (↓↓/↑↑). Pour BC et NO₂, il n'existe pas d'équivalence ou diminution faible (=↓/↗) ni de diminution/augmentation modérée (↓/↑). Pour O₃, il n'existe pas de diminution/augmentation forte (↓↓/↑↑) ni modérée (↓/↑) pour la comparaison au scénario FAP.

9 Bibliographie

- Abdallah, C., K. Sartelet, and C. Afif. 2016. "Influence of boundary conditions and anthropogenic emission inventories on simulated O3 and PM2.5 concentrations over Lebanon." *Atmospheric Pollution Research* 7 (6):971-979. doi: 10.1016/j.apr.2016.06.001.
- ADEME. 2018. Etat des lieux sur les connaissances apportées par les études expérimentales des sources de particules fines en France – Projet SOURCES Etude de l'Institut national de l'environnement industriel et des risques et de l'Institut des Géosciences de l'Environnement, projet n°14 62 C 0044 co-financé par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie. 132 p.
https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/sources_particules-fines_2017_rapport.pdf.
- Afsset. 2009. Pollution par les particules dans l'air ambiant. Synthèse des éléments sanitaires en vue d'un appui à l'élaboration de seuils d'information et d'alerte du public pour les particules dans l'air ambiant. Avis et rapport de l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (devenue Anses) :
<https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2007et0006Ra.pdf>.
- Airparif. 2008. Caractérisation de la qualité de l'air à proximité des voies à grande circulation - premier volet : Campagne de mesure portant sur le Boulevard Périphérique au niveau de la Porte de Gentilly. https://www.airparif.asso.fr/pdf/publications/Rgentilly_volet1.pdf.
- Airparif. 2010. Caractérisation de la qualité de l'air à proximité des voies à grande circulation - deuxième volet : Modélisation de la pollution atmosphérique portant sur le Boulevard Périphérique au niveau de la Porte de Gentilly. https://www.airparif.asso.fr/pdf/publications/Rgentilly_volet2.pdf.
- Airparif. 2011. Évaluation des impacts du plan de déplacements urbains d'Île-de-France sur la qualité de l'air et les émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2020. Rapport Airparif, Paris, mai 2011. 88 pages.
- Airparif. 2012a. Caractérisation de la qualité de l'air à proximité des voies à grande circulation - troisième volet : Modélisation de la pollution atmosphérique à proximité des axes routiers les plus importants d'Île-de-France. 72 pages :
https://www.airparif.asso.fr/pdf/publications/prox-vgc-rapport_121205.pdf.
- Airparif. 2012b. Inventaire global des émissions en Île-de-France. Année de référence 2012 – éléments synthétiques. Edition Mai 2016.
- Airparif. 2012c. Projet d'expérimentation d'une zone d'actions prioritaires pour l'air - ZAPA. Rapport Airparif, Paris, novembre 2012. 153 pages.
- Amato, F., O. Favez, M. Pandolfi, A. Alastuey, X. Querol, S. Moukhtar, B. Bruge, S. Verlhac, J. A. G. Orza, N. Bonnaire, T. Le Priol, J. F. Petit, and J. Sciare. 2016. "Traffic induced particle resuspension in Paris: Emission factors and source contributions." *Atmospheric Environment* 129:114-124. doi: 10.1016/j.atmosenv.2016.01.022.
- Andre, Michel, Anne-Laure Roche, and Lauréline Bourcier. 2014. Statistiques de parcs et trafic pour le calcul des émissions de polluants des transports routiers en France. IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux.
- Anses. 2012. Sélection des polluants à prendre en compte dans les évaluations des risques sanitaires réalisées dans le cadre des études d'impact des infrastructures routières. Avis et rapport : <https://www.anses.fr/sites/default/files/files/AIR2010sa0283Ra.pdf>.
- Anses. 2017. Normes de qualité de l'air ambiant. Avis et rapport :
<https://www.anses.fr/en/system/files/AIR2016SA0092Ra.pdf>.
- Anses. 2019. Caractérisation des transferts de pollution de l'air extérieur vers l'air intérieur. Rapport en cours de publication.
- APUR. 2012. ZAPA - étude d'impact socio-économique - Rapport final. APUR, Paris, 141 pages.

- Aumont, B., S. Szopa, and S. Madronich. 2005. "Modelling the evolution of organic carbon during its gas-phase tropospheric oxidation: development of an explicit model based on a self generating approach." *Atmospheric Chemistry and Physics* 5 (9):2497-2517. doi: <https://doi.org/10.5194/acp-5-2497-2005>.
- Blondeau, P., V. Iordache, O. Poupard, D. Genin, and F. Allard. 2005. "Relationship between outdoor and indoor air quality in eight French schools." *Indoor Air* 15 (1):2-12. doi: 10.1111/j.1600-0668.2004.00263.x.
- Boothe, V. L., T. K. Boehmer, A. M. Wendel, and F. Y. Yip. 2014. "Residential traffic exposure and childhood leukemia: a systematic review and meta-analysis." *Am J Prev Med* 46 (4):413-22. doi: 10.1016/j.amepre.2013.11.004.
- Borm, Paul J. A., Frank Kelly, Nino Künzli, Roel P. F. Schins, and Kenneth Donaldson. 2007. "Oxidant generation by particulate matter: from biologically effective dose to a promising, novel metric." *Occupational and environmental medicine* 64 (2):73-74. doi: 10.1136/oem.2006.029090.
- Boylan, James W., and Armistead G. Russell. 2006. "PM and light extinction model performance metrics, goals, and criteria for three-dimensional air quality models." *Atmospheric Environment* 40 (26):4946-4959. doi: 10.1016/j.atmosenv.2005.09.087.
- Carlos-Wallace, F. M., L. Zhang, M. T. Smith, G. Rader, and C. Steinmaus. 2016. "Parental, In Utero, and Early-Life Exposure to Benzene and the Risk of Childhood Leukemia: A Meta-Analysis." *Am J Epidemiol* 183 (1):1-14. doi: 10.1093/aje/kwv120.
- Carteret, Marion, Michel Andre, and Anaïs Pasquier. 2015. Méthode d'estimation des parcs automobiles et de l'impact de mesures de restriction d'accès sur les émissions de polluants. IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux.
- CCFA. 2016. L'industrie automobile française. Analyse et statistiques 2016. Rapport du Comité des Constructeurs Français d'Automobiles : <https://ccfa.fr/wp-content/uploads/2018/05/brochure-analyse-statistiques-edition-2016-fr.pdf>.
- CCFA. 2017. L'industrie automobile française. Analyse et statistiques 2017. Rapport du Comité des Constructeurs Français d'Automobiles : https://ccfa.fr/wp-content/uploads/2018/01/Analyse_Statistiques_2017_FR.pdf
- CGDD. 2016. Bilan de la qualité de l'air extérieur en France en 2015. Rapport du Commissariat général au développement durable, 28 pages : http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Datalab/2016/datalab-bilan-de-la-qualite-de-l-air-en-france-en-2015-octobre-2016-c.pdf.
- CGDD. 2017. Bilan de la qualité de l'air extérieur en France en 2016. Rapport du Commissariat général au développement durable, 28 pages : http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Datalab/2017/Datalab-26-bilan-de-la-qualite-de-l-air-en-france-en-2016-oct2017.pdf.
- CGDD. 2018a. Bilan de la qualité de l'air extérieur en France en 2017. Rapport du Commissariat général au développement durable, 36 pages : http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Datalab/2018/datalab-45-bilan-qualite-air-exterieur-france-2017-octobre2018.pdf.
- CGDD. 2018b. La pollution de l'air par les particules (PM10 et PM2,5). Page Internet du Commissariat général au développement durable, mise à jour le 24 octobre 2018f : <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/227/0/pollution-lair-particules.html>.
- Chevalier, E., and G. Ooghe. 2012. Étude d'impact de la mise en place d'une Zone d'Action Prioritaire pour l'Air sur le trafic routier. DRIEA Île-de-France, Paris, 31 pages.
- CIRC. 2014. Diesel and Gasoline Engine Exhausts and Some Nitroarenes. Monographie n°105 du Centre international de recherche sur le cancer : <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol105/mono105.pdf>.
- CIRC. 2016. Outdoor Air Pollution. Monographie n°109 du Centre international de recherche sur le cancer : <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol109/mono109.pdf>.
- CITEPA/Ominea. 2016a.
- CITEPA/Ominea. 2016b.

- CITEPA/Ominea. 2018. Organisation et méthodes des inventaires nationaux des émissions atmosphériques en France. Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique.
- CITEPA/Secten. 2016. "Inventaire SECTEN (version 2016)." Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique. <https://www.citepa.org/fr/activites/inventaires-des-emissions/secten>.
- Commission d'enquête du Sénat. 2015. Commission d'enquête sur le coût économique et financier de la pollution de l'air. Tome I : Rapport : <http://www.senat.fr/rap/r14-610-1/r14-610-11.pdf>.
- Couvidat, F., Y. Kim, K. Sartelet, C. Seigneur, N. Marchand, and J. Sciare. 2013. "Modeling secondary organic aerosol in an urban area: application to Paris, France." *Atmospheric Chemistry and Physics* 13 (2):983-996. doi: <https://doi.org/10.5194/acp-13-983-2013>.
- Couvidat, Florian, Édouard Debry, Karine Sartelet, and Christian Seigneur. 2012. "A hydrophilic/hydrophobic organic (H₂O) aerosol model: Development, evaluation and sensitivity analysis." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 117 (D10). doi: 10.1029/2011JD017214.
- CSTB. 2001. Étude expérimentale des conditions de transfert de la pollution atmosphérique d'origine locale à l'intérieur des bâtiments d'habitation. Centre scientifique et technique du bâtiment.
- Diapouli, E., A. Chaloulakou, and N. Spyrellis. 2007. "Levels of ultrafine particles in different microenvironments — Implications to children exposure." *Science of The Total Environment* 388 (1):128-136. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.07.063>.
- EEA. 2013. EMEP/EEA air pollutant emission inventory, guidebook 2013. Technical guidance to prepare national emission inventories. EEA Technical report N° 12/2013 : <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-b-road-transport>, <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-b-road-transport-annex-hdv-files.zip>, <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-gasoline-evaporation> <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-b-road-tyre>.
- EEA. 2016. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016. Technical guidance to prepare national emission inventories. EEA Report, N° 21/2016 : <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2016>
- El Haddad, I., N. Marchand, J. Dron, B. Temime-Roussel, E. Quivet, H. Wortham, J. L. Jaffrezo, C. Baduel, D. Voisin, J. L. Besombes, and G. Gille. 2009. "Comprehensive primary particulate organic characterization of vehicular exhaust emissions in France." *Atmospheric Environment* 43 (39):6190-6198. doi: 10.1016/j.atmosenv.2009.09.001.
- Emmons, L. K., S. Walters, P. G. Hess, J. F. Lamarque, G. G. Pfister, D. Fillmore, C. Granier, A. Guenther, D. Kinnison, T. Laepple, J. Orlando, X. Tie, G. Tyndall, C. Wiedinmyer, S. L. Baughcum, and S. Kloster. 2010. "Description and evaluation of the Model for Ozone and Related chemical Tracers, version 4 (MOZART-4)." *Geoscientific Model Development* 3 (1):43-67. doi: <https://doi.org/10.5194/gmd-3-43-2010>.
- Fahey, K. M., and S. N. Pandis. 2003. "Size-resolved aqueous-phase atmospheric chemistry in a three-dimensional chemical transport model." *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)* 108:4690. doi: 10.1029/2003JD003564.
- Guenther, A., T. Karl, P. Harley, C. Wiedinmyer, P. I. Palmer, and C. Geron. 2006. "Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature)." *Atmospheric Chemistry and Physics* 6 (11):3181-3210. doi: <https://doi.org/10.5194/acp-6-3181-2006>.
- HEI. 2010. Traffic-Related Air Pollution: A Critical Review of the Literature on Emissions, Exposure, and Health Effects. Rapport spécial n°17 de l'Health Effects Institute : <https://www.healtheffects.org/system/files/SR17Traffic%20Review.pdf>.
- INSEE. 2011. Le nouveau zonage en aires urbaines de 2010. 95 % de la population vit sous l'influence des villes. Rapport Insee Première n°1374 de l'Institut national de la statistique et des études économiques : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1281191>.

- INSEE. 2014. Trente ans de démographie des territoires – Le rôle structurant du bassin parisien et des très grandes aires urbaines. Rapport Insee Première n°1483 de l'Institut national de la statistique et des études économiques : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1280958>.
- INSEE. 2017. Population légale de l'Île-de-France: 12082144 habitants au 1er janvier 2015. Rapport Insee Flash n°29 de l'Institut national de la statistique et des études économiques : https://www.epsilon.insee.fr/jspui/bitstream/1/68454/1/IF_IDF_29.pdf.
- InVS. 2012. Résumé des résultats du projet Aphekom 2008-2011. Des clefs pour mieux comprendre les impacts de la pollution atmosphérique urbaine sur la santé en Europe. Résumé de l'Institut de Veille Sanitaire : http://aphekom.org/c/document_library/get_file?uuid=4846eb19-df8a-486e-9393-1b7c7ac78ce3&groupId=10347.
- Jaeglé, L., P. K. Quinn, T. S. Bates, B. Alexander, and J. T. Lin. 2011. "Global distribution of sea salt aerosols: new constraints from in situ and remote sensing observations." *Atmospheric Chemistry and Physics* 11 (7):3137-3157. doi: <https://doi.org/10.5194/acp-11-3137-2011>.
- Jang, E., M. S. Alam, and R. M. Harrison. 2013. "Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban air using positive matrix factorization and spatial distribution analysis." *Atmospheric Environment* 79:271-285. doi: 10.1016/j.atmosenv.2013.06.056.
- Janitz, A. E., J. E. Campbell, S. Magzamen, A. Pate, J. A. Stoner, and J. D. Peck. 2016. "Traffic-related air pollution and childhood acute leukemia in Oklahoma." *Environ Res* 148:102-111. doi: 10.1016/j.envres.2016.03.036.
- Janssen, N. A., M. Strak, A. Yang, B. Hellack, F. J. Kelly, T. A. Kuhlbusch, R. M. Harrison, B. Brunekreef, F. R. Cassee, M. Steenhof, and G. Hoek. 2015. "Associations between three specific a-cellular measures of the oxidative potential of particulate matter and markers of acute airway and nasal inflammation in healthy volunteers." *Occup Environ Med* 72 (1):49-56. doi: 10.1136/oemed-2014-102303.
- Karagulian, Federico, Claudio A. Belis, Carlos Francisco C. Dora, Annette M. Prüss-Ustün, Sophie Bonjour, Heather Adair-Rohani, and Markus Amann. 2015. "Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level." *Atmospheric Environment* 120:475-483. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.087>.
- Keyte, Ian J., Alexandre Albinet, and Roy M. Harrison. 2016. "On-road traffic emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons and their oxy- and nitro- derivative compounds measured in road tunnel environments." *The Science of the Total Environment* 566-567:1131-1142. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.05.152.
- Kim, Y., K. Sartelet, and C. Seigneur. 2011. "Formation of secondary aerosols over Europe: Comparison of two gas-phase chemical mechanisms." *Atmospheric Chemistry and Physics* 11 (2):583-598. doi: 10.5194/acp-11-583-2011.
- Kim, Youngseob, Karine Sartelet, Jean-Christophe Raut, and Patrick Chazette. 2013. "Evaluation of the Weather Research and Forecast/Urban Model Over Greater Paris." *Boundary-Layer Meteorology* 149 (1):105-132. doi: 10.1007/s10546-013-9838-6.
- Kim, Youngseob, Karine Sartelet, Jean-Christophe Raut, and Patrick Chazette. 2015. "Influence of an urban canopy model and PBL schemes on vertical mixing for air quality modeling over Greater Paris." *Atmospheric Environment* 107:289-306. doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.02.011.
- Kim, Youngseob, Karine Sartelet, Christian Seigneur, Aurélie Charron, Jean-Luc Besombes, Jean-Luc Jaffrezo, Nicolas Marchand, and Lucie Polo. 2016. "Effect of measurement protocol on organic aerosol measurements of exhaust emissions from gasoline and diesel vehicles." *Atmospheric Environment* 140:176-187. doi: 10.1016/j.atmosenv.2016.05.045.
- LCSQA, and Ineris. 2013. Modélisation pour la recherche de sources expliquant l'épisode de pollution particulaire 2008/2009 en France avec le modèle de chimie-transport Chimere. Rapport du Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air DRC-13-136095-10757A : <https://www.lcsqa.org/rapport/2013/ineris/modelisation-recherche-sources-expliquant-episode-pollution-particulaire-20082009>.
- LCSQA, Ineris, and IGE. 2017a. Traitement harmonisé de jeux de données multi-sites pour l'étude de sources de PM par Positive Matrix Factorization (PMF). Synthèse du Laboratoire Central

de Surveillance de la Qualité de l'Air DRC-16-152341-07444A : <https://www.lcsqa.org/rapport/2016/ineris/traitement-harmonise-jeux-donnees-multi-sites-etude-sources-pm-positive-matrix-f>.

- LCSQA, Ineris, and IGE. 2017b. Programmes de recherche expérimentaux pour l'étude des sources de PM en air ambiant. Synthèse du Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air DRC-16-159637-12364A : <https://www.lcsqa.org/rapport/2016/ineris/programmes-recherche-experimentaux-etude-sources-pm-air-ambiant>.
- Li, C. K., and R. M. Kamens. 1993. "The use of polycyclic aromatic hydrocarbons as source signatures in receptor modeling." *Atmospheric Environment Part A, General Topics* 27 (4):523-532. doi: 10.1016/0960-1686(93)90209-H.
- Liu, B., Z. Xue, X. Zhu, and C. Jia. 2017. "Long-term trends (1990–2014), health risks, and sources of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the U.S." *Environmental Pollution* 220:1171-1179. doi: 10.1016/j.envpol.2016.11.018.
- Maher, Barbara A., Imad A. M. Ahmed, Brian Davison, Vassil Karloukovski, and Robert Clarke. 2013. "Impact of Roadside Tree Lines on Indoor Concentrations of Traffic-Derived Particulate Matter." *Environmental Science & Technology* 47 (23):13737-13744. doi: 10.1021/es404363m.
- Mallet, V., D. Quélo, B. Sportisse, M. Ahmed de Biasi, É. Debry, I. Korsakissok, L. Wu, Y. Roustan, K. Sartelet, M. Tombette, and H. Foudhil. 2007. "Technical Note: The air quality modeling system Polyphemus." *Atmospheric Chemistry and Physics* 7 (20):5479-5487. doi: <https://doi.org/10.5194/acp-7-5479-2007>.
- Marr, L. C., T. W. Kirchstetter, R. A. Harley, A. H. Miguel, S. V. Hering, and S. K. Hammond. 1999. "Characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons in motor vehicle fuels and exhaust emissions." *Environmental Science and Technology* 33 (18):3091-3099. doi: 10.1021/es981227l.
- Miguel, A. H., T. W. Kirchstetter, R. A. Harley, and S. V. Hering. 1998. "On-road emissions of particulate polycyclic aromatic hydrocarbons and black carbon from gasoline and diesel vehicles." *Environmental Science and Technology* 32 (4):450-455. doi: 10.1021/es970566w.
- Nenes, Athanasios, Spyros N. Pandis, and Christodoulos Pilinis. 1999. "Continued development and testing of a new thermodynamic aerosol module for urban and regional air quality models." *Atmospheric Environment* 33 (10):1553-1560. doi: 10.1016/S1352-2310(98)00352-5.
- Ntziachristos, L., Z. Samaras, C. Kouridis, D. Hassel, G. Mellios, I. McCrae, J. Hickman, K.H. Zierock, M. Keller, M. Rexeis, M. Andre, M. Winther, N. Pastramas, N. Gorissen, P. Boulter, P. Katsis, R. Joumard, R. Rijkeboer, S. Geivanidis, and S. Hausberger. 2013. Exhaust emissions from road transport. EMEP Guidebook 2014.
- Ntziachristos, Leonidas, Giannis Papadimitriou, Norbert Ligterink, and Stefan Hausberger. 2016. "Implications of diesel emissions control failures to emission factors and road transport NOx evolution." *Atmospheric Environment* 141:542-551. doi: 10.1016/j.atmosenv.2016.07.036.
- O'Driscoll, Rosalind, Helen M. ApSimon, Tim Oxley, Nick Molden, Marc E. J. Stettler, and Aravinth Thiyagarajah. 2016. "A Portable Emissions Measurement System (PEMS) study of NOx and primary NO2 emissions from Euro 6 diesel passenger cars and comparison with COPERT emission factors." *Atmospheric Environment* 145:81-91. doi: 10.1016/j.atmosenv.2016.09.021.
- OMS. 2006. Air Quality Guidelines Global Update 2005 - Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Rapport de l'Organisation Mondiale de la Santé Europe : http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf.
- OMS. 2013. Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP Project. Rapport de l'Organisation Mondiale de la Santé Europe : http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0004/193108/REVIHAAP-Final-technical-report-final-version.pdf?ua=1.
- ORS IdF. 2009. Pollution atmosphérique de proximité liée au trafic : expositions et effets sanitaires. Synthèse de l'Observatoire régional de santé d'Ile-de-France : http://www.ors-idf.org/dmdocuments/erpurs_synth_poll_prox.pdf.
- ORS IdF. 2012. Impacts sanitaires de la pollution atmosphérique urbaine et des expositions à proximité du trafic routier dans l'agglomération parisienne. Synthèse de l'Observatoire

- Paatero, P. 1999. "The Multilinear Engine—A Table-Driven, Least Squares Program for Solving Multilinear Problems, Including the n-Way Parallel Factor Analysis Model." *Journal of Computational and Graphical Statistics* 8 (4):854-888. doi: 10.1080/10618600.1999.10474853.
- Paatero, P., and U. Tapper. 1994. "Positive matrix factorization: A non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values." *Environmetrics* 5 (2):111-126. doi: 10.1002/env.3170050203.
- Polo Rehn, Lucie. 2013. "Caractérisation et impacts des émissions de polluants du transport routier : Apports méthodologiques et cas d'études en Rhône Alpes." phdthesis, Université de Grenoble, tel.archives-ouvertes.fr.
- Raaschou-Nielsen, O., M. Ketzel, A. Harbo Poulsen, and M. Sorensen. 2016. "Traffic-related air pollution and risk for leukaemia of an adult population." *Int J Cancer* 138 (5):1111-7. doi: 10.1002/ijc.29867.
- Real, E., and K. Sartelet. 2011. "Modeling of photolysis rates over Europe: impact on chemical gaseous species and aerosols." *Atmospheric Chemistry and Physics* 11 (4):1711-1727. doi: <https://doi.org/10.5194/acp-11-1711-2011>.
- Rogge, W. F., L. M. Hildemann, M. A. Mazurek, G. R. Cass, and B. R. T. Simoneit. 1993. "Sources of Fine Organic Aerosol. 2. Ncatalyst and Catalyst-Equipped Automobiles and Heavy-Duty Diesel Trucks." *Environmental Science and Technology* 27 (4):636-651. doi: 10.1021/es00041a007.
- Roustan, Yelva, Marie Pausader, and Christian Seigneur. 2011. "Estimating the effect of on-road vehicle emission controls on future air quality in Paris, France." *Atmospheric Environment* 45 (37):6828-6836. doi: 10.1016/j.atmosenv.2010.10.010.
- Royer, P., P. Chazette, K. Sartelet, Q. J. Zhang, M. Beekmann, and J. C. Raut. 2011. "Comparison of lidar-derived PM₁₀ with regional modeling and ground-based observations in the frame of MEGAPOLI experiment." *Atmospheric Chemistry and Physics* 11 (20):10705-10726. doi: <https://doi.org/10.5194/acp-11-10705-2011>.
- Russell, Armistead, and Robin Dennis. 2000. "NARSTO critical review of photochemical models and modeling." *Atmospheric Environment* 34 (12):2283-2324. doi: 10.1016/S1352-2310(99)00468-9.
- Sartelet, K. N., E. Debry, K. Fahey, Y. Roustan, M. Tombette, and B. Sportisse. 2007a. "Simulation of aerosols and gas-phase species over Europe with the Polyphemus system: Part I—Model-to-data comparison for 2001." *Atmospheric Environment* 41 (29):6116-6131. doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.04.024.
- Sartelet, Karine, Hiroshi Hayami, and Bruno Sportisse. 2007b. "Dominant aerosol processes during high-pollution episodes over Greater Tokyo." *Journal of Geophysical Research* 112 (D14). doi: 10.1029/2006JD007885.
- Sartelet, Karine N., Florian Couvidat, Christian Seigneur, and Yelva Roustan. 2012. "Impact of biogenic emissions on air quality over Europe and North America." *Atmospheric Environment* 53:131-141. doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.10.046.
- Schlesinger, R. B., N. Kunzli, G. M. Hidy, T. Gotschi, and M. Jerrett. 2006. "The health relevance of ambient particulate matter characteristics: coherence of toxicological and epidemiological inferences." *Inhalation Toxicology* 18 (2):95-125. doi: 10.1080/08958370500306016.
- Seinfeld, J.H., and S.N. Pandis. 1998. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change, 3rd Edition*: Wiley-interscience.
- Skamarock, C., B. Klemp, Jimy Dudhia, O. Gill, Dale Barker, G. Duda, Xiang-yu Huang, Wei Wang, and G. Powers. 2008. "A Description of the Advanced Research WRF Version 3." doi: 10.5065/D68S4MVH.
- Slama, R., V. Morgenstern, J. Cyrus, A. Zutavern, O. Herbarth, H. E. Wichmann, and J. Heinrich. 2007. "Traffic-related atmospheric pollutants levels during pregnancy and offspring's term birth weight: a study relying on a land-use regression exposure model." *Environ Health Perspect* 115 (9):1283-92. doi: 10.1289/ehp.10047.

- SpFrance. 2016a. Impacts de l'exposition chronique aux particules fines sur la mortalité en France continentale et analyse des gains en santé de plusieurs scénarios de réduction de la pollution atmosphérique. Rapport de Santé Publique France : http://opac.invs.sante.fr/doc_num.php?explnum_id=10431.
- SpFrance. 2016b. Quelle est la part des pics de pollution dans les effets à court terme de la pollution de l'air sur la santé dans les villes de France ? Synthèse de Santé Publique France : <http://invs.santepubliquefrance.fr/Publications-et-outils/Rapports-et-syntheses/Environnement-et-sante/2016/Quelle-est-la-part-des-pics-de-pollution-dans-les-effets-a-court-terme-de-la-pollution-de-l-air-sur-la-sante-dans-les-villes-de-France>.
- STIF. 2012. Rapport environnemental Plan de déplacements urbains d'Île-de-France. Projet arrêté par le Conseil régional d'Île-de-France par délibération du 16 février 2012. Rapport du Syndicat des Transports d'Île-de-France devenu IDFM (île de France mobilité), Paris, 210 pages.
- Strader, R., C. S. Gurciullo, S. N. Pandis, N. Kumar, and F. W. Lurmann. 1998. Development of gas-phase chemistry, secondary organic aerosol, and aqueous-phase chemistry modules for PM modeling. Final report. Sonoma Technology, Inc., Petaluma, CA (United States); Carnegie-Mellon Univ., Dept. of Chemical Engineering, Pittsburgh, PA (United States); Coordinating Research Council, Inc., Atlanta, GA (United States).
- Symanski, E., P. G. Tee Lewis, T. Y. Chen, W. Chan, D. Lai, and X. Ma. 2016. "Air toxics and early childhood acute lymphocytic leukemia in Texas, a population based case control study." *Environ Health* 15 (1):70. doi: 10.1186/s12940-016-0154-8.
- Terrenoire, E., B. Bessagnet, L. Rouïl, F. Tognet, G. Pirovano, L. Létinois, M. Beauchamp, A. Colette, P. Thunis, M. Amann, and L. Menut. 2015. "High-resolution air quality simulation over Europe with the chemistry transport model CHIMERE." *Geoscientific Model Development* 8 (1):21-42. doi: <https://doi.org/10.5194/gmd-8-21-2015>.
- Theloke, J., and R. Friedrich. 2007. "Compilation of a database on the composition of anthropogenic VOC emissions for atmospheric modeling in Europe." *Atmospheric Environment* 41 (19):4148-4160. doi: 10.1016/j.atmosenv.2006.12.026.
- US EPA. 2009. Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter. Final report de l'United States Environmental Protection Agency : <https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=216546>.
- Uzu, G., J. J. Sauvain, A. Baeza-Squiban, M. Riediker, M. S. Hohl, S. Val, K. Tack, S. Denys, P. Pradere, and C. Dumat. 2011. "In vitro assessment of the pulmonary toxicity and gastric availability of lead-rich particles from a lead recycling plant." *Environ Sci Technol* 45 (18):7888-95. doi: 10.1021/es200374c.
- Vestreng, V. 2003. Review and revision. Emission data reported to CLRTAP, EMEP/MS-CW Note 1/2003, Norw. Meteorol. Inst., Oslo.
- Wang, Y., K. N. Sartelet, M. Bocquet, and P. Chazette. 2014. "Modelling and assimilation of lidar signals over Greater Paris during the MEGAPOLI summer campaign." *Atmospheric Chemistry and Physics* 14 (7):3511-3532. doi: <https://doi.org/10.5194/acp-14-3511-2014>.
- Wild, Oliver, Xin Zhu, and Michael J. Prather. 2000. "Fast-J: Accurate Simulation of In- and Below-Cloud Photolysis in Tropospheric Chemical Models." *Journal of Atmospheric Chemistry* 37 (3):245-282. doi: 10.1023/A:1006415919030.
- Wilhelm, M., and B. Ritz. 2003. "Residential proximity to traffic and adverse birth outcomes in Los Angeles county, California, 1994-1996." *Environ Health Perspect* 111 (2):207-16. doi: 10.1289/ehp.5688.
- Yarwood, G., Rao, S., Yocke, M., Whitten, G. 2005. Updates to the carbon bond chemical mechanism: CB05 Final report to the US EPA.
- Yli-Tuomi, Tarja, Timo Lanki, Gerard Hoek, Bert Brunekreef, and Juha Pekkanen. 2008. "Determination of the sources of indoor PM2.5 in Amsterdam and Helsinki." *Environmental Science & Technology* 42 (12):4440-4446.
- Zhang, Y., K. Sartelet, S. Zhu, and W. Wang. 2013. "Application of WRF/Chem-MADRID and WRF/Polyphemus in Europe, Part II: Evaluation of chemical concentrations and sensitivity simulations." *Atmospheric chemistry and physics* 13 (2):6845-6875.

- Zhao, Yunliang, Ngoc T. Nguyen, Albert A. Presto, Christopher J. Hennigan, Andrew A. May, and Allen L. Robinson. 2015. "Intermediate Volatility Organic Compound Emissions from On-Road Diesel Vehicles: Chemical Composition, Emission Factors, and Estimated Secondary Organic Aerosol Production." *Environmental Science & Technology* 49 (19):11516-11526. doi: 10.1021/acs.est.5b02841.
- Zhao, Yunliang, Ngoc T. Nguyen, Albert A. Presto, Christopher J. Hennigan, Andrew A. May, and Allen L. Robinson. 2016. "Intermediate Volatility Organic Compound Emissions from On-Road Gasoline Vehicles and Small Off-Road Gasoline Engines." *Environmental Science & Technology* 50 (8):4554-4563. doi: 10.1021/acs.est.5b06247.
- Zhu, S., K. N. Sartelet, and C. Seigneur. 2015. "A size-composition resolved aerosol model for simulating the dynamics of externally mixed particles: SCRAM (v 1.0)." *Geoscientific Model Development* 8 (6):1595-1612. doi: <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1595-2015>.
- Zhu, Shupeng, Karine N. Sartelet, Robert M. Healy, and John C. Wenger. 2016a. "Simulation of particle diversity and mixing state over Greater Paris: a model-measurement inter-comparison." *Faraday Discussions* 189 (0):547-566. doi: 10.1039/C5FD00175G.
- Zhu, Shupeng, Karine Sartelet, Yang Zhang, and Athanasios Nenes. 2016b. "Three-dimensional modeling of the mixing state of particles over Greater Paris: 3-D MIXING STATE MODELING." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 121 (10):5930-5947. doi: 10.1002/2015jd024241.

ANNEXES

Annexe 1 : Lettre de saisine

2014 -SA- 0 1 5 6



COURRIER ARRIVE

0 1 JUL. 2014

DIRECTION GENERALE

MINISTERE DES AFFAIRES ET SOCIALES
ET DE LA SANTE

Direction générale de la santé

MINISTERE DE L'ECOLOGIE, DU
DEVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ENERGIE

Direction générale de la prévention des risques

Direction générale de l'énergie et du climat

Paris, le **30 JUIN 2014**

Le Directeur général de la santé

La Directrice générale de la prévention des
risques

Le Directeur général de l'énergie et du climat

à

**Monsieur le Directeur général
de l'Agence nationale de sécurité sanitaire
de l'alimentation, de l'environnement et du
travail (ANSES)**

27-31 avenue du Général Leclerc
94701 Maisons-Alfort cedex

Objet : Etat des connaissances sur les particules de l'air ambiant (composition chimique et émissions du trafic routier)

Les particules de l'air ambiant représentent un enjeu majeur de santé publique. De très nombreuses publications scientifiques montrent, de par le monde, que l'exposition à court et long terme aux particules de l'air est clairement associée à des effets délétères sur la santé. Durant ces deux dernières années, différentes études, revues et classements confirment l'impact sanitaire des particules, notamment :

- En 2012, les résultats du projet Aphekom¹ montrent que le dépassement de la valeur guide de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) pour les particules PM_{2,5}² (10 µg/m³ en moyenne annuelle) se traduit chaque année dans 25 grandes villes européennes (39 millions d'habitants) par :

- o 19000 décès prématurés, dont 2900 pour les 9 villes françaises concernées,
- o 31,5 milliards d'euros en dépense de santé et coûts associés.

- En juin 2012, le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC), instance spécialisée de l'OMS, a classé les effluents d'échappement des moteurs Diesel comme cancérigènes pour l'Homme (groupe 1) et les effluents d'échappement des moteurs essence comme possiblement cancérigènes pour l'Homme (groupe 2B). Et en octobre 2013, il a classé, la pollution de l'air extérieur dans son ensemble et les particules en suspension composant cette pollution comme agents cancérigènes pour l'Homme (groupe 1).

- En 2013, l'OMS-Europe dans sa revue de la littérature REVIHAAP (Review of evidence on health aspects of air pollution) met notamment en avant, pour les particules :

- o un lien de causalité renforcé entre l'exposition aux PM_{2,5} et mortalité cardiovasculaire et respiratoire,

.../...

¹ Cf. le site Internet : www.aphekom.org.

² Particules PM_{2,5} : particules en suspension de taille inférieure à 2,5 micromètres.

o des publications supplémentaires reliant l'exposition à long terme aux PM_{2,5} et l'athérosclérose, des issues indésirables de la grossesse et de maladies respiratoires chez l'enfant,

o des études émergentes sur l'altération de la fonction cognitive et le diabète,

o l'absence de seuil en deçà duquel les particules n'auraient pas d'effet,

Par ailleurs, plusieurs études récentes renforcent également la connaissance des impacts sanitaires potentiellement associés avec le fait de résider à proximité d'un axe à fort trafic routier (asthme, broncho-pneumopathies chroniques obstructive, etc.).

Selon l'inventaire national des émissions du CITEPA³, les émissions primaires de particules par le trafic routier sont principalement liées au parc de véhicules particuliers Diesel. Les véhicules Diesel constituent aujourd'hui environ 60% du parc français de véhicules légers et 72% des ventes en 2011 contre 50% des ventes en 2000. Si les inventaires font état, en France métropolitaine, d'une diminution globale des émissions de PM₁₀⁴ et de PM_{2,5} depuis le début des années 1990, celle-ci s'est cependant ralentie depuis une dizaine d'années. Les concentrations de particules (PM₁₀ et PM_{2,5}) dans l'air mesurées par les différentes stations de mesure françaises restent stables depuis le milieu des années 2000, notamment en raison des particules secondaires, la pollution transfrontalière, les conditions météorologiques, et supérieures aux valeurs guides recommandées par l'OMS, respectivement de 20 et 10 µg/m³ en moyenne annuelle pour les PM₁₀ et les PM_{2,5}. Enfin, la France, dont les seuils d'information et d'alerte fixés respectivement en 2010 à 50 et 80 µg/m³ de PM₁₀ en moyenne journalière, connaît chaque année plusieurs épisodes de pollution d'ampleur vis-à-vis des particules.

Des interrogations subsistent quant aux effets sanitaires potentiellement associés à la composition de l'aérosol particulaire dont l'évolution au cours des dernières années est vraisemblable, ainsi qu'aux enjeux sanitaires spécifiques associés, le cas échéant, aux particules diesel.

Face à ces constats, le ministère chargé de l'Ecologie (Direction générale de la prévention des risques, DGPR, et Direction générale de l'énergie et du climat, DGEC) et le ministère en charge de la Santé (Direction générale de la santé, DGS) sollicitent l'expertise de l'Anses afin de compléter, sur des volets précis, l'état de l'art actuel sur les enjeux sanitaires que représentent les particules en vue, le cas échéant, d'orienter au mieux le gestionnaire via des recommandations ciblées.

Il est ainsi demandé à l'Anses :

A) D'investiguer la problématique de la composition chimique des particules :

- en compilant les études/données existantes sur la composition des particules de l'air ambiant en France, en tenant compte si possible de la granulométrie et de leur évolution spatio-temporelle, via le recueil de l'ensemble des données auprès du Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA) et notamment au travers du dispositif CARA (CARActérisation des particules) et des différents documents de référentiel en la matière ;

- en mettant en perspective cette analyse avec les données toxicologiques et épidémiologiques en lien avec la composition chimique, la granulométrie des particules et son évolution.

Au regard des conclusions que l'agence sera amenée à formuler, il est attendu, le cas échéant, des recommandations ciblées qui permettraient de privilégier les mesures de réduction relatives aux sources d'émission, quelles qu'elles soient, afin de diminuer les conséquences sanitaires tant en situation d'exposition chronique que d'épisode de pollution.

.../...

³ Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique.

⁴ Particules PM₁₀ : particules en suspension de taille inférieure à 10 micromètres.

B) Concernant la source « trafic routier », à l'instar des travaux d'expertise de l'agence de 2009 sur les émissions de dioxyde d'azote par les motorisations Diesel, de conduire une expertise visant à :

- définir l'évolution rétrospective et prospective des émissions de particules selon le parc roulant français et des cycles se rapprochant d'usage réel en considérant différents scénarios ;
- d'identifier les impacts différenciés des technologies de dépollution sur les émissions de particules par la source « trafic ».

Ces éléments pourront être mis en regard avec les données d'émission disponibles concernant les autres sources de particules.

Pour ces deux axes, A et B, il est demandé à l'agence d'être particulièrement vigilante à la prise en compte de la formation de particules secondaires.

Enfin, il est demandé à l'Anses son avis quant à la transposition des conclusions émises en 2012 par le CIRC sur les effluents d'échappement des moteurs Diesel, aux émissions émises par les véhicules routiers à moteur Diesel circulant en France.

Nous vous remercions de bien vouloir nous indiquer, dans les meilleurs délais, les modalités de réponse à cette saisine dont le rendu final est attendu pour la fin du premier trimestre de 2016, avec un rendu intermédiaire pour la mi-2015.

Le Directeur général de la
santé

Pr. Benoît VALLET



La Directrice générale de la
prévention des risques

Patricia BLANC



Le Directeur général de
l'énergie et du climat

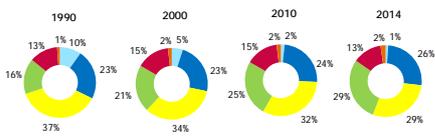
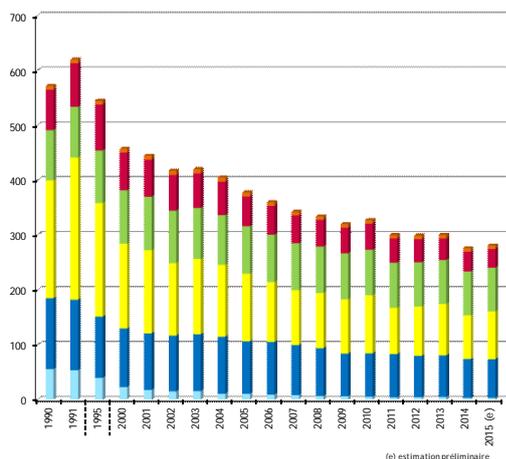
Laurent MICHEL



Annexe 2 : Évolution des émissions atmosphériques de PM10, HAP, COVNM, CO, Pb, Cu et NH3, par secteur en France métropolitaine de 1990 à 2014

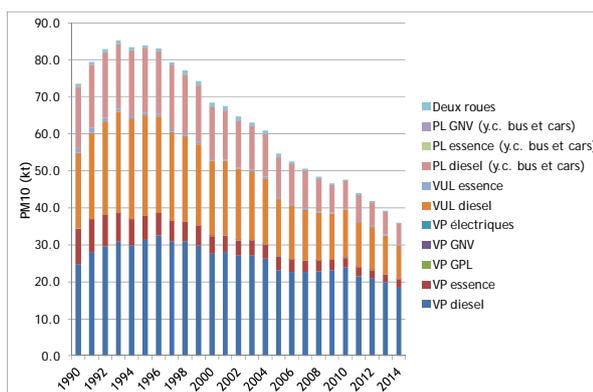
Les figures pour les polluants PM_{2,5}, carbone suie et NOx sont reproduites en section 3.2.2.2 du rapport.

PM₁₀ Emissions atmosphériques par secteur en France métropolitaine en kt

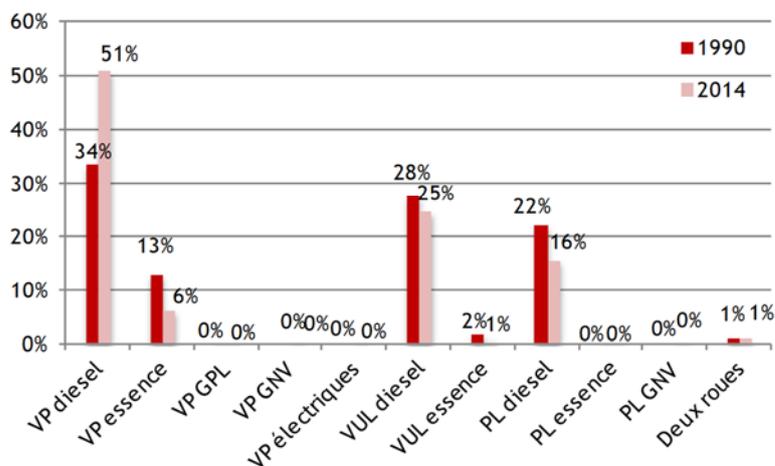


Source CITEPA / format SECTEN - avril 2016

Secten_riv_1_PM-digPM 10.xls

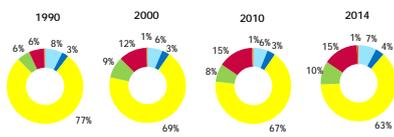
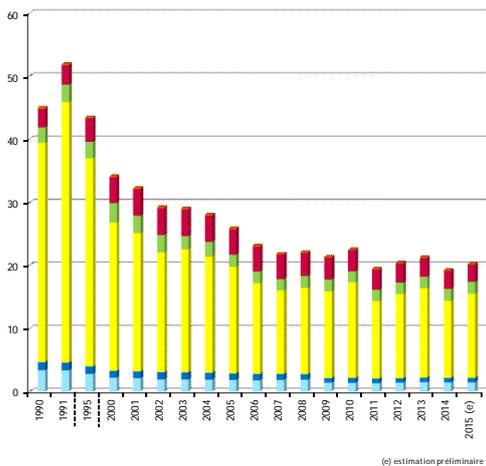


PM₁₀ Répartition du secteur du transport routier en %



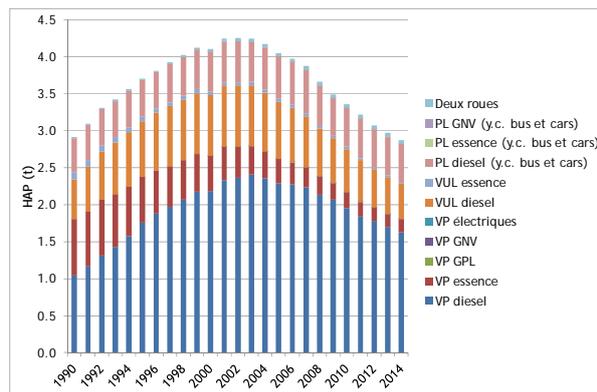
Émissions atmosphériques de PM₁₀ par secteur en France métropolitaine (haut gauche). Émissions du transport routier par type de véhicule/motorisation (haut droit). Répartition des émissions du transport routier en 1990 et 2014 (bas) (CITEPA/Secten 2016)

HAP Emissions atmosphériques par secteur en France métropolitaine

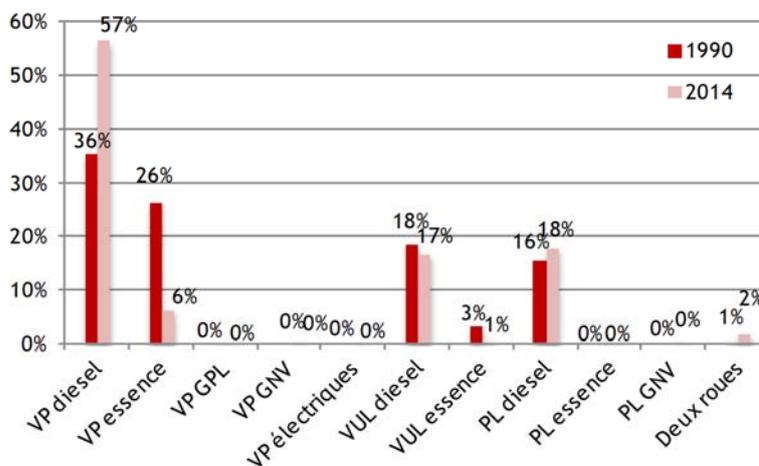


Source: CITEPA / Format SECTEN - avril 2016

secten_riv_LP-OP-digHAP.xls



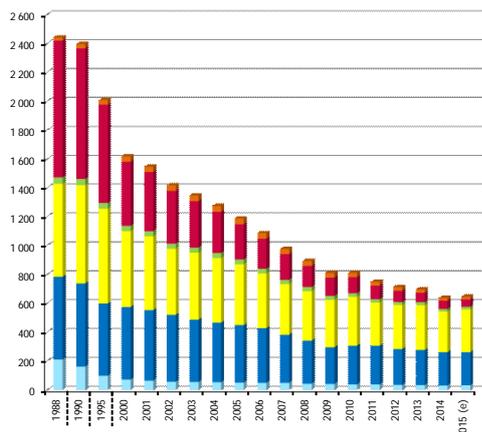
HAP Répartition du secteur du transport routier en %



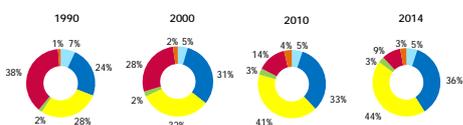
Émissions atmosphériques de HAP par secteur en France métropolitaine (haut gauche). Émissions du transport routier par type de véhicule/motorisation (haut droit). Répartition des émissions du transport routier en 1990 et 2014 (bas) (CITEPA/Secten 2016)

COVNM

Emissions atmosphériques par secteur en France métropolitaine en kt

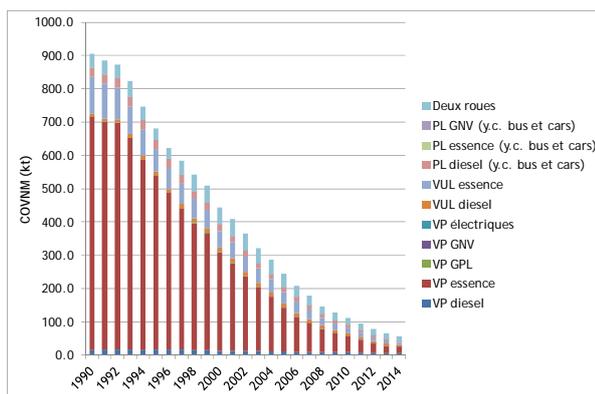


(e) estimation préliminaire



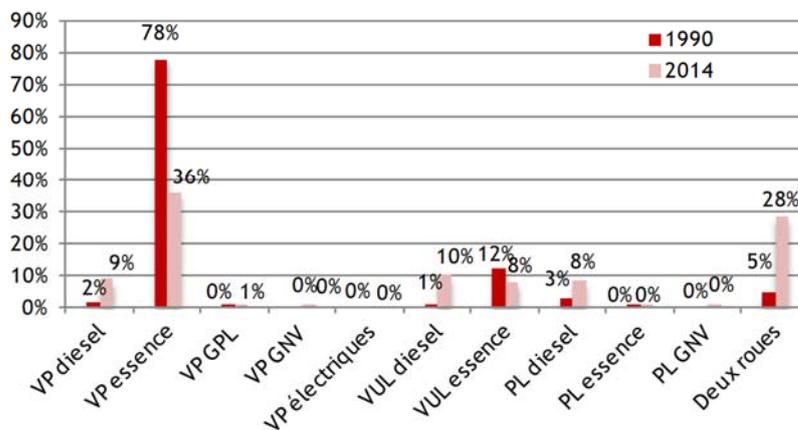
Source CITEPA / format SECTEN - avril 2016

Secten_niv_1_AEP-digCOVNM.xls



COVNM

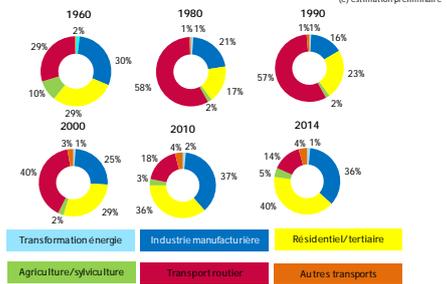
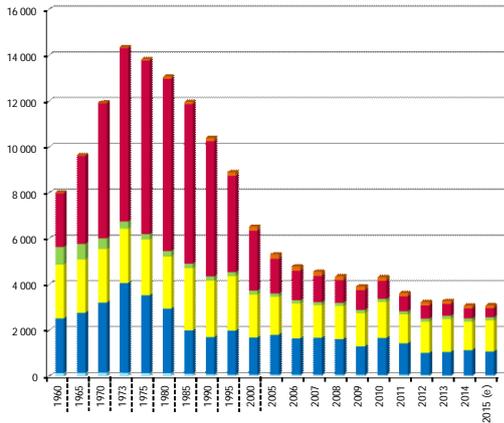
Répartition du secteur du transport routier en %



Émissions atmosphériques de COVNM par secteur en France métropolitaine (haut gauche). Émissions du transport routier par type de véhicule/motorisation (haut droit). Répartition des émissions du transport routier en 1990 et 2014 (bas) (CITEPA/Secten 2016)

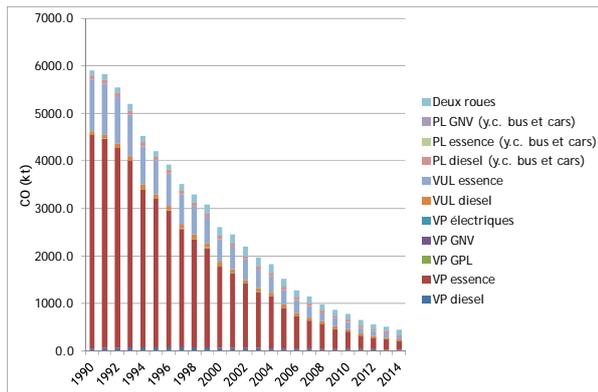
CO

Emissions atmosphériques par secteur en France métropolitaine en kt



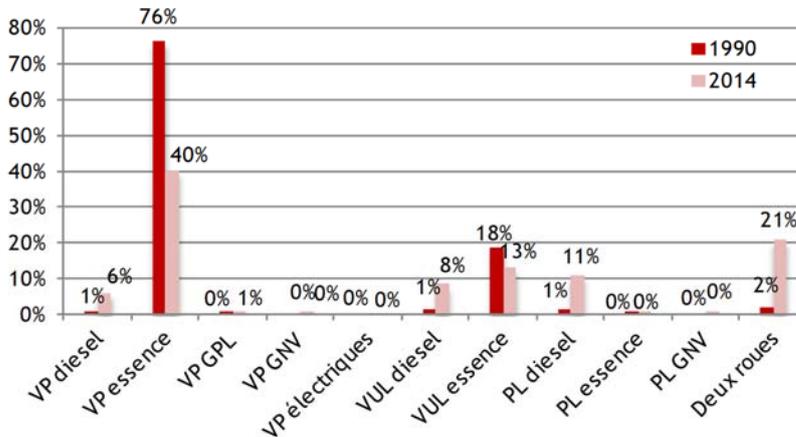
Source CITEPA / format SECTEN - avril 2016

Secten_riv_1_AEP-digCO.xls



CO

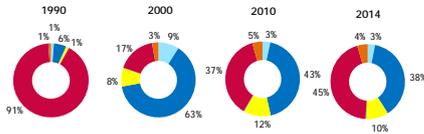
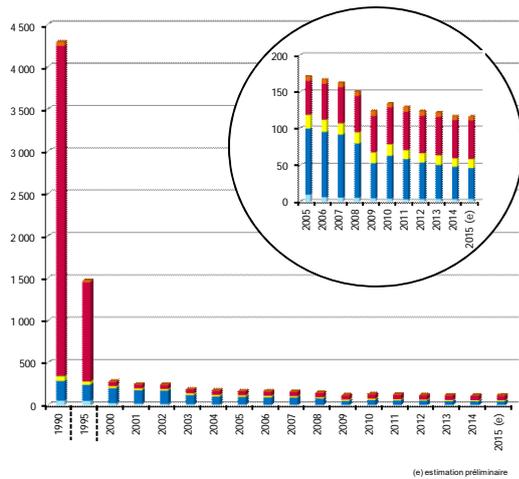
Répartition du secteur du transport routier en %



Émissions atmosphériques de CO par secteur en France métropolitaine (haut gauche). Émissions du transport routier par type de véhicule/motorisation (haut droit). Répartition des émissions du transport routier en 1990 et 2014 (bas) (CITEPA/Secten 2016)

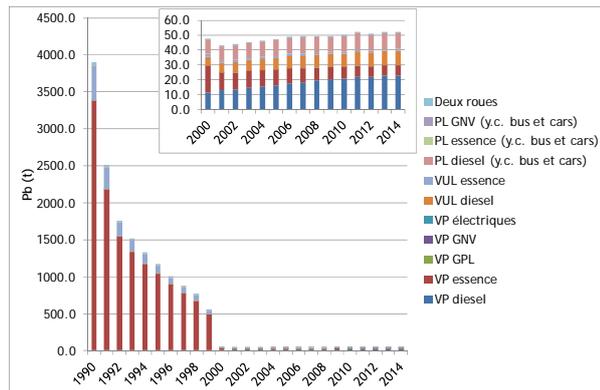
Pb

Emissions atmosphériques par secteur en France métropolitaine en t



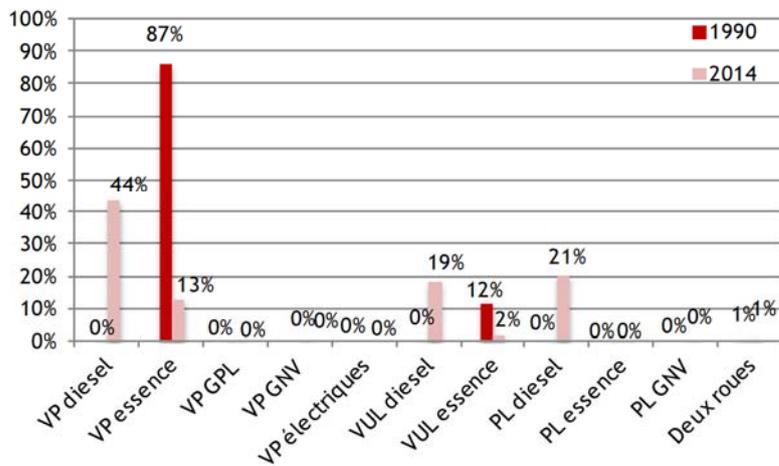
Source CITEPA / format SECTEN - avril 2016

Secten_niv_1_ML-d/Pb.xls



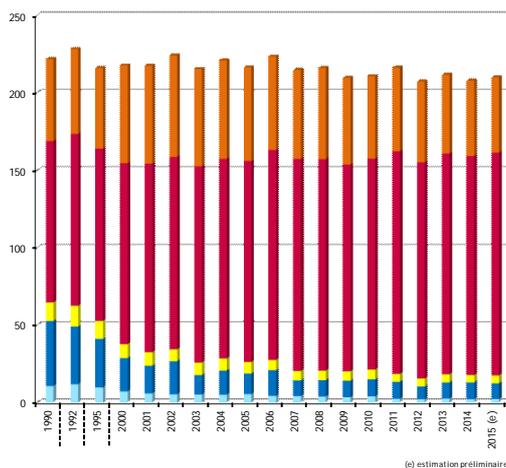
Pb

Répartition du secteur du transport routier en %

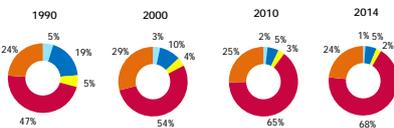


Émissions atmosphériques de Pb par secteur en France métropolitaine (haut gauche). Émissions du transport routier par type de véhicule/motorisation (haut droit). Répartition des émissions du transport routier en 1990 et 2014 (bas) (CITEPA/Secten 2016)

Cu Emissions atmosphériques par secteur en France métropolitaine en t



(e) estimation préliminaire

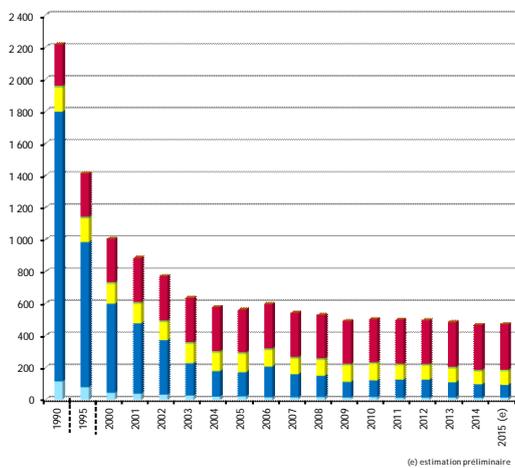


Source CITEPA / format SECTEN - avril 2016

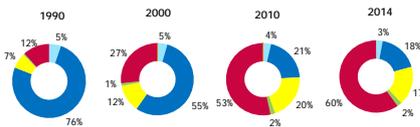
Secten_riv_1_ML-dCu.xls

Émissions atmosphériques de Cu par secteur en France métropolitaine (CITEPA/Secten 2016)

Zn Emissions atmosphériques par secteur en France métropolitaine en t



(e) estimation préliminaire



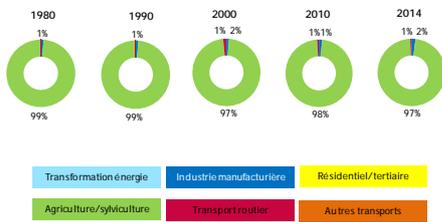
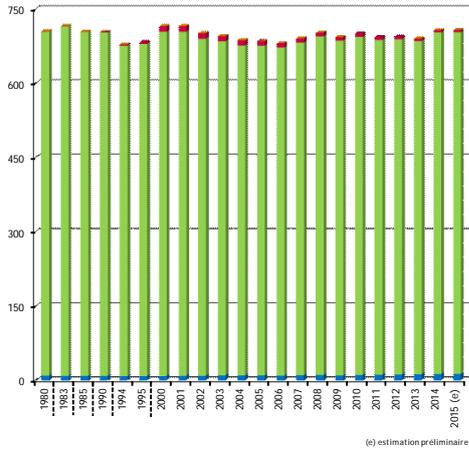
Source CITEPA / format SECTEN - avril 2016

Secten_riv_1_ML-dZn.xls

Émissions atmosphériques de Zn par secteur en France métropolitaine (CITEPA/Secten 2016)

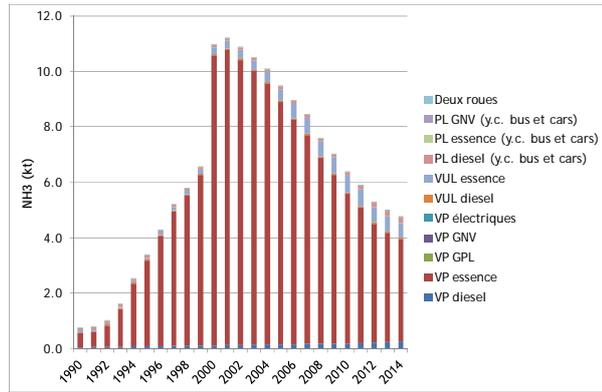
NH₃

Emissions atmosphériques par secteur en France métropolitaine en kt



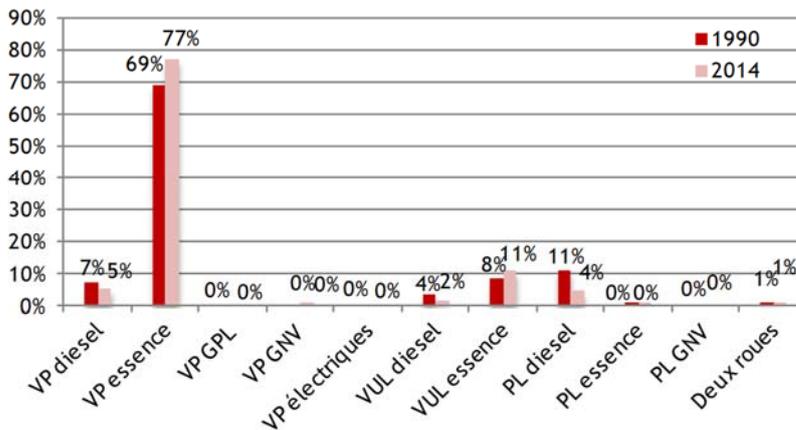
Source CITEPA / format SECTEN - avril 2016

Secten_riv_1_AEP-dlgNH3.xls



NH₃

Répartition du secteur du transport routier en %



Émissions atmosphériques de NH₃ par secteur en France métropolitaine (haut gauche). Émissions du transport routier par type de véhicule/motorisation (haut droit). Répartition des émissions du transport routier en 1990 et 2014 (bas) (CITEPA/Secten 2016)

Annexe 3 : Principes détaillés de construction des compositions de parc automobile

Cette Annexe explicite comment sont déterminées les compositions de parc automobile par catégories détaillées.

Données initiales de composition des parcs

Les données initiales sont celles décrivant la composition des parcs en circulation en Île-de-France et en France, pour l'année 2014. Ces données consistent en la déclinaison du volume de trafic (% des véhicules x km), au sein d'une famille de véhicules et selon différents paramètres technologiques et réglementaires.

Les familles de véhicules sont : les voitures particulières (PC ou VP), les véhicules utilitaires légers (LCV ou VUL), les camions (HGV, PL), les véhicules de transports en commun (Bus/Coach, autobus-autocars), les deux-roues motorisés (2-W, 2R).

Les paramètres de déclinaison du parc automobile au sein d'une famille de véhicules sont les suivants :

- les « technologies / carburants » (essence, Diesel, hybrides, électriques, gaz, etc.), auxquelles peuvent être adjoints des équipements éventuels de dépollution (FAP, SCR, EGR, etc.) ;
- la « taille » des véhicules ou des moteurs : classes de cylindrées moteur pour les véhicules légers, classes de PTAC poids total pour les véhicules lourds ;
- la classe de réglementation « émissions de polluants » (de pre-Euro puis Euro 1 à 6).

Par ailleurs, les compositions de parc sont déclinées selon les « milieux » : « urbain » ; « rural » ; « autoroute », auquel s'ajoute le « périphérique parisien » pour l'Île-de-France.

La donnée de base d'une composition de parc s'exprime donc sous la forme $X_{iTechno,iEURO,iinitial}$, qui donne la proportion dans le trafic, au sein d'une famille de véhicules, de la technologie iTechno et la catégorie réglementaire iEuro (ici pour le scénario initial ou de référence).

Principes détaillés de construction des compositions de parc

Un renouvellement progressif du parc est simulé, sous contraintes d'hypothèses sur les nouvelles immatriculations favorisant le scénario choisi, et avec vieillissement / extinction des technologies « abandonnées ». Ce renouvellement est réalisé à partir du modèle de parc automobile français de l'IFSTTAR (simulations des années 1980-2030), qui permet de simuler différentes conditions. Les évolutions sont ensuite appliquées aux compositions de référence.

Le modèle permet de maintenir les catégories de véhicules non concernées par le scénario à leur niveau de 2014. De même, il peut préserver les équilibres entre les familles de véhicules, par classe de taille (pas d'évolution des tailles de camions, des cylindrées des véhicules...), etc. Ainsi, les seules évolutions souhaitées dans le cadre du scénario sont réalisées.

Explicitation des transformations de compositions de parc

- Dans le cas général, deux transformations sont observées au sein d'une famille de véhicules :
 - o une évolution du poids de la catégorie « technologique » dans l'ensemble des technologies
 - o une évolution du poids de la catégorie « réglementaire ».

- Les incréments (en % absolus) d'une catégorie technologique ou réglementaire Euro sont tirés des simulations 2014-2025 du parc IFSTTAR, sous différentes hypothèses d'évolution des immatriculations. Ils sont ensuite appliqués à la composition initiale du parc Île-de-France (ou du parc CITEPA pour le calcul des émissions nationales de polluants).

- o Ainsi le poids % de la catégorie technologique (essence, Diesel, etc.) évolue comme suit :

$$P_{i\text{Techno},\text{Scénario}} = P_{i\text{Techno},\text{initiale}} + \text{Incrément}_{i\text{Techno}}$$

- o Et le poids % de la catégorie réglementaire :

$$D_{i\text{Techno},i\text{EURO},\text{Scénario}} = D_{i\text{Techno},i\text{EURO},\text{initiale}} + \text{Incrément}_{i\text{Techno},i\text{EURO}}$$

- De fait, la donnée de composition du parc d'un scénario s'exprime par deux composantes : un incrément dans la catégorie technologique (essence, Diesel, etc.), un incrément dans la distribution Euro, au prorata de ce que représente la technologie dans la composition initiale et dans le scénario.
- Par ailleurs, une catégorie Euro couvre plusieurs sous-catégories (exemple pre-Euro se décline en ECE15-00 à -04, Euro 3 et 4 incluent avec et sans FAP, Euro 6 prévoit Euro 6c) mais aussi plusieurs catégories de taille (cylindrée du moteur, PTAC) sans qu'il soit possible de disposer de statistiques précises pour chacune de ces sous-catégories. Dans ce cas, il est fait l'hypothèse d'une répartition équivalente de l'incrément entre les différentes sous-catégories, dont le nombre N_{cas} est calculé.
- *In fine*, la donnée de composition du parc d'un scénario s'exprime schématiquement comme suit :

$$X_{i\text{Tech},i\text{EURO},\text{Scénario}} = \left(X_{i\text{Tech},i\text{EURO},\text{initial}} \times \frac{P_{i\text{Tech},\text{initial}} + \text{Incr}_{i\text{Tech}}}{P_{i\text{Tech},\text{initial}}} \right) + \left(\frac{\text{Incr}_{i\text{Tech},i\text{EURO}}}{N_{\text{cas},i\text{Tech},i\text{EURO}}} \times \frac{P_{i\text{Tech},\text{initial}} + \text{Incr}_{i\text{Tech}}}{100} \right)$$

- Enfin, les catégories Euro antérieures à 2014 ne peuvent que régresser dans les transformations (puisqu'elles ne sont plus vendues). Un test interdisant l'augmentation de ces catégories (jusqu'à Euro 4) est donc appliqué.
- Compte tenu des diverses approximations lors des étapes de transposition, un ajustement des distributions à 100 % est nécessaire pour finaliser les compositions de parcs.
- Certaines des transformations peuvent se traduire par des petites incohérences (par exemple disparition d'une catégorie Euro tandis qu'une catégorie plus ancienne persisterait). Ces incohérences concernent cependant des catégories dont les poids étaient très faibles dans la situation initiale, et qui globalement ne représentent que de faibles proportions de véhicules. De plus ces incohérences s'appliquent de manière similaire dans les différents scénarios et compositions de parc (Île-de-France, national). Elles sont sans conséquence sur les estimations.

Annexe 4 : Compositions détaillées du parc automobile en Île-de-France (situation de référence)

Les compositions du parc Île-de-France selon les réseaux (urbain, rural, autoroute et périphérique) et dans la situation de référence seulement sont détaillées ci-après. Elles résultent de calculs directs sur les compositions de parc.

Scénario de référence

Véhicules particuliers			Compositions (en %)			
VEH_FUEL	Fuel	Cat_Euro	URBAIN	RURAL	AUTOROUTE	PERIPHERIQUE
a-Voitures	Diesel	a-Pre-Euro	0,32	0,67	0,60	0,37
		Euro-1	1,24	2,33	2,41	1,20
		Euro-2	2,99	5,66	5,65	3,23
		Euro-3	9,86	16,49	16,30	11,35
		Euro-4	19,09	17,56	19,31	17,95
		Euro-5	29,78	20,04	27,08	29,38
		Euro-6	1,17	0,00	0,00	0,00
Somme a-Voitures-Diesel			64,45	62,75	71,35	63,48
b-Voitures	Essence	a-Pre-Euro	1,02	1,16	1,00	0,68
		Euro-1	1,70	2,90	1,93	1,81
		Euro-2	4,08	6,91	4,78	4,72
		Euro-3	5,90	9,00	7,06	8,74
		Euro-4	8,18	6,90	5,65	8,49
		Euro-5	9,04	6,63	5,65	8,66
		Euro-6	0,85	0,00	0,00	0,00
Somme b-Voitures-Essence			30,77	33,50	26,08	33,09
Voitures	Électriques		0,85	0,61	0,00	0,57
Voitures-	Autres		3,93	3,15	2,58	2,86
Total			100,00	100,00	100,00	100,00

Véhicules utilitaires légers			Compositions (en %)			
VEH_FUEL	Fuel	Cat_Euro	URBAIN	RURAL	AUTOROUTE	PERIPHERIQUE
a-Véh. Util. légers	Diesel	a-Pre-Euro	1,61	0,00	0,00	0,00
		Euro-1	2,04	5,27	4,53	3,15
		Euro-2	4,97	5,85	5,15	3,89
		Euro-3	16,38	19,84	18,09	15,53
		Euro-4	40,39	61,32	64,57	69,15
		Euro-5	32,18	5,54	6,08	6,75
		Euro-6	0,00	0,00	0,00	0,00
Somme a-Véh. Util. légers-Diesel			97,56	97,82	98,42	98,47
b-Véh. Util. légers	Essence	a-Pre-Euro	0,50	0,00	0,00	0,00
		Euro-1	0,08	0,60	0,42	0,38
		Euro-2	0,20	0,30	0,16	0,19
		Euro-3	0,25	0,44	0,24	0,32
		Euro-4	0,38	0,78	0,58	0,60
		Euro-5	0,33	0,06	0,03	0,04
		Euro-6	0,00	0,00	0,00	0,00
Somme b-Véh. Util. légers-Essence			1,74	2,18	1,43	1,53
Véh. Util. légers	Électriques		0,28	0,00	0,06	0,00
Véh. Util. légers	Autres		0,43	0,00	0,10	0,00
Total			100,00	100,00	100,00	100,00

Scénario de référence (suite)

Autobus - Autocars			Compositions (en %)			
VEH_FUEL	Catégorie	Énergie	URBAIN	RURAL	AUTOROUTE	PERIPHERIQUE
BUS	Standard	Diesel	45,18	14,54	0,00	0,00
	Articulés		4,66	1,50	0,00	0,00
	Midibus		8,01	2,58	0,00	0,00
	Autres	Électriques	0,00	0,00	0,00	0,00
		GNC	1,06	0,34	0,00	0,00
		Diesel	0,00	0,00	0,00	0,00
Somme BUS-Autres				0,34	0,00	0,00
Somme BUS			58,91	18,96	0,00	0,00
Autocars	Standard (Diesel)			33,32	41,11	41,11
	Articulés ou 3 essieux (Diesel)		24,20	47,72	58,89	58,89
Somme Autocars			41,09	81,04	100,00	100,00
Total			100,00	100,00	100,00	100,00

Autobus - Autocars			Compositions (en %)				
VEH_FUEL	Fuel	Cat_Euro	URBAIN	RURAL	AUTOROUTE	PERIPHERIQUE	
BUS	Électriques		0,00	0,00	0,00	0,00	
		CNG	Euro-II	0,04	0,01	0,00	0,00
			Euro-III	0,27	0,09	0,00	0,00
			Euro-IV	0,15	0,05	0,00	0,00
			Euro-V	0,53	0,17	0,00	0,00
			Euro-VI	0,07	0,02	0,00	0,00
	Diesel	Euro-0	0,07	0,02	0,00	0,00	
		Euro-I	0,07	0,02	0,00	0,00	
		Euro-II	7,25	2,33	0,00	0,00	
		Euro-III	13,00	4,18	0,00	0,00	
		Euro-IV	6,23	2,01	0,00	0,00	
		Euro-V	26,79	8,62	0,00	0,00	
		Euro-VI	4,45	1,43	0,00	0,00	
		Somme BUS			58,91	18,96	0,00
Autocars	Diesel	Euro-0	0,45	0,88	1,08	1,08	
		Euro-I	1,10	2,17	2,67	2,67	
		Euro-II	4,49	8,85	10,92	10,92	
		Euro-III	8,57	16,91	20,87	20,87	
		Euro-IV	9,21	18,16	22,41	22,41	
		Euro-V	13,96	27,54	33,98	33,98	
		Euro-VI	3,31	6,54	8,07	8,07	
Somme Autocars			41,09	81,04	100,00	100,00	
Total			100,00	100,00	100,00	100,00	

Scénario de référence (suite)

Camions			Compositions (en %)				
VEH_FUEL	Fuel	Cat_Euro	URBAIN	RURAL	AUTOROUTE	PERIPHERIQUE	
Cam. articulés	Diesel	Euro-0	0,18	0,00	0,05	0,03	
		Euro-I	0,00	0,04	0,03	0,00	
		Euro-II	0,53	0,44	0,50	0,02	
		Euro-III	0,93	1,81	1,74	0,29	
		Euro-IV	1,74	2,94	2,92	0,58	
		Euro-V	4,34	6,36	6,36	0,78	
		Euro-VI	1,16	1,68	1,70	0,26	
Somme Camions articulés			8,86	13,27	13,27	1,96	
Cam. rigides	Électriques		0,51	0,00	0,12	0,00	
		CNG	Euro-III	0,76	0,00	0,17	0,00
			Euro-IV	2,78	0,00	0,64	0,00
			Euro-V	1,52	0,00	0,35	0,00
			Euro-VI	0,00	0,00	0,00	0,00
	Diesel	a-Pre-Euro-III	10,32	12,78	11,65	12,95	
		Euro-III	24,30	18,48	19,49	22,74	
		Euro-IV	17,39	20,65	19,81	23,59	
		Euro-V	28,96	29,54	29,37	33,04	
		Euro-VI	4,62	5,28	5,13	5,72	
Essence	NC	0,00	0,00	0,00	0,00		
Somme Camions rigides			91,14	86,73	86,73	98,05	
Total			100,00	100,00	100,00	100,00	

Deux-Roues motorisés			Compositions (en %)			
VEH_FUEL	Fuel	Cat_Euro	URBAIN	RURAL	AUTOROUTE	PERIPHERIQUE
Motos - 2-temps	Essence	a-Pre-Euro	1,69	3,20	2,74	3,77
		Euro-1	3,94	2,86	3,02	3,37
		Euro-2	7,18	4,58	4,71	6,53
		Euro-3	0,68	14,64	14,61	21,87
		Euro-4	0,00	0,23	0,22	0,31
		Euro-5	0,00	0,00	0,00	0,00
		Euro-6	0,00	0,00	0,00	0,00
Somme Motos - 2-temps			13,49	25,50	25,31	35,86
Motos - 4-temps	Essence	a-Pre-Euro	4,35	9,35	10,61	8,76
		Euro-1	3,51	5,29	7,71	8,59
		Euro-2	16,18	8,22	9,82	10,54
		Euro-3	60,46	44,42	45,85	35,61
		Euro-4	0,00	0,64	0,71	0,64
		Euro-5	0,00	0,00	0,00	0,00
Somme Motos - 4-temps			84,50	67,92	74,69	64,14
Cyclomoteurs	Essence	a-Pre-Euro	0,03	0,10	0,00	0,00
		Euro-1	0,00	0,18	0,00	0,00
		Euro-2	1,69	5,03	0,00	0,00
		Euro-3	0,30	1,28	0,00	0,00
		Euro-4	0,00	0,00	0,00	0,00
Somme Cyclomoteurs			2,01	6,59	0,00	0,00
Autres deux-roues motorisés			0,00	0,00	0,00	0,00
Total			100,00	100,00	100,00	100,00

Annexe 5 : Compositions du parc automobile en Île-de-France selon les scénarios

Les compositions de parc globales à l'échelle de l'Île-de-France sont ici détaillées et comparées selon les scénarios. Leur détermination résulte de la pondération de la circulation sur chacun des réseaux, par calculs indirects à partir des résultats des simulations d'émissions. Elles sont en conséquence un peu moins détaillées qu'en Annexe 4, mais leur structure est identique à celles de facteurs d'émission donnés en Annexe 6 et Annexe 7.

Compositions de parc Île-de-France selon les scénarios - Véhicules particuliers

Véhicules particuliers		Compositions de parc Île-de-France (en %) selon les scénarios :				
		RÉFÉRENCE	Scénario FAP	Scénario Essence	Techno_altern. (électriques)	Scénario Ambition Air
Diesel	Cat_Euro					
	Pre-Euro-2	6,8%	1,8%	0,7%	1,8%	1,9%
	Euro-3	13,5%	6,8%	2,6%	5,6%	6,4%
	Euro-4	12,4%	2,9%	1,1%	2,0%	2,6%
	Euro-4-FAP	6,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Euro-5	26,9%	14,2%	13,5%	10,4%	12,9%
	Euro-6	0,5%	20,5%	7,8%	14,9%	18,7%
	Euro-6c	0,0%	20,0%	7,6%	14,7%	18,4%
Tous	66,5%	66,1%	33,3%	49,4%	60,9%	
Essence	Pre-Euro-2	7,9%	2,5%	0,4%	2,1%	2,4%
	Euro-3	7,1%	3,6%	0,7%	3,0%	3,4%
	Euro-4	7,1%	0,7%	0,0%	0,1%	0,5%
	Euro-5	7,4%	2,2%	16,3%	4,0%	2,7%
	Euro-6	0,3%	10,5%	22,3%	13,1%	11,3%
	Euro-6c	0,0%	10,2%	21,3%	12,6%	10,9%
	Tous	29,8%	29,6%	61,1%	34,9%	31,2%
GPL	Pre-Euro-2	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
	Euro-3	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
	Euro-4	0,2%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
	Euro-5	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Euro-6	0,0%	0,3%	0,3%	0,2%	0,3%
	Euro-6c	0,0%	0,3%	0,3%	0,2%	0,3%
	Tous	0,5%	0,9%	0,8%	0,7%	0,8%
Hybrides Diesel	- Euro-4	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Euro-5	0,6%	0,0%	0,2%	0,0%	0,0%
	Euro-6	0,0%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%
	Euro-6c	0,0%	0,5%	0,4%	0,5%	0,5%
Tous	0,6%	1,0%	1,1%	1,0%	1,0%	
Hybrides Essence	- Euro-2	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Euro-3	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Euro-4	0,4%	0,2%	0,1%	0,1%	0,2%
	Euro-5	1,6%	0,7%	1,8%	0,7%	0,7%
	Euro-6	0,1%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%
	Euro-6c	0,0%	0,5%	0,4%	0,5%	0,5%
Tous	2,2%	1,9%	3,0%	1,9%	1,9%	
Électrique		0,5%	0,4%	0,7%	12,1%	4,1%
Total		100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Compositions de parc Île-de-France selon les scénarios - Véhicules utilitaires légers

Véhicules utilitaires légers		Compositions de parc Île-de-France (en %) selon les scénarios :				
	Cat_Euro	RÉFÉRENCE	Scénario FAP	Scénario Essence	Techno_altern. (électriques)	Scénario Ambition Air
Diesel	Pre-Euro-2	9,6%	2,3%	1,6%	2,2%	2,3%
	Euro-3	17,9%	1,3%	0,9%	1,3%	1,3%
	Euro-4	57,5%	26,0%	17,7%	24,0%	24,9%
	Euro-5	13,2%	2,5%	17,0%	3,3%	2,9%
	Euro-6	0,0%	32,9%	22,4%	30,0%	32,0%
	Euro-6c	0,0%	32,9%	22,4%	30,0%	32,0%
	Tous	98,1%	97,9%	81,9%	90,7%	95,5%
Essence	Pre-Euro-2	0,7%	0,3%	0,0%	0,2%	0,3%
	Euro-3	0,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Euro-4	0,6%	0,2%	0,0%	0,1%	0,2%
	Euro-5	0,1%	0,1%	2,6%	0,4%	0,2%
	Euro-6	0,0%	0,6%	7,5%	1,6%	0,9%
	Euro-6c	0,0%	0,6%	7,5%	1,6%	0,9%
	Tous	1,7%	1,8%	17,7%	3,9%	2,5%
Hybrides - Essence	Euro-3	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
	Euro-4	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Euro-5					
	Euro-6	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,1%
	Euro-6c	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,1%
Tous	0,1%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	
Électrique		0,1%	0,1%	0,2%	5,2%	1,8%
Total		100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Compositions de parc Île-de-France selon les scénarios - Camions

Camions (toutes catégories)		Compositions de parc Île-de-France (en %) selon les scénarios :				
	Cat_Euro	RÉFÉRENCE	Scénario FAP	Scénario Essence	Techno_altern. (électriques)	Scénario Ambition Air
Diesel	Pre-Euro-3	33,8%	15,6%	15,6%	13,6%	14,8%
	Euro-4	22,8%	1,0%	1,0%	0,9%	1,0%
	Euro-5	35,5%	4,5%	4,5%	4,5%	4,5%
	Euro-6	6,8%	77,7%	77,7%	77,5%	77,6%
	Tous	98,8%	98,8%	98,8%	96,6%	97,9%
CNG	Euro-3	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Euro-4	0,6%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%
	Euro-5	0,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Euro-6	0,0%	0,8%	0,8%	0,8%	0,8%
	Tous	1,0%	1,1%	1,1%	1,1%	1,1%
Électrique		0,1%	0,1%	0,1%	2,3%	0,9%
Total		100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Compositions de parc Île-de-France selon les scénarios - Autobus - autocars

Autobus-Autocars (toutes catégories)		Compositions de parc Île-de-France (en %) selon les scénarios :				
	Cat_Euro	RÉFÉRENCE	Scénario FAP	Scénario Essence	Techno_altern. (électriques)	Scénario Ambition Air
Diesel	Pre-Euro-3	35,0%	7,5%	7,5%	0,0%	4,2%
	Euro-4	15,5%	2,8%	2,8%	2,8%	2,9%
	Euro-5	40,6%	15,8%	15,8%	14,2%	15,1%
	Euro-6	7,8%	72,9%	72,9%	67,3%	70,5%
	Tous	99,0%	99,0%	99,0%	84,3%	92,7%
CNG	Euro-2	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Euro-3	0,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Euro-4	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
	Euro-5	0,5%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%
	Euro-6	0,1%	0,6%	0,6%	0,6%	0,6%
	Tous	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%
Électrique		0,0%	0,0%	0,0%	14,6%	6,3%
Total		100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Compositions de parc Île-de-France selon les scénarios - Deux-roues motorisés

Deux-roues motorisés (toutes catégories)		Compositions de parc Île-de-France (en %) selon les scénarios :				
	Cat_Euro	RÉFÉRENCE	Scénario FAP	Scénario Essence	Techno_altern. (électriques)	Scénario Ambition Air
Essence	Pre-Euro-2	38,7%	18,7%	18,7%	14,2%	16,5%
	Euro-3	61,0%	9,0%	9,0%	1,4%	5,9%
	Euro-4	0,2%	18,7%	18,7%	11,2%	15,4%
	Euro-5	0,0%	53,7%	53,7%	31,7%	43,9%
	Tous	100,0%	100,0%	100,0%	58,5%	81,7%
Électrique		0,0%	0,0%	0,0%	41,5%	18,3%
Total		100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Compositions de parc automobile agrégées sur l'ensemble de l'Île-de-France

Toutes catégories de véhicules		Compositions de parc tout-Île-de-France (en %) selon les scénarios				
	Cat_Euro	RÉFÉRENCE	Scénario FAP	Scénario Essence	Techno_altern. (électriques)	Scénario Ambition Air
Voitures	Diesel	47,1%	46,8%	23,6%	35,0%	42,1%
	Essence	21,1%	21,0%	43,2%	24,7%	21,6%
	GPL	0,3%	0,6%	0,6%	0,5%	0,6%
	Hybrides-Diesel	0,4%	0,7%	0,8%	0,7%	0,7%
	Hybrides-Essence	1,5%	1,4%	2,1%	1,4%	1,3%
	Électriques	0,3%	0,3%	0,5%	8,6%	2,9%
	Tous		70,8%	70,8%	70,8%	70,8%
Véh. Utilitaires légers	Diesel	15,2%	15,2%	12,7%	14,0%	14,7%
	Essence	0,3%	0,3%	2,7%	0,6%	0,4%
	Hybrides-Essence	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Électriques	0,0%	0,0%	0,0%	0,8%	0,3%
Tous		15,5%	15,5%	15,5%	15,5%	15,4%
Deux-roues motorisés (toutes cat.)	Essence	7,8%	7,8%	7,8%	4,5%	7,7%
	Électriques	0,0%	0,0%	0,0%	3,2%	1,7%
Tous		7,8%	7,8%	7,8%	7,8%	9,4%
Camions (toutes cat.)	Diesel	5,2%	5,2%	5,2%	5,1%	5,2%
	CNG	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
	Électriques	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,1%
	Tous		5,3%	5,3%	5,3%	5,3%
Autobus	- Diesel	0,6%	0,6%	0,6%	0,6%	0,8%
Autocars (toutes cat.)	CNG	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Électriques	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,1%
Tous		0,65%	0,65%	0,65%	0,65%	0,84%
Tous véhicules		100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Compositions de parc automobile agrégées en intra-A86 (Île-de-France)

Toutes catégories de véhicules		Compositions de parc intra-A86 - Île-de-France (en %) selon les scénarios				
	Cat_Euro	RÉFÉRENCE	Scénario FAP	Scénario Essence	Techno_altern. (électriques)	Scénario Ambition Air
Voitures	Diesel	47,2%	47,0%	23,1%	29,8%	26,8%
	Essence	22,0%	21,9%	44,8%	27,2%	24,4%
	GPL	0,3%	0,7%	0,6%	0,4%	0,4%
	Hybrides-Diesel	0,4%	0,7%	0,8%	0,7%	0,6%
	Hybrides-Essence	1,6%	1,4%	2,2%	1,5%	1,3%
	Électriques	0,4%	0,4%	0,6%	12,4%	11,2%
	Tous		72,0%	72,0%	72,0%	72,0%
Véh. Utilitaires légers	Diesel	13,8%	13,8%	11,5%	12,1%	11,6%
	Essence	0,2%	0,3%	2,5%	0,7%	0,7%
	Hybrides-Essence	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Électriques	0,0%	0,0%	0,0%	1,2%	1,1%
Tous		14,0%	14,1%	14,1%	14,1%	13,5%
Deux-roues motorisés (toutes cat.)	Essence	9,0%	9,0%	9,0%	5,0%	9,0%
	Électriques	0,0%	0,0%	0,0%	4,1%	7,3%
	Tous		9,0%	9,0%	9,0%	16,3%
Camions (toutes cat.)	Diesel	4,1%	4,1%	4,1%	3,9%	3,7%
	CNG	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Électriques	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%	0,2%
	Tous		4,1%	4,1%	4,1%	4,0%
Autobus Autocars (toutes cat.)	- Diesel	0,7%	0,7%	0,7%	0,6%	1,3%
	CNG	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Électriques	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,2%
Tous		0,75%	0,75%	0,75%	0,75%	1,56%
Tous véhicules		100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Annexe 6 : Facteurs d'émission du parc automobile des voitures particulières en Île-de-France selon les scénarios

Sont donnés ci-après et pour les différents scénarios les facteurs d'émissions détaillés des véhicules particuliers seulement.

Véhicules particuliers, Île-de-France - Facteurs d'émissions des polluants gazeux

Scénario de référence

Facteurs d'émissions des polluants gazeux

Cat_Euro	CO ₂ g/km	SO ₂ mg/km	NOx mg/km	NO ₂ mg/km	NH ₃ mg/km	COV mg/km	COV				CO mg/km
							évapo mg/km	CH ₄ g/km	Benzène mg/km		
Diesel	Pre-Euro-2	186	1,19	721,7	94,8	1,02	54,5	0,0	5,72	1,19	302
	Euro-3	178	1,13	811,4	219,1	1,00	22,1	0,0	0,89	0,45	71
	Euro-4	164	1,05	619,5	285,0	1,00	13,9	0,0	0,45	0,28	79
	Euro-4-FAP	148	0,95	633,3	209,0	1,90	1,0	0,0	0,45	0,03	39
	Euro-5	148	0,94	636,4	210,0	1,90	0,9	0,0	0,49	0,03	39
	Euro-6	151	0,96	238,0	71,4	1,90	0,8	0,0	1,10	0,04	73
Tous	161	1,03	674,3	213,0	1,46	13,1	0,0	1,10	0,28	80	
Essence	Pre-Euro-2	196	1,23	660,4	26,4	76,06	571,8	141,9	44,24	37,68	6050
	Euro-3	197	1,24	114,8	3,4	27,84	55,8	46,8	32,78	4,89	3281
	Euro-4	208	1,31	72,0	2,2	23,64	35,1	46,3	28,32	3,48	1443
	Euro-5	179	1,13	40,7	1,2	13,78	4,4	46,6	28,52	1,46	1486
	Euro-6	168	1,06	58,9	1,8	8,66	10,2	45,4	32,24	2,08	1276
	Tous	195	1,22	231,2	8,7	36,01	175,3	72,0	33,72	12,42	3116
GPL	Pre-Euro-2	181	1,21	334,6	16,7	12,78	465,2	0,0	26,60	3,09	6330
	Euro-3	181	1,21	119,2	5,8	13,46	84,8	0,0	10,69	0,60	2913
	Euro-4	182	1,21	71,2	3,5	13,41	61,8	0,0	5,34	0,42	1263
	Euro-5	182	1,21	53,5	2,6	12,76	61,8	0,0	5,31	0,42	1263
	Tous	182	1,21	118,8	5,9	13,12	133,5	0,0	9,87	0,90	2412
Hybrides - Diesel	Euro-4	104	0,66	435,2	200,2	0,67	4,9	0,0	0,00	0,10	18
	Euro-5	95	0,60	425,7	140,5	0,67	0,6	0,0	0,34	0,02	27
	Euro-6	80	0,51	149,2	44,8	1,27	0,6	0,0	0,39	0,02	44
Tous	95	0,61	423,1	140,8	0,67	0,7	0,0	0,33	0,02	27	
Hybrides - Essence	Euro-2	126	0,79	22,0	0,9	60,14	0,0	687,9	29,34	0,25	144
	Euro-3	126	0,79	22,0	0,7	14,08	0,0	687,9	24,25	0,25	144
	Euro-4	126	0,79	22,0	0,7	14,45	0,0	689,4	19,09	0,25	143
	Euro-5	112	0,70	13,0	0,4	8,59	0,0	688,6	19,11	0,13	173
	Euro-6	93	0,58	14,3	0,4	8,61	0,0	688,9	19,11	0,13	161
	Tous	114	0,72	15,0	0,5	10,41	0,0	688,8	19,35	0,15	167
Électrique		0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0
Total		169	1,07	520,4	145,0	11,99	61,6	36,4	11,25	3,90	997

Véhicules particuliers, Île-de-France - Facteurs d'émissions des polluants gazeux

Scénario FAP 2025 (généralisation du filtre à particules véhicules légers Diesel à horizon 2025)

Facteurs d'émissions des polluants gazeux												
	Cat_Euro	CO ₂ g/km	SO ₂ mg/km	NOx mg/km	NO ₂ mg/km	NH ₃ mg/km	COV mg/km	COV		Benzène mg/km	CO mg/km	
								évapo mg/km	CH ₄ g/km			
Diesel	Pre-Euro-2	188	1,20	716,8	94,1	1,04	49,5	0,0	4,16	1,06	230	
	Euro-3	178	1,13	809,8	218,7	1,00	22,0	0,0	0,78	0,45	68	
	Euro-4	164	1,05	620,8	285,6	1,00	14,4	0,0	0,50	0,29	83	
	Euro-4-FAP											
	Euro-5	147	0,94	639,0	210,9	1,90	0,9	0,0	0,53	0,03	40	
	Euro-6	124	0,79	220,9	66,3	1,90	1,0	0,0	0,44	0,03	64	
	Euro-6c	123	0,79	117,9	35,4	1,90	1,0	0,0	0,43	0,03	63	
	Tous		138	0,88	370,6	113,7	1,74	5,0	0,0	0,60	0,11	64
Essence	Pre-Euro-2	195	1,23	945,1	37,8	66,20	691,8	218,1	48,47	46,87	6622	
	Euro-3	198	1,24	112,8	3,4	29,55	56,3	46,9	31,85	4,87	3224	
	Euro-4	225	1,42	83,3	2,5	15,04	32,6	44,3	30,09	3,42	1332	
	Euro-5	175	1,10	43,3	1,3	13,14	4,5	46,3	29,31	1,51	1553	
	Euro-6	153	0,96	43,8	1,3	12,94	8,5	46,6	28,13	1,79	1256	
	Euro-6c	152	0,96	47,1	1,4	13,07	11,0	46,6	28,00	1,96	1269	
	Tous		165	1,04	129,4	4,7	19,52	72,5	60,9	30,37	6,00	1972
	GPL	Pre-Euro-2	181	1,21	331,7	16,6	12,85	457,9	0,0	26,23	3,05	6336
Euro-3		182	1,21	118,2	5,9	13,24	86,7	0,0	8,44	0,60	2931	
Euro-4		182	1,21	64,8	3,2	13,76	63,1	0,0	2,35	0,41	1324	
Euro-5												
Euro-6		190	1,26	59,6	2,1	11,49	55,6	0,0	25,33	0,44	1188	
Euro-6c		190	1,26	59,6	2,1	11,49	55,6	0,0	25,33	0,44	1188	
Tous			188	1,25	85,0	3,6	11,92	89,1	0,0	22,16	0,64	1718
Hybrides - Diesel		Euro-4										
	Euro-5											
	Euro-6	79	0,50	148,6	44,6	1,27	0,6	0,0	0,35	0,02	43	
	Euro-6c	79	0,50	79,4	23,8	1,27	0,6	0,0	0,35	0,02	43	
	Tous	79	0,50	114,2	34,3	1,27	0,6	0,0	0,35	0,02	43	
Hybrides - Essence	Euro-2	126	0,79	22,0	0,9	59,69	0,0	691,1	28,85	0,25	141	
	Euro-3	126	0,79	21,9	0,7	14,00	0,0	687,7	24,35	0,25	145	
	Euro-4	125	0,79	21,8	0,7	12,95	0,0	683,5	19,32	0,26	150	
	Euro-5	111	0,70	12,7	0,4	8,18	0,0	681,4	19,35	0,14	186	
	Euro-6	94	0,59	14,5	0,4	8,88	0,0	693,6	18,96	0,13	154	
	Euro-6c	94	0,59	15,7	0,5	8,91	0,0	694,1	18,94	0,14	156	
	Tous	103	0,65	14,9	0,5	9,47	0,0	688,5	19,27	0,15	165	
Électrique		0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0	
Total		144	0,92	285,6	77,0	7,24	25,6	31,2	9,97	1,86	646	

Véhicules particuliers, Île-de-France - Facteurs d'émissions des polluants gazeux

Scénario Essence (recul des véhicules légers Diesel au profit des essence à horizon 2025)

Facteurs d'émissions des polluants gazeux											
	Cat_Euro	CO ₂ g/km	SO ₂ mg/km	NOx mg/km	NO ₂ mg/km	NH ₃ mg/km	COV mg/km	COV		Benzène mg/km	CO mg/km
								évapo mg/km	CH ₄ g/km		
Diesel	Pre-Euro-2	188	1,20	719,1	94,4	1,04	48,0	0,0	4,03	1,03	223
	Euro-3	177	1,13	811,3	219,1	1,00	21,3	0,0	0,73	0,44	65
	Euro-4	164	1,04	622,5	286,4	1,00	14,0	0,0	0,47	0,29	80
	Euro-4-FAP										
	Euro-5	146	0,93	630,4	208,0	1,90	0,9	0,0	0,41	0,03	36
	Euro-6	124	0,79	221,0	66,3	1,90	0,9	0,0	0,43	0,03	63
	Euro-6c	123	0,78	117,8	35,3	1,90	1,0	0,0	0,40	0,03	63
Tous		139	0,89	433,4	136,4	1,78	4,0	0,0	0,52	0,09	56
Essence	Pre-Euro-2	208	1,31	2632,7	105,3	2,43	1597,2	689,6	96,71	115,67	13182
	Euro-3	205	1,29	108,9	3,3	32,81	57,4	47,0	29,10	4,78	2880
	Euro-4										
	Euro-5	174	1,09	39,5	1,2	14,19	4,1	46,8	28,14	1,41	1534
	Euro-6	153	0,96	43,3	1,3	13,08	8,4	46,6	28,10	1,79	1261
	Euro-6c	152	0,95	46,2	1,4	13,30	10,9	46,7	27,90	1,95	1275
	Tous		159	1,00	61,5	2,0	13,62	19,4	51,0	28,51	2,55
GPL	Pre-Euro-2	181	1,21	331,4	16,6	12,85	456,2	0,0	26,08	3,04	6335
	Euro-3	181	1,21	118,1	5,9	13,24	86,6	0,0	8,40	0,60	2932
	Euro-4	181	1,21	64,7	3,2	13,76	63,1	0,0	2,33	0,41	1324
	Euro-5	184	1,22	22,7	1,1	19,45	54,9	0,0	1,25	0,35	1672
	Euro-6	190	1,26	59,5	2,1	11,50	55,6	0,0	25,22	0,44	1188
	Euro-6c	190	1,26	59,5	2,1	11,50	55,6	0,0	25,22	0,44	1188
	Tous		188	1,25	83,1	3,5	12,14	88,0	0,0	21,46	0,63
Hybrides - Euro-4											
Diesel	Euro-5	90	0,58	408,5	134,8	0,67	0,7	0,0	0,12	0,02	20
	Euro-6	79	0,50	148,4	44,5	1,27	0,6	0,0	0,34	0,02	43
	Euro-6c	79	0,50	79,3	23,8	1,27	0,6	0,0	0,34	0,02	43
	Tous		81	0,52	163,9	51,2	1,17	0,6	0,0	0,31	0,02
Hybrides - Euro-2											
Essence	Euro-3	126	0,79	22,0	0,7	14,08	0,0	687,9	24,26	0,25	144
	Euro-4	125	0,79	21,9	0,7	13,03	0,0	683,8	19,29	0,26	150
	Euro-5	112	0,70	13,5	0,4	8,72	0,0	691,8	18,81	0,12	163
	Euro-6	93	0,59	14,6	0,4	8,90	0,0	694,2	18,90	0,13	152
	Euro-6c	94	0,59	15,7	0,5	8,92	0,0	694,4	18,92	0,14	155
	Tous		107	0,67	14,5	0,4	9,28	0,0	692,2	18,96	0,13
Électrique		0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0
Total		149	0,94	184,9	47,3	9,30	13,9	51,7	18,32	1,59	916

Véhicules particuliers, Île-de-France - Facteurs d'émissions des polluants gazeux

Scénario Technologies Alternatives (promotion des véhicules électriques à 2025)

Facteurs d'émissions des polluants gazeux											
	Cat_Euro	CO ₂ g/km	SO ₂ mg/km	NOx mg/km	NO ₂ mg/km	NH ₃ mg/km	COV mg/km	COV		Benzène mg/km	CO mg/km
								évapo mg/km	CH ₄ g/km		
Diesel	Pre-Euro-2	187	1,19	716,2	94,0	1,04	47,4	0,0	4,03	1,02	224
	Euro-3	174	1,11	807,2	217,9	1,00	19,7	0,0	0,38	0,40	55
	Euro-4	160	1,02	618,7	284,6	1,00	12,3	0,0	0,29	0,25	66
	Euro-4-FAP										
	Euro-5	144	0,92	628,2	207,3	1,90	0,9	0,0	0,37	0,03	34
	Euro-6	121	0,77	217,1	65,1	1,90	1,0	0,0	0,24	0,02	61
	Euro-6c	120	0,77	115,9	34,8	1,90	1,0	0,0	0,23	0,02	61
Tous		135	0,86	374,3	113,2	1,73	5,2	0,0	0,42	0,11	61
Essence	Pre-Euro-2	188	1,18	1020,6	40,8	63,40	687,9	238,5	47,04	47,07	6756
	Euro-3	195	1,22	108,7	3,3	33,31	57,6	47,2	29,59	4,83	3263
	Euro-4	208	1,30	52,3	1,6	36,03	31,5	44,2	25,79	3,15	1592
	Euro-5	180	1,13	46,2	1,4	12,36	4,9	46,1	30,13	1,60	1495
	Euro-6	156	0,98	46,2	1,4	12,33	8,6	46,4	28,75	1,82	1242
	Euro-6c	155	0,98	49,7	1,5	12,49	11,1	46,4	28,60	1,99	1255
	Tous		164	1,03	111,2	3,9	17,37	54,1	57,9	30,00	4,83
GPL	Pre-Euro-2	182	1,21	332,9	16,6	12,82	462,5	0,0	26,52	3,08	6329
	Euro-3	182	1,21	118,9	5,9	13,12	86,6	0,0	8,73	0,60	2918
	Euro-4	182	1,21	70,9	3,5	13,04	64,0	0,0	2,65	0,42	1272
	Euro-5										
	Euro-6	184	1,23	52,8	1,8	12,48	53,9	0,0	22,35	0,43	1258
	Euro-6c	184	1,23	52,8	1,8	12,48	53,9	0,0	22,35	0,43	1258
	Tous		184	1,22	92,2	4,1	12,66	102,1	0,0	18,36	0,73
Hybrides - Diesel	Euro-4										
	Euro-5										
	Euro-6	79	0,50	148,3	44,5	1,27	0,6	0,0	0,34	0,02	43
	Euro-6c	79	0,50	79,3	23,8	1,27	0,6	0,0	0,34	0,02	43
	Tous	79	0,50	114,0	34,2	1,27	0,6	0,0	0,34	0,02	43
Hybrides - Essence	Euro-2	126	0,79	22,2	0,9	59,51	0,0	695,6	27,84	0,24	135
	Euro-3	126	0,79	22,1	0,7	14,78	0,0	690,6	23,87	0,25	141
	Euro-4	126	0,79	22,1	0,7	13,89	0,0	687,0	19,11	0,25	145
	Euro-5	111	0,70	12,5	0,4	8,09	0,0	679,6	19,48	0,14	191
	Euro-6	94	0,59	14,6	0,4	8,93	0,0	694,5	18,91	0,13	152
	Euro-6c	94	0,59	15,8	0,5	8,98	0,0	695,5	18,87	0,14	153
	Tous	103	0,65	14,8	0,4	9,42	0,0	688,4	19,25	0,15	166
Électrique		0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0
Total		128	0,81	225,7	57,7	7,19	22,1	33,5	11,18	1,75	669

Véhicules particuliers, Île-de-France - Facteurs d'émissions des polluants gazeux

Scénario Ambition Air (promotion des véhicules électriques et réduction du trafic en intra-A86, 2025)

Facteurs d'émissions des polluants gazeux

	Cat_Euro	CO ₂ g/km	SO ₂ mg/km	NOx mg/km	NO ₂ mg/km	NH ₃ mg/km	COV mg/km	COV		Benzène mg/km	CO mg/km	
								évapo mg/km	CH ₄ g/km			
Diesel	Pre-Euro-2	188	1,20	718,3	94,2	1,04	47,8	0,0	4,12	1,03	224	
	Euro-3	176	1,12	808,3	218,3	1,00	20,5	0,0	0,69	0,42	61	
	Euro-4	161	1,03	615,8	283,3	1,00	13,0	0,0	0,46	0,27	72	
	Euro-4-FAP											
	Euro-5	145	0,93	630,7	208,1	1,90	0,9	0,0	0,50	0,03	37	
	Euro-6	122	0,78	218,7	65,6	1,90	0,9	0,0	0,41	0,03	62	
	Euro-6c	121	0,77	116,7	35,0	1,90	0,9	0,0	0,39	0,03	62	
Tous		136	0,87	369,7	112,9	1,74	4,9	0,0	0,57	0,11	62	
Essence	Pre-Euro-2	191	1,20	976,1	39,0	65,71	675,9	223,3	48,23	45,95	6600	
	Euro-3	195	1,23	112,6	3,4	29,99	58,5	46,9	31,40	4,97	3387	
	Euro-4	216	1,36	79,3	2,4	13,55	38,2	44,0	30,26	3,76	1616	
	Euro-5	179	1,12	44,2	1,3	13,13	4,4	46,3	29,39	1,51	1460	
	Euro-6	154	0,97	44,2	1,3	12,84	8,4	46,6	28,24	1,79	1251	
	Euro-6c	153	0,96	47,5	1,4	12,98	11,0	46,6	28,11	1,96	1265	
	Tous	164	1,03	124,4	4,5	18,84	65,8	60,0	30,19	5,57	1922	
GPL	Pre-Euro-2	182	1,21	332,4	16,6	12,84	451,5	0,0	26,20	3,01	6462	
	Euro-3	182	1,21	118,3	5,9	13,23	87,4	0,0	8,49	0,60	2988	
	Euro-4	182	1,21	66,2	3,3	13,63	63,0	0,0	2,41	0,41	1307	
	Euro-5											
	Euro-6	186	1,24	57,1	2,0	11,43	58,3	0,0	24,81	0,45	1309	
	Euro-6c	186	1,24	57,1	2,0	11,43	58,3	0,0	24,81	0,45	1309	
	Tous	185	1,23	86,0	3,7	11,92	93,9	0,0	21,29	0,68	1874	
Hybrides - Diesel	Euro-4											
	Euro-5											
	Euro-6	79	0,50	148,0	44,4	1,27	0,6	0,0	0,34	0,02	43	
	Euro-6c	79	0,50	79,1	23,7	1,27	0,6	0,0	0,34	0,02	43	
	Tous	79	0,50	113,7	34,1	1,27	0,6	0,0	0,34	0,02	43	
Hybrides - Essence	Euro-2	127	0,80	22,8	0,9	59,77	0,0	691,9	28,65	0,25	136	
	Euro-3	126	0,79	22,7	0,7	14,09	0,0	688,2	24,22	0,25	140	
	Euro-4	126	0,79	22,6	0,7	13,01	0,0	683,9	19,28	0,26	145	
	Euro-5	111	0,70	12,8	0,4	8,17	0,0	681,5	19,36	0,14	184	
	Euro-6	94	0,59	14,8	0,4	8,89	0,0	694,0	18,94	0,13	149	
	Euro-6c	94	0,59	16,1	0,5	8,92	0,0	694,6	18,92	0,14	151	
	Tous	103	0,65	15,2	0,5	9,44	0,0	688,7	19,25	0,15	162	
Électrique		0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0	
Total		138	0,88	266,1	70,5	7,23	24,3	31,9	10,32	1,81	657	

Véhicules particuliers, Île-de-France - Facteurs d'émissions des polluants particulières

Scénario de référence

Facteurs d'émissions des polluants particulières										
Cat_Euro	Combustion				Abrasion		Abrasion (freins + pneus)			
	PM _{2,5} PM _{1,0} mg/km	EC mg/km	OM mg/km	NB (PN) #/km	PM ₁₀ mg/km	PM _{2,5} mg/km	PM _{1,0} mg/km	EC mg/km	OM mg/km	
Diesel	Pre-Euro-2	96,49	69,21	24,68	5,39E+13	24,19	13,06	1,69	1,43	3,77
	Euro-3	52,50	44,63	6,69	5,11E+13	24,34	13,13	1,70	1,44	3,80
	Euro-4	39,62	5,94	17,83	4,84E+13	24,90	13,40	1,76	1,47	3,89
	Euro-4-FAP	2,97	0,45	1,34	3,02E+11	24,90	13,40	1,76	1,47	3,89
	Euro-5	3,01	0,45	1,35	1,02E+12	15,54	9,68	0,80	1,23	2,89
	Euro-6	2,85	0,43	1,28	1,18E+12	28,13	14,92	2,09	1,65	4,43
	Tous	29,41	17,44	7,89	2,53E+13	20,94	11,81	1,36	1,36	3,46
Essence	Pre-Euro-2	2,44	0,58	1,61	1,07E+12	24,84	13,37	1,75	1,47	3,88
	Euro-3	1,13	0,17	0,51	9,59E+11	24,73	13,31	1,74	1,46	3,86
	Euro-4	1,17	0,17	0,52	8,78E+11	25,37	13,62	1,81	1,50	3,97
	Euro-5	1,51	0,23	0,68	9,64E+11	25,50	13,68	1,82	1,51	3,99
	Euro-6	1,61	0,24	0,73	9,89E+11	28,13	14,92	2,09	1,65	4,43
	Tous	1,59	0,29	0,85	9,70E+11	25,14	13,51	1,78	1,48	3,93
GPL	Pre-Euro-2	3,22	0,80	2,01	9,88E+11	25,27	13,57	1,80	1,49	3,95
	Euro-3	1,28	0,19	0,58	9,35E+11	25,28	13,58	1,80	1,49	3,95
	Euro-4	1,28	0,19	0,58	8,86E+11	25,28	13,57	1,80	1,49	3,95
	Euro-5	1,28	0,19	0,58	9,61E+11	25,29	13,58	1,80	1,49	3,96
	Tous	1,60	0,29	0,82	9,34E+11	25,28	13,57	1,80	1,49	3,95
Hybrides Diesel	- Euro-4	21,88	3,28	9,85	2,94E+13	21,05	11,58	1,37	1,25	3,24
	Euro-5	2,05	0,31	0,92	6,88E+11	25,23	13,55	1,79	1,49	3,94
Hybrides Essence	Euro-6	1,52	0,23	0,68	7,08E+11	25,81	13,82	1,85	1,52	4,04
	- Euro-2	1,71	0,43	1,07	6,43E+11	25,67	13,76	1,84	1,51	4,02
	Euro-3	0,78	0,12	0,35	6,11E+11	25,66	13,75	1,84	1,51	4,02
	Euro-4	0,78	0,12	0,35	5,84E+11	25,58	13,72	1,83	1,51	4,00
	Euro-5	1,00	0,15	0,45	6,44E+11	25,62	13,74	1,83	1,51	4,01
Tous	0,97	0,15	0,44	6,33E+11	25,62	13,73	1,83	1,51	4,01	
Électrique		0,00	0,00	0,00	0,00E+00	27,23	14,49	2,00	1,60	4,28
Total		20,06	11,69	5,52	1,72E+13	22,37	12,39	1,50	1,41	3,62

Véhicules particuliers, Île-de-France - Facteurs d'émissions des polluants particuliers

Scénario FAP 2025 (généralisation du filtre à particules véhicules légers Diesel à horizon 2025)

Facteurs d'émissions des polluants particuliers											
Cat_Euro	Combustion				Abrasion		Abrasion (freins + pneus)				
	PM _{2,5} PM _{1,0} mg/km	EC mg/km	OM mg/km	NB (PN) #/km	PM ₁₀ mg/km	PM _{2,5} mg/km	PM _{1,0} mg/km	EC mg/km	OM mg/km		
Diesel	Pre-Euro-2	91,43	66,52	22,70	5,03E+13	23,05	12,53	1,57	1,37	3,58	
	Euro-3	52,54	44,66	6,70	5,06E+13	24,21	13,07	1,69	1,43	3,77	
	Euro-4	40,11	6,02	18,05	4,88E+13	25,13	13,51	1,78	1,48	3,93	
	Euro-4-FAP										
	Euro-5	3,05	0,46	1,37	1,03E+12	25,13	13,51	1,78	1,48	3,93	
	Euro-6	2,04	0,31	0,92	1,01E+12	24,83	13,36	1,75	1,47	3,88	
	Euro-6c	2,03	0,30	0,91	1,00E+12	24,76	13,33	1,75	1,46	3,87	
	Tous	11,56	6,97	2,95	9,53E+12	24,77	13,34	1,75	1,46	3,87	
Essence	Pre-Euro-2	2,40	0,55	1,64	1,14E+12	24,32	13,12	1,70	1,44	3,79	
	Euro-3	1,12	0,17	0,51	9,71E+11	24,49	13,20	1,72	1,45	3,82	
	Euro-4	1,23	0,18	0,55	8,14E+11	26,70	14,24	1,94	1,57	4,19	
	Euro-5	1,51	0,23	0,68	9,68E+11	26,06	13,94	1,88	1,54	4,08	
	Euro-6	1,56	0,23	0,70	9,63E+11	25,23	13,55	1,79	1,49	3,95	
	Euro-6c	1,67	0,25	0,75	9,62E+11	25,15	13,51	1,78	1,49	3,93	
	Tous	1,60	0,26	0,77	9,76E+11	25,13	13,50	1,78	1,48	3,93	
	GPL	Pre-Euro-2	3,22	0,81	2,01	9,92E+11	25,23	13,55	1,79	1,49	3,94
Euro-3		1,28	0,19	0,58	9,46E+11	25,15	13,51	1,78	1,49	3,93	
Euro-4		1,28	0,19	0,58	9,29E+11	24,61	13,26	1,73	1,45	3,84	
Euro-5											
Euro-6		1,28	0,19	0,58	9,57E+11	26,15	13,98	1,89	1,54	4,10	
Euro-6c		1,28	0,19	0,58	9,57E+11	26,15	13,98	1,89	1,54	4,10	
Tous		1,43	0,24	0,69	9,56E+11	25,87	13,85	1,86	1,53	4,05	
Hybrides Diesel		- Euro-4									
	Euro-5										
	Euro-6	1,44	0,22	0,65	6,92E+11	25,33	13,60	1,80	1,50	3,96	
	Euro-6c	1,44	0,22	0,65	6,92E+11	25,33	13,60	1,80	1,50	3,96	
	Tous	1,44	0,22	0,65	6,92E+11	25,33	13,60	1,80	1,50	3,96	
Hybrides Essence	- Euro-2	1,70	0,43	1,06	6,54E+11	25,50	13,68	1,82	1,51	3,99	
	Euro-3	0,78	0,12	0,35	6,11E+11	25,68	13,76	1,84	1,52	4,02	
	Euro-4	0,78	0,12	0,35	5,71E+11	25,91	13,87	1,86	1,53	4,06	
	Euro-5	1,00	0,15	0,45	6,41E+11	26,02	13,92	1,87	1,53	4,08	
	Euro-6	1,04	0,16	0,47	6,47E+11	25,35	13,61	1,81	1,50	3,97	
	Euro-6c	1,12	0,17	0,50	6,47E+11	25,33	13,60	1,80	1,50	3,96	
	Tous	1,03	0,16	0,47	6,38E+11	25,63	13,74	1,83	1,51	4,01	
Électrique	0,00	0,00	0,00	0,00E+00	27,24	14,50	2,00	1,60	4,28		
Total	8,17	4,69	2,20	6,62E+12	24,92	13,41	1,76	1,47	3,89		

Véhicules particuliers, Île-de-France - Facteurs d'émissions des polluants particuliers

Scénario Essence (recul des véhicules légers Diesel au profit des essence à horizon 2025)

Facteurs d'émissions des polluants particuliers											
Cat_Euro	Combustion				Abrasion		Abrasion (freins + pneus)				
	PM _{2,5} PM _{1,0} mg/km	EC mg/km	OM mg/km	NB (PN) #/km	PM ₁₀ mg/km	PM _{2,5} mg/km	PM _{1,0} mg/km	EC mg/km	OM mg/km		
Diesel	Pre-Euro-2	91,72	66,76	22,75	5,00E+13	22,88	12,44	1,55	1,36	3,55	
	Euro-3	52,91	44,98	6,75	5,01E+13	24,00	12,97	1,67	1,42	3,74	
	Euro-4	39,74	5,96	17,88	4,85E+13	24,93	13,41	1,76	1,47	3,89	
	Euro-4-FAP										
	Euro-5	2,86	0,43	1,29	9,96E+11	24,52	13,21	1,72	1,45	3,83	
	Euro-6	2,01	0,30	0,90	9,99E+11	24,66	13,28	1,74	1,46	3,85	
	Euro-6c	1,98	0,30	0,89	9,93E+11	24,55	13,23	1,72	1,45	3,83	
Tous	9,44	5,43	2,53	7,39E+12	24,50	13,21	1,72	1,45	3,82		
Essence	Pre-Euro-2	3,21	0,63	2,59	1,40E+12	24,38	13,15	1,71	1,44	3,80	
	Euro-3	1,08	0,16	0,48	9,77E+11	24,04	12,99	1,67	1,42	3,75	
	Euro-4										
	Euro-5	1,50	0,23	0,68	9,63E+11	25,19	13,53	1,79	1,49	3,94	
	Euro-6	1,56	0,23	0,70	9,66E+11	25,15	13,51	1,78	1,49	3,93	
	Euro-6c	1,67	0,25	0,75	9,65E+11	25,01	13,45	1,77	1,48	3,91	
	Tous	1,59	0,24	0,72	9,68E+11	25,09	13,49	1,78	1,48	3,92	
GPL	Pre-Euro-2	3,22	0,80	2,01	9,92E+11	25,21	13,54	1,79	1,49	3,94	
	Euro-3	1,28	0,19	0,58	9,46E+11	25,13	13,50	1,78	1,48	3,93	
	Euro-4	1,28	0,19	0,58	9,29E+11	24,59	13,25	1,73	1,45	3,84	
	Euro-5	1,28	0,19	0,58	1,02E+12	21,05	11,58	1,37	1,25	3,24	
	Euro-6	1,28	0,19	0,58	9,56E+11	26,13	13,97	1,88	1,54	4,10	
	Euro-6c	1,28	0,19	0,58	9,56E+11	26,13	13,97	1,88	1,54	4,10	
	Tous	1,42	0,24	0,68	9,58E+11	25,71	13,78	1,84	1,52	4,03	
Hybrides Diesel	- Euro-4										
	Euro-5	1,74	0,26	0,78	6,32E+11	25,19	13,53	1,79	1,49	3,94	
	Euro-6	1,44	0,22	0,65	6,91E+11	25,15	13,51	1,78	1,49	3,93	
	Euro-6c	1,44	0,22	0,65	6,91E+11	25,01	13,45	1,77	1,48	3,91	
Tous	1,49	0,22	0,67	6,81E+11	25,09	13,49	1,78	1,48	3,92		
Hybrides Essence	- Euro-2	1,70	0,42	1,06	6,54E+11	25,21	13,54	1,79	1,49	3,94	
	Euro-3	0,78	0,12	0,35	6,11E+11	25,13	13,50	1,78	1,48	3,93	
	Euro-4	0,78	0,12	0,35	5,71E+11	24,59	13,25	1,73	1,45	3,84	
	Euro-5	1,00	0,15	0,45	6,39E+11	21,05	11,58	1,37	1,25	3,24	
	Euro-6	1,04	0,16	0,47	6,46E+11	26,13	13,97	1,88	1,54	4,10	
	Euro-6c	1,12	0,17	0,50	6,46E+11	26,13	13,97	1,88	1,54	4,10	
	Tous	1,01	0,15	0,46	6,38E+11	25,71	13,78	1,84	1,52	4,03	
Électrique	0,00	0,00	0,00	0,00E+00	27,08	14,42	1,98	1,59	4,25		
Total	4,18	1,97	1,31	3,09E+12	27,08	14,42	1,98	1,59	4,25		

Véhicules particuliers, Île-de-France - Facteurs d'émissions des polluants particulières

Scénario Technologies Alternatives (promotion des véhicules électriques à 2025)

Facteurs d'émissions des polluants particuliers											
Cat_Euro	Combustion				Abrasion		Abrasion (freins + pneus)				
	PM _{2,5} PM _{1,0} mg/km	EC mg/km	OM mg/km	NB (PN) #/km	PM ₁₀ mg/km	PM _{2,5} mg/km	PM _{1,0} mg/km	EC mg/km	OM mg/km		
Diesel	Pre-Euro-2	91,28	66,47	22,61	4,99E+13	22,94	12,48	1,56	1,36	3,56	
	Euro-3	53,18	45,21	6,78	4,84E+13	23,49	12,73	1,62	1,39	3,65	
	Euro-4	37,99	5,70	17,10	4,70E+13	24,05	13,00	1,67	1,42	3,75	
	Euro-4-FAP										
	Euro-5	2,79	0,42	1,25	9,83E+11	24,27	13,10	1,70	1,44	3,78	
	Euro-6	1,80	0,27	0,81	9,50E+11	23,82	12,89	1,65	1,41	3,71	
	Euro-6c	1,78	0,27	0,80	9,47E+11	23,76	12,86	1,64	1,41	3,70	
Tous	12,47	7,96	3,02	9,91E+12	23,84	12,90	1,65	1,41	3,71		
Essence	Pre-Euro-2	2,28	0,52	1,59	1,19E+12	23,73	12,85	1,64	1,41	3,69	
	Euro-3	1,10	0,16	0,49	1,00E+12	23,90	12,93	1,66	1,41	3,72	
	Euro-4	1,07	0,16	0,48	9,87E+11	23,37	12,67	1,60	1,38	3,63	
	Euro-5	1,52	0,23	0,68	9,68E+11	26,72	14,25	1,94	1,57	4,19	
	Euro-6	1,56	0,23	0,70	9,65E+11	25,71	13,77	1,84	1,52	4,02	
	Euro-6c	1,68	0,25	0,75	9,64E+11	25,60	13,73	1,83	1,51	4,01	
	Tous	1,60	0,25	0,75	9,82E+11	25,50	13,68	1,82	1,51	3,99	
GPL	Pre-Euro-2	3,22	0,81	2,01	9,89E+11	25,26	13,57	1,80	1,49	3,95	
	Euro-3	1,28	0,19	0,58	9,39E+11	25,26	13,56	1,80	1,49	3,95	
	Euro-4	1,28	0,19	0,58	8,95E+11	25,27	13,57	1,80	1,49	3,95	
	Euro-5										
	Euro-6	1,28	0,19	0,58	9,46E+11	25,13	13,50	1,78	1,48	3,93	
	Euro-6c	1,28	0,19	0,58	9,46E+11	25,13	13,50	1,78	1,48	3,93	
	Tous	1,49	0,26	0,73	9,42E+11	25,18	13,53	1,79	1,49	3,94	
Hybrides - Diesel	Euro-4										
	Euro-5										
	Euro-6	1,43	0,21	0,64	6,89E+11	25,25	13,56	1,79	1,49	3,95	
	Euro-6c	1,43	0,21	0,64	6,89E+11	25,24	13,56	1,79	1,49	3,95	
Tous	1,43	0,21	0,64	6,89E+11	25,25	13,56	1,79	1,49	3,95		
Hybrides - Essence	Euro-2	1,66	0,41	1,04	6,66E+11	25,23	13,55	1,79	1,49	3,95	
	Euro-3	0,78	0,12	0,35	6,18E+11	25,50	13,68	1,82	1,51	3,99	
	Euro-4	0,77	0,12	0,35	5,77E+11	25,70	13,77	1,84	1,52	4,02	
	Euro-5	1,00	0,15	0,45	6,41E+11	26,15	13,99	1,89	1,54	4,10	
	Euro-6	1,04	0,16	0,47	6,46E+11	25,30	13,58	1,80	1,49	3,96	
	Euro-6c	1,12	0,17	0,50	6,47E+11	25,24	13,56	1,79	1,49	3,95	
Tous	1,03	0,16	0,46	6,39E+11	25,65	13,75	1,83	1,51	4,01		
Électrique	0,00	0,00	0,00	0,00E+00	27,52	14,63	2,03	1,62	4,33		
Total	6,76	4,03	1,77	5,26E+12	24,92	13,41	1,76	1,47	3,89		

Véhicules particuliers, Île-de-France - Facteurs d'émissions des polluants particuliers

Scénario Ambition Air

(promotion des véhicules électriques et réduction du trafic en intra-A86, 2025)

acteurs d'émissions des polluants particuliers											
Cat_Euro	Combustion				Abrasion		Abrasion (freins + pneus)				
	PM _{2,5} PM _{1,0} mg/km	EC mg/km	OM mg/km	NB (PN) #/km	PM ₁₀ mg/km	PM _{2,5} mg/km	PM _{1,0} mg/km	EC mg/km	OM mg/km		
Diesel	Pre-Euro-2	91,89	66,90	22,77	4,99E+13	22,98	12,49	1,56	1,36	3,57	
	Euro-3	53,28	45,29	6,79	4,90E+13	23,98	12,96	1,67	1,42	3,74	
	Euro-4	39,33	5,90	17,70	4,73E+13	24,86	13,38	1,76	1,47	3,88	
	Euro-4-FAP										
	Euro-5	91,89	66,90	22,77	4,99E+13	24,91	13,40	1,76	1,47	3,89	
	Euro-6	53,28	45,29	6,79	4,90E+13	24,56	13,24	1,73	1,45	3,83	
	Euro-6c	39,33	5,90	17,70	4,73E+13	24,50	13,21	1,72	1,45	3,82	
	Tous	91,89	66,90	22,77	4,99E+13	24,52	13,22	1,72	1,45	3,83	
Essence	Pre-Euro-2	53,28	45,29	6,79	4,90E+13	24,12	13,03	1,68	1,43	3,76	
	Euro-3	39,33	5,90	17,70	4,73E+13	24,30	13,11	1,70	1,44	3,79	
	Euro-4	91,89	66,90	22,77	4,99E+13	26,57	14,18	1,93	1,57	4,17	
	Euro-5	53,28	45,29	6,79	4,90E+13	26,21	14,01	1,89	1,55	4,11	
	Euro-6	39,33	5,90	17,70	4,73E+13	25,31	13,59	1,80	1,49	3,96	
	Euro-6c	91,89	66,90	22,77	4,99E+13	25,22	13,55	1,79	1,49	3,94	
	Tous	53,28	45,29	6,79	4,90E+13	25,18	13,53	1,79	1,49	3,94	
GPL	Pre-Euro-2	39,33	5,90	17,70	4,73E+13	25,17	13,52	1,79	1,49	3,94	
	Euro-3	91,89	66,90	22,77	4,99E+13	25,11	13,50	1,78	1,48	3,93	
	Euro-4	53,28	45,29	6,79	4,90E+13	24,75	13,32	1,74	1,46	3,86	
	Euro-5										
	Euro-6	1,28	0,19	0,58	9,42E+11	25,94	13,88	1,86	1,53	4,06	
	Euro-6c	1,28	0,19	0,58	9,42E+11	25,94	13,88	1,86	1,53	4,06	
	Tous	1,44	0,24	0,70	9,46E+11	25,68	13,76	1,84	1,52	4,02	
Hybrides - Diesel	Euro-4										
	Euro-5										
	Euro-6	1,41	0,21	0,63	6,82E+11	25,25	13,56	1,79	1,49	3,95	
	Euro-6c	1,41	0,21	0,63	6,81E+11	25,24	13,56	1,79	1,49	3,95	
	Tous	1,41	0,21	0,63	6,81E+11	25,25	13,56	1,79	1,49	3,95	
Hybrides - Essence	Euro-2	1,69	0,42	1,06	6,65E+11	25,38	13,62	1,81	1,50	3,97	
	Euro-3	0,78	0,12	0,35	6,19E+11	25,58	13,72	1,83	1,51	4,00	
	Euro-4	0,78	0,12	0,35	5,76E+11	25,81	13,83	1,85	1,52	4,04	
	Euro-5	1,00	0,15	0,45	6,40E+11	26,00	13,91	1,87	1,53	4,07	
	Euro-6	1,04	0,16	0,47	6,45E+11	25,28	13,57	1,80	1,49	3,95	
	Euro-6c	1,12	0,17	0,50	6,45E+11	25,24	13,56	1,79	1,49	3,95	
	Tous	1,03	0,16	0,46	6,38E+11	25,58	13,71	1,83	1,51	4,00	
Électrique		0,00	0,00	0,00	0,00E+00	26,94	14,36	1,97	1,59	4,23	
Total		7,78	4,56	2,06	6,13E+12	24,86	13,38	1,76	1,47	3,88	

Annexe 7 : Facteurs d'émission agrégés par catégories de véhicules, du parc automobile en Île-de-France selon les scénarios

Facteurs d'émissions agrégés par catégories de véhicules, Île-de-France - Polluants gazeux

Scénario de référence

Facteurs d'émissions agrégés des polluants gazeux		COV									
Cat_Euro	CO ₂ g/km	SO ₂ mg/km	NOx mg/km	NO ₂ mg/km	NH ₃ mg/km	Comb. mg/km	Évapo mg/km	CH ₄ g/km	Benzène mg/km	CO mg/km	
Voitures	Diesel	161	1,03	674,3	213,0	1,46	13,1	0,0	1,10	0,28	80
	Essence	195	1,22	231,2	8,7	36,01	175,3	72,0	33,72	12,42	3116
	GPL	182	1,21	118,8	5,9	13,12	133,5	0,0	9,87	0,90	2412
	Hybride-Dies	95	0,61	423,1	140,8	0,67	0,7	0,0	0,33	0,02	27
	Hybride-Ess	114	0,72	15,0	0,5	10,41	0,0	688,8	19,35	0,15	167
	Électrique	0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0
	Tous	169	1,07	520,4	145,0	11,99	61,6	36,4	11,25	3,90	997
Véh. Utilit. légers	Diesel	250	1,59	896,4	325,3	1,00	48,2	0,0	0,97	0,97	508
	Essence	243	1,53	424,9	16,6	46,32	431,9	121,1	39,73	30,29	8660
	Hybride-Ess	215	1,35	88,3	2,6	11,72	26,4	61,3	31,39	3,09	3947
	Électrique	0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0
	Tous	250	1,59	886,9	319,5	1,78	54,6	2,1	1,66	1,47	649
Deux-roues motorisés	96	0,60	133,8	4,5	1,98	864,4	57,3	87,47	57,34	4841	
Camions	Diesel	585	3,73	3626,4	430,4	6,28	102,2	0,0	13,13	0,08	841
	CNG	1262	9,10	9998,1	0,0	0,00	305,3	0,0	1024,74	0,00	1000
	Électrique	0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0
	Tous	592	3,78	3689,5	425,5	6,21	104,2	0,0	23,73	0,08	841
Autobus - Autocars	Diesel	1655	10,55	14241,2	1726,7	3,00	472,7	0,0	42,37	0,36	3919
	CNG	1268	9,14	10188,8	0,0	0,00	246,9	0,0	1192,87	0,00	1065
	Tous	1650	10,53	14198,9	1708,7	2,97	470,4	0,0	54,38	0,36	3889
Total	208	1,32	803,9	186,2	9,27	127,7	30,6	16,62	7,44	1252	

Facteurs d'émissions agrégés par catégories de véhicules, Île-de-France - Polluants gazeux

Scénario FAP 2025 (généralisation du filtre à particules véhicules légers Diesel à horizon 2025)

Facteurs d'émissions agrégés des polluants gazeux		COV									
Cat_Euro	CO ₂ g/km	SO ₂ mg/km	NOx mg/km	NO ₂ mg/km	NH ₃ mg/km	Comb. mg/km	Évapo mg/km	CH ₄ g/km	Benzène mg/km	CO mg/km	
Voitures	Diesel	138	0,88	370,6	113,7	1,74	5,0	0,0	0,60	0,11	64
	Essence	165	1,04	129,4	4,7	19,52	72,5	60,9	30,37	6,00	1972
	GPL	188	1,25	85,0	3,6	11,92	89,1	0,0	22,16	0,64	1718
	Hybride-Dies	79	0,50	114,2	34,3	1,27	0,6	0,0	0,35	0,02	43
	Hybride-Ess	103	0,65	14,9	0,5	9,47	0,0	688,5	19,27	0,15	165
	Électrique	0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0
	Tous	144	0,92	285,6	77,0	7,24	25,6	31,2	9,97	1,86	646
Véh.	Diesel	233	1,48	432,0	161,4	1,00	11,9	0,0	0,48	0,24	183
Utilit. légers	Essence	189	1,19	227,5	8,8	23,47	241,8	390,0	35,87	17,54	4816
	Hybride-Ess	145	0,91	52,1	1,6	9,08	13,3	245,7	25,18	1,84	2080
	Électrique	0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0
	Tous	231	1,47	427,2	158,1	1,42	16,0	7,5	1,16	0,55	269
Deux-roues motorisés		96	0,60	120,9	3,9	1,98	657,9	53,6	77,40	43,99	3830
Camions	Diesel	575	3,67	1167,9	133,4	8,09	52,8	0,0	6,68	0,04	296
	CNG	1262	9,10	9998,2	0,0	0,00	106,7	0,0	979,82	0,00	1000
	Électrique	0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0
	Tous	582	3,72	1265,7	131,8	7,99	53,4	0,0	17,57	0,04	304
Autobus -	Diesel	1627	10,37	4736,3	548,6	3,00	173,3	0,0	12,78	0,13	1546
Autocars	CNG	1262	9,10	9995,5	0,0	0,00	151,1	0,0	979,56	0,00	1000
	Tous	1623	10,36	4791,2	542,9	2,97	173,1	0,0	22,87	0,13	1541
Total		187	1,19	376,0	89,8	5,94	75,6	27,4	14,32	4,82	823

Facteurs d'émissions agrégés par catégories de véhicules, Île-de-France - Polluants gazeux

Scénario Essence (recul des véh. légers Diesel au profit des essence à 2025)

Facteurs d'émissions agrégés des polluants gazeux		COV									
Cat_Euro	CO ₂ g/km	SO ₂ mg/km	NOx mg/km	NO ₂ mg/km	NH ₃ mg/km	Comb. mg/km	Évapo mg/km	CH ₄ g/km	Benzène mg/km	CO mg/km	
Voitures	Diesel	139	0,89	433,4	136,4	1,78	4,0	0,0	0,52	0,09	56
	Essence	159	1,00	61,5	2,0	13,62	19,4	51,0	28,51	2,55	1438
	GPL	188	1,25	83,1	3,5	12,14	88,0	0,0	21,46	0,63	1718
	Hybride-Dies	81	0,52	163,9	51,2	1,17	0,6	0,0	0,31	0,02	39
	Hybride-Ess	107	0,67	14,5	0,4	9,28	0,0	692,2	18,96	0,13	159
	Électrique	0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0
	Tous	149	0,94	184,9	47,3	9,30	13,9	51,7	18,32	1,59	916
Véh. Utilit. légers	Diesel	232	1,48	517,8	186,2	1,00	9,7	0,0	0,44	0,20	150
	Essence	168	1,06	33,6	1,0	14,33	6,0	423,4	30,61	1,45	1332
	Hybride-Ess	145	0,91	52,1	1,6	9,09	13,3	245,7	25,17	1,84	2079
	Électrique	0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0
Tous	220	1,40	430,3	152,7	3,37	9,1	75,2	5,81	0,42	362	
Deux-roues motorisés	96	0,60	120,9	3,9	1,98	657,9	53,6	77,40	43,99	3830	
Camions	Diesel	575	3,67	1167,9	133,4	8,09	52,8	0,0	6,68	0,04	296
	CNG	1262	9,10	9998,2	0,0	0,00	106,7	0,0	979,82	0,00	1000
	Électrique	0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0
	Tous	582	3,72	1265,7	131,8	7,99	53,4	0,0	17,57	0,04	304
Autobus -	Diesel	1627	10,37	4736,3	548,6	3,00	173,3	0,0	12,78	0,13	1546
Autocars	CNG	1262	9,10	9995,5	0,0	0,00	151,1	0,0	979,56	0,00	1000
Tous	1623	10,36	4791,2	542,9	2,97	173,1	0,0	22,87	0,13	1541	
Total	188	1,19	305,1	68,0	7,70	66,3	52,4	20,96	4,61	1028	

Facteurs d'émissions agrégés par catégories de véhicules, Île-de-France - Polluants gazeux

Scénario Technologies alternatives (promotion véhicules électriques à 2025)

Facteurs d'émissions agrégés des polluants gazeux		COV									
Cat_Euro	CO ₂ g/km	SO ₂ mg/km	NOx mg/km	NO ₂ mg/km	NH ₃ mg/km	Comb. mg/km	Évapo mg/km	CH ₄ g/km	Benzène mg/km	CO mg/km	
Voitures	Diesel	135	0,86	374,3	113,2	1,73	5,2	0,0	0,42	0,11	61
	Essence	164	1,03	111,2	3,9	17,37	54,1	57,9	30,00	4,83	1782
	GPL	184	1,22	92,2	4,1	12,66	102,1	0,0	18,36	0,73	1972
	Hybride-Dies	79	0,50	114,0	34,2	1,27	0,6	0,0	0,34	0,02	43
	Hybride-Ess	103	0,65	14,8	0,4	9,42	0,0	688,4	19,25	0,15	166
	Électrique	0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0
	Tous	128	0,81	225,7	57,7	7,19	22,1	33,5	11,18	1,75	669
Véh. Utilit. légers	Diesel	232	1,48	440,6	164,1	1,00	11,8	0,0	0,43	0,24	186
	Essence	189	1,19	70,7	2,4	16,06	24,5	395,7	32,15	2,59	1721
	Hybride-Ess	138	0,87	47,0	1,4	10,86	11,9	264,6	22,81	1,63	1943
	Électrique	0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0
	Tous	218	1,39	402,6	148,9	1,56	11,7	16,0	1,69	0,32	240
Deux-roues motorisés	Essence	110	0,69	77,5	2,7	1,95	592,0	67,5	82,68	40,88	3916
	Électrique	0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0
	Tous	65	0,41	45,3	1,6	1,14	346,4	39,5	48,38	23,92	2292
Camions	Diesel	576	3,67	1084,5	122,6	8,19	48,4	0,0	5,94	0,04	278
	CNG	1262	9,10	9998,2	0,0	0,00	106,7	0,0	979,82	0,00	1000
	Électrique	0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0
	Tous	571	3,65	1159,6	118,4	7,91	48,0	0,0	16,71	0,04	280
Autobus - Autocars	Diesel	1676	10,68	3668,9	394,6	3,00	111,1	0,0	5,25	0,08	1306
	CNG	1262	9,10	9995,5	0,0	0,00	151,1	0,0	979,56	0,00	1000
	Électrique	0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0
	Tous	1427	9,10	3198,6	332,8	2,53	95,3	0,0	14,65	0,07	1112
Total	169	1,07	307,8	72,4	5,86	47,5	29,3	12,91	3,15	711	

Scénario Ambition Air (promo. Véh. Elec. et restriction trafic intra-A86 à 2025) - Île-de-France

Facteurs d'émissions agrégés des polluants gazeux		COV						Évapo	CH ₄	Benzène	CO
		Cat_Euro	CO ₂ g/km	SO ₂ mg/km	NOx mg/km	NO ₂ mg/km	NH ₃ mg/km				
Facteurs d'émissions moyens sur tout Île-de-France											
Voitures	Diesel	136	0,87	369,7	112,9	1,74	4,9	0,0	0,57	0,11	62
	Essence	164	1,03	124,4	4,5	18,84	65,8	60,0	30,19	5,57	1922
	GPL	185	1,23	86,0	3,7	11,92	93,9	0,0	21,29	0,68	1874
	Hybride-Dies	79	0,50	113,7	34,1	1,27	0,6	0,0	0,34	0,02	43
	Hybride-Ess	103	0,65	15,2	0,5	9,44	0,0	688,7	19,25	0,15	162
	Électrique	0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0
	Tous	138	0,88	266,1	70,5	7,23	24,3	31,9	10,32	1,81	657
Véh. Utilit. légers	Diesel	233	1,48	436,0	162,2	1,00	11,8	0,0	0,47	0,24	185
	Essence	192	1,20	153,7	5,8	20,14	122,9	400,6	32,39	9,32	3037
	Hybride-Ess	139	0,87	50,0	1,5	9,91	12,6	252,5	24,06	1,74	1991
	Électrique	0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0
Tous	227	1,45	420,2	155,0	1,48	14,3	10,6	1,31	0,46	257	
Deux-roues motorisés	Essence	101	0,63	111,0	3,6	1,98	619,0	58,1	79,93	41,91	3821
	Électrique	0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0
	Tous	82	0,52	90,6	2,9	1,62	505,5	47,4	65,27	34,23	3120
Camions	Diesel	574	3,66	1126,4	128,3	8,13	50,3	0,0	6,46	0,04	287
	CNG	1262	9,10	9998,3	0,0	0,00	106,6	0,0	979,83	0,00	1000
	Électrique	0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0
	Tous	576	3,68	1214,8	125,6	7,96	50,4	0,0	17,27	0,04	292
Autobus - Autocars	Diesel	1644	10,48	4317,6	487,8	3,00	148,6	0,0	9,77	0,11	1449
	CNG	1262	9,10	9994,6	0,0	0,00	151,2	0,0	979,48	0,00	999
	Électrique	0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0
	Tous	1536	9,80	4104,7	452,1	2,78	139,3	0,0	19,21	0,10	1353
Total	182	1,16	356,0	83,3	5,82	70,4	28,1	14,54	4,55	813	

Facteurs d'émissions moyens en Intra-A86 seulement

Voitures	Diesel	140	0,89	374,1	115,1	1,75	6,0	0,0	0,49	0,13	70
	Essence	176	1,11	95,1	3,3	16,51	47,4	55,6	29,76	4,39	1260
	GPL	188	1,25	101,9	4,5	12,84	108,1	0,0	19,09	0,76	1300
	Hybride-Dies	84	0,54	118,3	35,5	1,27	0,8	0,0	0,38	0,02	46
	Hybride-Ess	99	0,62	10,7	0,3	9,57	0,0	687,5	19,35	0,15	213
	Électrique	0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0
	Tous	128	0,81	192,7	49,2	7,24	21,1	34,9	11,95	1,72	518
Véh. Utilit. légers	Diesel	235	1,50	395,3	145,6	1,00	11,3	0,0	0,50	0,23	141
	Essence	202	1,27	54,8	1,8	15,40	15,9	417,4	28,65	1,92	1010
	Hybride-Ess	148	0,93	46,3	1,4	11,25	9,9	270,4	21,35	1,42	1547
	Électrique	0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0
Tous	213	1,36	343,6	125,5	1,70	10,6	22,7	1,99	0,30	179	
Deux-roues motorisés	Essence	125	0,79	81,9	2,8	1,99	663,8	72,8	85,65	45,28	4337
	Électrique	0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0
	Tous	69	0,43	45,1	1,6	1,10	365,9	40,1	47,22	24,96	2391
Camions	Diesel	615	3,92	1144,2	126,4	8,28	54,5	0,0	5,75	0,04	290
	CNG	1262	9,10	9995,8	0,0	0,00	107,5	0,0	979,60	0,00	1000
	Électrique	0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0
	Tous	593	3,79	1192,9	118,7	7,78	52,4	0,0	16,98	0,04	284
Autobus - Autocars	Diesel	1660	10,58	3698,0	396,3	3,00	110,7	0,0	5,25	0,08	1294
	CNG	1261	9,09	9990,7	0,0	0,00	151,6	0,0	979,10	0,00	999
	Électrique	0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00	0
	Tous	1418	9,05	3231,1	335,5	2,54	95,2	0,0	14,31	0,07	1105
Total	169	1,07	276,3	59,0	5,44	78,1	32,2	16,58	5,21	777	

**Facteurs d'émissions agrégés par catégories de véhicules, Île-de-France
- Polluants particulaires**

Scénario de référence

Facteurs d'émissions agrégés des polluants particulaires										
Cat_Euro		Combustion				Abrasion (totale)		Abrasion (freins + pneus seult)		
		PM _{2,5}	EC	OM	NB (PN)	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM _{1,0}	EC	OM
		PM _{1,0}								
		mg/km	mg/km	mg/km	#/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km
Voitures	Diesel	29,41	17,44	7,89	2,53E+13	20,94	11,81	1,36	1,36	3,46
	Essence	1,59	0,29	0,85	9,70E+11	25,14	13,51	1,78	1,48	3,93
	GPL	1,60	0,29	0,82	9,34E+11	25,28	13,57	1,80	1,49	3,95
	Hybride-Dies	2,47	0,37	1,11	1,30E+12	25,14	13,51	1,78	1,48	3,93
	Hybride-Ess	0,97	0,15	0,44	6,33E+11	25,62	13,73	1,83	1,51	4,01
	Électrique	0,00	0,00	0,00	0,00E+00	27,23	14,49	2,00	1,60	4,28
	Tous	20,06	11,69	5,52	1,72E+13	22,37	12,39	1,50	1,41	3,62
Véh. Utilit. légers	Diesel	122,68	44,90	43,98	7,72E+13	33,56	18,15	2,63	2,25	5,91
	Essence	1,77	0,36	1,03	1,44E+12	34,13	18,42	2,69	2,28	6,01
	Hybride-Ess	1,03	0,16	0,47	1,08E+12	45,28	24,21	3,65	2,99	7,95
	Électrique	0,00	0,00	0,00	0,00E+00	67,56	36,12	5,44	4,46	11,86
	Tous	120,42	44,06	43,18	7,58E+13	33,60	18,17	2,64	2,25	5,92
Deux-roues motorisés	16,41	3,25	12,71	4,31E+12	12,06	6,33	0,92	0,70	1,89	
Camions	Diesel	59,32	40,67	13,69	6,46E+13	95,78	50,10	5,85	4,27	11,70
	CNG	10,00	0,00	0,00	2,31E+14	92,61	47,21	5,54	3,51	10,00
	Électrique	0,00	0,00	0,00	0,00E+00	92,62	47,22	5,54	3,51	10,00
	Tous	58,74	40,20	13,53	6,63E+13	95,74	50,06	5,85	4,27	11,68
Autobus - Autocars	Diesel	204,75	141,57	45,90	2,07E+14	114,42	58,45	7,75	5,15	14,47
	CNG	10,38	0,00	0,00	1,04E+14	108,23	54,04	7,13	4,18	12,19
Tous	202,72	140,09	45,43	2,06E+14	114,35	58,40	7,74	5,14	14,45	
Total		38,54	18,39	12,59	2,91E+13	27,79	15,11	1,90	1,66	4,34

Facteurs d'émissions agrégés par catégories de véhicules, Île-de-France - Polluants particulaires

Scénario FAP (généralisation du filtre à particules à 2025)

Facteurs d'émissions agrégés des polluants particulaires										
Cat_Euro		Combustion				Abrasion (totale)		Abrasion (freins + pneus seult)		
		PM _{2,5} PM _{1,0} mg/km	EC mg/km	OM mg/km	NB (PN) #/km	PM ₁₀ mg/km	PM _{2,5} mg/km	PM _{1,0} mg/km	EC mg/km	OM mg/km
Voitures	Diesel	11,56	6,97	2,95	9,53E+12	24,77	13,34	1,75	1,46	3,87
	Essence	1,60	0,26	0,77	9,76E+11	25,13	13,50	1,78	1,48	3,93
	GPL	1,43	0,24	0,69	9,56E+11	25,87	13,85	1,86	1,53	4,05
	Hybride-Dies	1,44	0,22	0,65	6,92E+11	25,33	13,60	1,80	1,50	3,96
	Hybride-Ess	1,03	0,16	0,47	6,38E+11	25,63	13,74	1,83	1,51	4,01
	Électrique	0,00	0,00	0,00	0,00E+00	27,24	14,50	2,00	1,60	4,28
	Tous	8,17	4,69	2,20	6,62E+12	24,92	13,41	1,76	1,47	3,89
Véh. Utilit. légers	Diesel	43,86	9,44	18,71	2,70E+13	33,55	18,15	2,63	2,25	5,91
	Essence	1,92	0,32	0,97	1,40E+12	34,29	18,50	2,71	2,29	6,04
	Hybride-Ess	1,01	0,15	0,46	8,65E+11	36,74	19,65	2,96	2,43	6,45
	Électrique	0,00	0,00	0,00	0,00E+00	36,81	19,68	2,96	2,43	6,46
	Tous	42,98	9,25	18,34	2,65E+13	33,57	18,16	2,64	2,25	5,92
Deux-roues motorisés		11,49	2,36	8,49	2,05E+12	12,06	6,33	0,92	0,70	1,89
Camions	Diesel	22,25	13,47	6,05	1,98E+13	95,66	50,01	5,84	4,26	11,65
	CNG	10,00	0,00	0,00	6,69E+12	92,47	47,15	5,52	3,50	9,98
	Électrique	0,00	0,00	0,00	0,00E+00	92,40	47,12	5,52	3,50	9,97
	Tous	22,09	13,31	5,98	1,96E+13	95,62	49,98	5,84	4,25	11,63
Autobus - Autocars	Diesel	57,87	36,19	14,17	5,89E+13	114,42	58,45	7,75	5,15	14,47
	CNG	10,00	0,00	0,00	2,71E+11	108,23	54,05	7,13	4,18	12,19
	Tous	57,37	35,81	14,02	5,83E+13	114,35	58,40	7,74	5,14	14,45
Total		14,87	5,88	5,46	1,04E+13	29,58	15,82	2,09	1,70	4,53

**Facteurs d'émissions agrégés par catégories de véhicules, Île-de-France
- Polluants particulaires**

Scénario Essence (recul des véhicules légers Diesel au profit des essence à 2025)

Facteurs d'émissions agrégés des polluants particulaires		Combustion				Abrasion (totale)		Abrasion (freins + pneus seult)		
		PM _{2,5} PM _{1,0} mg/km	EC mg/km	OM mg/km	NB (PN) #/km	PM ₁₀ mg/km	PM _{2,5} mg/km	PM _{1,0} mg/km	EC mg/km	OM mg/km
Cat_Euro										
Voitures	Diesel	9,44	5,43	2,53	7,39E+12	24,50	13,21	1,72	1,45	3,82
	Essence	1,59	0,24	0,72	9,68E+11	25,09	13,49	1,78	1,48	3,92
	GPL	1,42	0,24	0,68	9,58E+11	25,71	13,78	1,84	1,52	4,03
	Hybride-Dies	1,49	0,22	0,67	6,81E+11	25,04	13,46	1,77	1,48	3,91
	Hybride-Ess	1,01	0,15	0,46	6,38E+11	25,40	13,63	1,81	1,50	3,97
	Électrique	0,00	0,00	0,00	0,00E+00	27,08	14,42	1,98	1,59	4,25
	Tous	4,18	1,97	1,31	3,09E+12	24,92	13,41	1,76	1,47	3,89
Véh. Utilit. légers	Diesel	36,02	7,73	15,37	2,20E+13	33,46	18,11	2,62	2,24	5,90
	Essence	1,87	0,28	0,84	1,40E+12	34,08	18,40	2,69	2,28	6,00
	Hybride-Ess	1,01	0,15	0,46	8,65E+11	36,73	19,65	2,96	2,43	6,45
	Électrique	0,00	0,00	0,00	0,00E+00	33,81	18,27	2,66	2,26	5,96
	Tous	29,84	6,38	12,75	1,83E+13	33,57	18,16	2,64	2,25	5,92
Deux-roues motorisés	11,49	2,36	8,49	2,05E+12	12,06	6,33	0,92	0,70	1,89	
Camions	Diesel	22,25	13,47	6,05	1,98E+13	95,66	50,01	5,84	4,26	11,65
	CNG	10,00	0,00	0,00	6,69E+12	92,47	47,15	5,52	3,50	9,98
	Électrique	0,00	0,00	0,00	0,00E+00	92,40	47,12	5,52	3,50	9,97
	Tous	22,09	13,31	5,98	1,96E+13	95,62	49,98	5,84	4,25	11,63
Autobus - Autocars	Diesel	57,87	36,19	14,17	5,89E+13	114,42	58,45	7,75	5,15	14,47
	CNG	10,00	0,00	0,00	2,71E+11	108,23	54,05	7,13	4,18	12,19
Tous	57,37	35,81	14,02	5,83E+13	114,35	58,40	7,74	5,14	14,45	
Total	10,01	3,50	3,97	6,59E+12	29,58	15,82	2,09	1,70	4,53	

**Facteurs d'émissions agrégés par catégories de véhicules, Île-de-France
- Polluants particulaires**

Scénario Technologies alternatives (promotion véhicules électriques à 2025)

Facteurs d'émissions agrégés des polluants particulaires										
Cat_Euro		Combustion				Abrasion (totale)		Abrasion (freins + pneus seult)		
		PM _{2,5}	EC	OM	NB (PN)	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM _{1,0}	EC	OM
		PM _{1,0}								
		mg/km	mg/km	mg/km	#/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km
Voitures	Diesel	12,47	7,96	3,02	9,91E+12	23,84	12,90	1,65	1,41	3,71
	Essence	1,60	0,25	0,75	9,82E+11	25,50	13,68	1,82	1,51	3,99
	GPL	1,49	0,26	0,73	9,42E+11	25,18	13,53	1,79	1,49	3,94
	Hybride-Dies	1,43	0,21	0,64	6,89E+11	25,25	13,56	1,79	1,49	3,95
	Hybride-Ess	1,03	0,16	0,46	6,39E+11	25,65	13,75	1,83	1,51	4,01
	Électrique	0,00	0,00	0,00	0,00E+00	27,52	14,63	2,03	1,62	4,33
	Tous	6,76	4,03	1,77	5,26E+12	24,92	13,41	1,76	1,47	3,89
Véh. Utilit. légers	Diesel	44,66	9,67	19,03	2,66E+13	33,13	17,95	2,59	2,22	5,84
	Essence	1,69	0,26	0,78	1,25E+12	36,77	19,67	2,96	2,43	6,46
	Hybride-Ess	1,02	0,15	0,46	8,96E+11	35,51	19,07	2,83	2,36	6,24
	Électrique	0,00	0,00	0,00	0,00E+00	38,83	20,64	3,17	2,55	6,80
	Tous	40,59	8,78	17,29	2,42E+13	33,57	18,16	2,64	2,25	5,92
Deux-roues motorisés	Essence	9,06	1,82	6,71	8,64E+11	15,14	8,51	1,70	2,34	1,92
	Électrique	0,00	0,00	0,00	0,00E+00	12,52	6,54	0,96	0,73	1,97
	Tous	5,30	1,07	3,93	5,05E+11	14,05	7,69	1,40	1,67	1,94
Camions	Diesel	20,22	12,09	5,58	1,75E+13	95,47	49,97	5,82	4,26	11,66
	CNG	10,00	0,00	0,00	6,69E+12	92,47	47,15	5,52	3,50	9,98
	Électrique	0,00	0,00	0,00	0,00E+00	103,38	51,92	6,64	3,97	11,51
	Tous	19,64	11,68	5,39	1,70E+13	95,62	49,98	5,84	4,25	11,63
Autobus - Autocars	Diesel	31,03	17,15	8,49	2,93E+13	114,98	58,85	7,80	5,24	14,68
	CNG	10,00	0,00	0,00	2,71E+11	108,23	54,05	7,13	4,18	12,19
	Électrique	0,00	0,00	0,00	0,00E+00	117,34	60,45	8,04	5,58	15,49
	Tous	26,27	14,47	7,16	2,47E+13	115,25	59,03	7,83	5,28	14,77
Total	12,69	5,00	4,57	8,58E+12	29,74	15,93	2,12	1,78	4,53	

Scénario Ambition Air (promo. Véh. Elec. et restriction trafic intra-A86 à 2025) - Île-de-France

Polluants particuliers		Combustion				Abrasion (totale)		Abrasion (freins + pneus seuls)		
		PM _{2,5}	EC	OM	NB (PN)	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM _{1,0}	EC	OM
Cat_Euro		PM _{1,0}	mg/km	mg/km	# /km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km
Facteurs d'émissions moyens sur tout Île-de-France										
Voitures	Diesel	11,88	7,34	2,96	9,52E+12	24,52	13,22	1,72	1,45	3,83
	Essence	1,60	0,26	0,76	9,84E+11	25,18	13,53	1,79	1,49	3,94
	GPL	1,44	0,24	0,70	9,46E+11	25,68	13,76	1,84	1,52	4,02
	Hybride-Dies	1,41	0,21	0,63	6,81E+11	25,25	13,56	1,79	1,49	3,95
	Hybride-Ess	1,03	0,16	0,46	6,38E+11	25,58	13,71	1,83	1,51	4,00
	Électrique	0,00	0,00	0,00	0,00E+00	26,94	14,36	1,97	1,59	4,23
	Tous	7,78	4,56	2,06	6,13E+12	24,86	13,38	1,76	1,47	3,88
Véh. Utilit. légers	Diesel	44,43	9,62	18,93	2,63E+13	33,36	18,06	2,61	2,24	5,88
	Essence	1,77	0,29	0,86	1,31E+12	35,23	18,94	2,80	2,34	6,20
	Hybride-Ess	1,01	0,15	0,46	8,81E+11	36,16	19,38	2,90	2,40	6,35
	Électrique	0,00	0,00	0,00	0,00E+00	37,75	20,13	3,06	2,49	6,62
Tous	42,47	9,20	18,10	2,52E+13	33,49	18,12	2,63	2,24	5,90	
Deux-roues motorisés	Essence	10,51	2,17	7,73	1,85E+12	11,99	6,30	0,91	0,70	1,88
	Électrique	0,00	0,00	0,00	0,00E+00	12,49	6,53	0,96	0,72	1,96
	Tous	8,58	1,77	6,32	1,51E+12	12,08	6,34	0,92	0,70	1,90
Camions	Diesel	21,30	12,84	5,83	1,88E+13	95,47	49,95	5,82	4,25	11,64
	CNG	10,00	0,00	0,00	7,00E+12	92,23	47,04	5,50	3,49	9,94
	Électrique	0,00	0,00	0,00	0,00E+00	99,03	50,02	6,19	3,78	10,90
	Tous	20,97	12,57	5,71	1,84E+13	95,47	49,91	5,82	4,24	11,61
Autobus - Autocars	Diesel	47,17	28,61	11,90	4,71E+13	114,75	58,65	7,78	5,19	14,57
	CNG	9,99	0,00	0,00	2,72E+11	108,54	54,18	7,16	4,19	12,23
	Électrique	0,00	0,00	0,00	0,00E+00	118,80	61,12	8,19	5,65	15,72
	Tous	43,81	26,51	11,03	4,36E+13	114,94	58,76	7,80	5,21	14,62
Total	14,21	5,62	5,20	9,60E+12	29,49	15,76	2,08	1,69	4,51	
Facteurs d'émissions moyens en intra-A86 seulement										
Voitures	Diesel	10,80	6,25	2,88	1,01E+13	24,90	13,40	1,76	1,47	3,89
	Essence	1,62	0,25	0,75	9,81E+11	26,09	13,96	1,88	1,54	4,09
	GPL	1,50	0,26	0,74	9,07E+11	26,09	13,95	1,88	1,54	4,09
	Hybride-Dies	1,80	0,27	0,81	8,03E+11	26,10	13,96	1,88	1,54	4,09
	Hybride-Ess	1,04	0,16	0,47	6,51E+11	26,35	14,08	1,91	1,55	4,13
	Électrique	0,00	0,00	0,00	0,00E+00	26,92	14,35	1,96	1,59	4,23
	Tous	5,13	2,69	1,50	4,57E+12	25,75	13,79	1,85	1,52	4,03
Véh. Utilit. légers	Diesel	32,57	7,14	13,88	2,62E+13	34,75	18,72	2,76	2,32	6,12
	Essence	1,48	0,23	0,68	1,10E+12	37,10	19,82	2,99	2,45	6,51
	Hybride-Ess	0,96	0,14	0,43	7,55E+11	36,31	19,45	2,91	2,40	6,38
	Électrique	0,00	0,00	0,00	0,00E+00	37,83	20,16	3,07	2,49	6,63
Tous	28,14	6,16	12,00	2,26E+13	35,14	18,90	2,79	2,34	6,18	
Deux-roues motorisés	Essence	8,33	1,72	6,08	1,07E+12	12,01	6,31	0,91	0,70	1,89
	Électrique	0,00	0,00	0,00	0,00E+00	12,49	6,53	0,96	0,72	1,96
	Tous	4,59	0,95	3,35	5,92E+11	12,23	6,41	0,93	0,71	1,92
Camions	Diesel	19,93	11,68	5,59	1,74E+13	99,04	51,52	6,18	4,41	12,16
	CNG	10,00	0,00	0,00	1,29E+11	97,70	49,44	6,06	3,73	10,71
	Électrique	0,00	0,00	0,00	0,00E+00	99,77	50,34	6,27	3,81	11,00
	Tous	18,84	10,97	5,25	1,64E+13	99,06	51,44	6,19	4,38	12,08
Autobus - Autocars	Diesel	30,58	16,91	8,37	2,87E+13	115,93	59,26	7,90	5,28	14,81
	CNG	9,99	0,00	0,00	2,75E+11	109,91	54,78	7,30	4,25	12,42
	Électrique	0,00	0,00	0,00	0,00E+00	118,80	61,12	8,19	5,65	15,72
	Tous	25,99	14,31	7,09	2,43E+13	116,28	59,48	7,94	5,32	14,92
Total	9,01	3,38	3,45	7,13E+12	29,14	15,49	2,09	1,67	4,47	

Annexe 8 : Répartition géographique des émissions en Île-de-France

Scénario de référence

Répartition géographique des trafics et émissions annuels - polluants gazeux

Zones géographiques	% superficie	% population	Trafic - VehxKm	Émissions de combustion et évaporation				
				CO ₂	Total_COV	NOx	NO ₂	NH ₃
NC	1,1 %	0,0 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %
Paris	0,9 %	20,0 %	12,2 %	12,5 %	17,6 %	11,4 %	11,7 %	12,2 %
A86 (inPC-Paris exclus)	2,2 %	20,9 %	14,1 %	14,1 %	14,5 %	13,9 %	13,8 %	14,4 %
A86 (hors PC)	0,1 %	0,4 %	0,8 %	0,8 %	0,8 %	0,9 %	0,9 %	0,8 %
PC (hors A86)	3,2 %	15,7 %	13,1 %	13,2 %	13,5 %	13,2 %	13,1 %	12,4 %
hors PC	92,5 %	43,0 %	59,7 %	59,2 %	53,5 %	60,5 %	60,4 %	60,4 %
Total								

Répartition géographique des trafics et émissions annuels - polluants particuliers

Zones géographiques	% population	Émissions totales de combustion et abrasion					
		PM _{1,0}	PM _{2,5}	PM ₁₀ ou PM	TSP	EC	OM
NC	0,0 %	0,3 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %	0,3 %	0,2 %
Paris	20,0 %	9,1 %	9,7 %	10,1 %	10,3 %	9,0 %	10,1 %
A86 (inPC-Paris exclus)	20,9 %	12,9 %	13,3 %	13,5 %	13,6 %	13,0 %	13,3 %
A86 (hors PC)	0,4 %	0,9 %	0,9 %	0,9 %	0,8 %	0,9 %	0,9 %
PC (hors A86)	15,7 %	12,6 %	12,7 %	12,8 %	12,9 %	12,6 %	12,7 %
hors PC	43,0 %	64,2 %	63,2 %	62,5 %	62,1 %	64,2 %	62,8 %
Total							

Répartition géographiques (densité) des trafics et émissions - Polluants gazeux

Densité de population	% superficie	% population	Trafic - VehxKm	Émissions de combustion et évaporation				
				CO ₂	Total_COV	NOx-	NO ₂	NH ₃
NC	1,1 %	0,0 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %
<=100	47,1 %	2,4 %	8,6 %	8,4 %	6,5 %	8,7 %	8,8 %	9,5 %
100-600	32,6 %	8,0 %	21,2 %	20,9 %	16,7 %	21,5 %	21,7 %	22,7 %
600-7500	16,1 %	41,9 %	45,8 %	45,5 %	44,9 %	45,8 %	45,4 %	44,3 %
7500-15000	2,1 %	22,0 %	12,9 %	13,2 %	15,4 %	12,9 %	12,7 %	12,3 %
15000-30000	0,7 %	15,2 %	9,0 %	9,1 %	12,0 %	8,4 %	8,5 %	9,4 %
30000-40000	0,2 %	6,7 %	1,7 %	2,0 %	3,2 %	1,8 %	1,9 %	1,3 %
>40000	0,1 %	3,8 %	0,6 %	0,7 %	1,2 %	0,7 %	0,7 %	0,4 %
Total								

Répartition géographiques (densité) des trafics et émissions - Polluants particuliers

Densité de population	% population	Émissions totales de combustion et abrasion					
		PM _{1,0}	PM _{2,5}	PM ₁₀ ou PM	TSP	EC	OM
NC	0,0 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %	0,3 %	0,2 %
<=100	2,4 %	9,7 %	9,5 %	9,5 %	9,4 %	10,1 %	9,6 %
100-600	8,0 %	23,3 %	22,8 %	22,8 %	22,6 %	23,9 %	23,0 %
600-7500	41,9 %	45,5 %	45,6 %	45,6 %	45,6 %	45,4 %	45,5 %
7500-15000	22,0 %	11,8 %	12,1 %	12,1 %	12,2 %	11,5 %	11,9 %
15000-30000	15,2 %	7,4 %	7,7 %	7,7 %	7,8 %	6,9 %	7,6 %
30000-40000	6,7 %	1,5 %	1,6 %	1,6 %	1,6 %	1,4 %	1,6 %
>40000	3,8 %	0,5 %	0,6 %	0,6 %	0,6 %	0,5 %	0,6 %
Total							

Émissions surfaciques et intensité trafic selon périmètres - Polluants gazeux

Zones géographiques	%	%	« Intensité tr afic »	Émissions surfaciques horaires (combustion et évaporation)			
				Total_COV	NOx-	NO ₂ -	NH ₃ -
	superficie	population					
NC	1,1 %	0,0 %	0,2	12,6	78,6	18,5	0,8
Paris	0,9 %	20,0 %	13,6	1604,2	5268,8	1255,2	65,2
A86 (inPC-Paris exclus)	2,2 %	20,9 %	6,5	545,2	2663,8	610,5	31,8
A86 (hors PC)	0,1 %	0,4 %	6,4	505,3	2829,9	653,1	31,1
PC (hors A86)	3,2 %	15,7 %	4,0	343,1	1696,5	390,0	18,3
hors PC	92,5 %	43,0 %	0,6	47,2	271,2	62,7	3,1
Total			1,0	81,7	414,9	96,1	4,8

Émissions surfaciques et intensité trafic selon périmètres - Polluants particulaires

Zones géographiques	%	Émissions surfaciques horaires (combustion et abrasion)				
		PM _{1,0}	PM _{2,5}	PM ₁₀ ou PM	EC	OM
	population					
NC	0,0 %	4,9	6,1	7,2	2,4	1,9
Paris	20,0 %	212,8	301,1	386,8	103,9	98,7
A86 (inPC-Paris exclus)	20,9 %	124,4	169,3	212,7	62,1	53,3
A86 (hors PC)	0,4 %	147,0	191,3	233,7	72,5	60,0
PC (hors A86)	15,7 %	81,6	109,3	136,0	40,5	34,5
hors PC	43,0 %	14,5	18,9	23,1	7,2	5,9
Total		20,9	27,7	34,2	10,3	8,7

Émissions surfaciques et intensité trafic selon densité - Polluants gazeux

Densité de population	%	%	« Intensité tr afic »	Émissions surfaciques horaires (combustion et évaporation)			
				Total_COV	NOx-	NO ₂ -	NH ₃ -
	superficie	population					
NC	1,1 %	0,0 %	0,2	12,6	78,6	18,5	0,8
<=100	47,1 %	2,4 %	0,2	11,3	76,7	17,9	1,0
100-600	32,6 %	8,0 %	0,7	42,0	274,6	64,2	3,3
600-7500	16,1 %	41,9 %	2,8	227,7	1178,8	271,0	13,2
7500-15000	2,1 %	22,0 %	6,1	596,4	2541,3	579,9	27,9
15000-30000	0,7 %	15,2 %	12,4	1341,7	4771,6	1125,3	61,7
30000-40000	0,2 %	6,7 %	9,1	1358,9	3985,1	942,2	31,8
>40000	0,1 %	3,8 %	7,3	1148,0	3304,3	781,9	23,3
Total			1,0	81,7	414,9	96,1	4,8

Émissions surfaciques et intensité trafic selon densité -Polluants particulaires

Densité de population	%	Émissions surfaciques horaires (combustion et abrasion)				
		PM _{1,0}	PM _{2,5}	PM ₁₀ ou PM	EC	OM
	population					
NC	0,0 %	4,9	6,1	7,2	2,4	1,9
<=100	2,4 %	4,5	5,7	6,9	2,2	1,8
100-600	8,0 %	15,3	19,8	24,0	7,6	6,2
600-7500	41,9 %	58,8	78,2	96,8	29,1	24,7
7500-15000	22,0 %	113,3	155,6	196,8	56,5	49,5
15000-30000	15,2 %	199,7	281,0	359,9	98,1	91,2
30000-40000	6,7 %	160,8	220,3	278,8	78,4	72,7
>40000	3,8 %	135,4	183,2	230,5	66,1	60,5
Total		20,9	27,7	34,2	10,3	8,7

Annexe 9 : Estimation du parc national de référence

Pour élaborer ce parc, le CITEPA a développé un modèle interne OPALE⁶⁹, pour établir un parc statique détaillé des véhicules immatriculés en France à partir des données statistiques disponibles (CCFA⁷⁰, Marché des véhicules, ARGUS, CSNM⁷¹, INRETS⁷², CCTN⁷³, Officiel du cycle et du quadricycle) qui soit compatible avec le modèle COPERT (COmputer Programme to Calculate Emissions from Road Traffic).

Calcul du parc statique pour les VP

Le parc global de référence retenu pour les VP est celui établi par le CCFA qui, de l'avis de nombreux experts, est le plus représentatif et, contrairement aux données administratives, tient mieux compte des véhicules en fin de vie retirés du parc.

La structure plus fine nécessaire pour le modèle COPERT est établie à partir des immatriculations de véhicules de particuliers neufs par cylindrée, introduites dans une base de données au CITEPA depuis 1960.

Les taux de survie annuels déterminés à partir des deux jeux de données précédents (parc par âge et immatriculations) sont de facto appliqués uniformément à cette structure fine de véhicules.

Calcul du parc statique pour les VUL

Comme pour les VP, le parc global de référence est celui établi par le CCFA.

La structure plus fine nécessaire est établie à partir des immatriculations de véhicules utilitaires légers neufs par PTAC, introduites dans une base de données au CITEPA depuis 1960.

Les taux de survie annuels déterminés à partir des deux jeux de données précédents (parc par âge et immatriculations) sont de facto appliqués uniformément à cette structure fine de véhicules.

Calcul du parc statique pour les PL (y compris les bus et cars)

Comme pour les VUL, le parc global de référence est celui établi par le CCFA et le calage se fait en appliquant une fonction de pondération en fonction de l'âge pour éviter entre autre de recalculer les véhicules nouvellement immatriculés.

La structure plus fine nécessaire est établie à partir des immatriculations des poids lourds, bus et cars neufs par PTAC, introduites dans une base de données au CITEPA depuis 1960.

Les taux de survie sont ceux de la littérature.

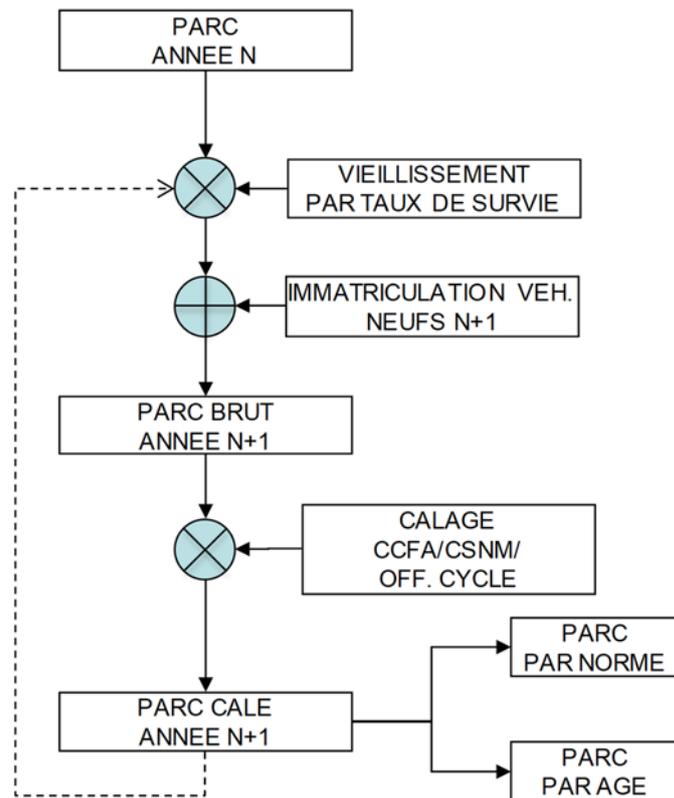
⁶⁹ OPALE : Ordonnancement du Parc Automobile en Liaison avec les Émissions

⁷⁰ CCFA : Comité des Constructeurs Français d'Automobiles

⁷¹ CSNM : Chambre Syndicale Nationale du Cycle et du Motorcycle

⁷² INRETS : Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité

⁷³ CCTN : Commission des Comptes des Transports de la Nation



Logigramme du processus d'estimation du parc statique dans le modèle OPALE

Calcul du parc statique pour les deux-roues

Le parc global de référence est celui établi par le CSNM (jusqu'en 2005) et par l'officiel du cycle (depuis 2007). Le calage se fait en appliquant une fonction de pondération en fonction de l'âge.

La structure plus fine nécessaire est établie à partir des immatriculations des deux-roues neufs par cylindrée, introduites dans une base de données au CITEPA depuis 1960. Pour les deux-roues dont la cylindrée est inférieure à 50 cm³ les immatriculations ne sont disponibles que depuis mi-2004. Avant cette date, il est fait l'hypothèse que les ventes représentent les immatriculations.

Les taux de survie sont ceux de la littérature.

Quel que soit le type de véhicule (VP, VUL, PL ou 2 roues), hypothèse est faite que 30 % des immatriculations qui précèdent la mise en place d'une norme sont conformes à ladite norme.

Le parc détaillé (type de véhicule, type de motorisation, cylindrée, rattachement aux normes d'émissions) est alors disponible.

Le modèle OPALE estime donc un parc statique au 31 décembre de chaque année et pour chaque type de véhicules par norme.

Le parc par norme ainsi calculé est le parc des véhicules immatriculés en France. Or les ventes de carburants en France concernent principalement des véhicules français mais aussi des véhicules étrangers.

Il faut donc estimer les parcs statiques et roulants des véhicules français et étrangers roulant sur prise carburant en France.

Les consommations de carburants, calées sur les ventes en France, par type de véhicules/motorisations ($Conso_{calée,Fr+Et}(type\ veh, motorisation)$) sont estimées à partir des consommations sur le territoire par type de véhicules (Français et étrangers)/motorisation ($Conso_{territoire,Fr+Et}(type\ veh, motorisation)$) et du solde aux frontières (solde) issues de la CCTN.

$$Conso_{calée,Fr+Et}(type\ veh, motorisation) = \frac{Conso_{territoire,Fr+Et}(type\ veh, motorisation) * \sum_i Conso_{territoire,Fr+Et}(i, motorisation) + solde}{\sum_i Conso_{territoire,Fr+Et}(i, motorisation)}$$

$i = 2\ Roues, VP, VUL, PL, Bus\ et\ cars$

Le trafic par type de véhicules/motorisations calé sur les ventes de carburants en France ($Trafic_{calé,Fr+Et}(type\ veh, motorisation)$) est obtenu en divisant les consommations obtenues précédemment par la consommation unitaire (CCTN) par type de véhicules (français)/motorisations ($Conso\ Unitaire_{Fr}(type\ veh, motorisation)$).

$$Trafic_{calé,Fr+Et}(type\ veh, motorisation) = \frac{Conso_{calée,Fr+Et}(type\ veh, motorisation)}{Conso\ Unitaire_{Fr}(type\ veh, motorisation)}$$

Ce trafic, divisé par les kilométrages annuels moyens [CCTN] par type de véhicules (français)/motorisations ($km_{Fr}(type\ veh, motorisation)$), donne le nombre de véhicule (VP, VUL, PL, Bus et cars et les deux-roues) circulant sur prise carburant française ($Nb\ véhicule_{calé,Fr+Et}(type\ veh, motorisation)$).

$$Nb\ véhicule_{calé,Fr+Et}(type\ veh, motorisation) = \frac{Trafic_{calé,Fr+Et}(type\ veh, motorisation)}{km_{Fr}(type\ veh, motorisation)}$$

La répartition par norme issue d'OPALE ($Nb\ véhicule_{OPALE}(type\ veh, motorisation, norme)$) est alors utilisée pour fournir le parc statique pour le modèle COPERT.

$$Nb\ véhicule_{OPALE}(type\ veh, motorisation, norme) = \frac{Nb\ véhicule_{calé,Fr+Et}(type\ veh, motorisation)}{Nb\ véhicule_{OPALE}(type\ veh, motorisation)}$$

Les données entrées dans le modèle COPERT sont des parcs à mi-année calculés par moyenne arithmétique des parcs estimés ci-dessus de deux années consécutives.

La parc roulant est obtenu en appliquant les kilométrages annuel moyen (estimés à partir de différentes enquêtes –TRM, Bus et cars, VUL, deux-roues - et publications - IFSTTAR) au parc calculé précédemment tout en recalant sur le trafic des véhicules ayant fait une prise de carburant en France ($Trafic_{calé,Fr+Et}(type\ veh, motorisation)$).

Annexe 10 : Compositions détaillées du parc roulant national selon les scénarios

Scénario de référence

ACTIVITE		ACTIVITE		ACTIVITE	
Trafic		Trafic		Trafic	
10 ⁶ veh.km		10 ⁶ veh.km		10 ⁶ veh.km	
VP essence		VUL essence		Bus et Cars diesel	
avant Euro 1	-	avant Euro 1	1 159	avant Euro I	70
Euro 1	7 753	Euro 1	1 323	Euro I	125
Euro 2	13 620	Euro 2	2 385	Euro II	466
Euro 3	20 172	Euro 3	2 642	Euro III	829
Euro 4	35 019	Euro 4	3 024	Euro IV	855
Euro 5	18 797	Euro 5	1 542	Euro V	1 203
Euro 6	-	Euro 6	-	Euro VI	57
Euro 6c	-	Euro 6c	-	Total Bus et Cars diesel	3 605
Total VP essence	95 362	Total VUL essence	12 075		
VP diesel		VUL diesel		Bus et Cars GNV	
avant Euro 1	-	avant Euro 1	2 203	avant Euro I	0.05
Euro 1	13 591	Euro 1	3 261	Euro I	1.3
Euro 2	25 994	Euro 2	9 684	Euro II	10
Euro 3	64 333	Euro 3	22 858	Euro III	46
Euro 4	149 215	Euro 4	42 196	Euro IV	43
Euro 5	72 505	Euro 5	17 801	Euro V	56
Euro 6	-	Euro 6	-	Euro VI	3.1
Euro 6c	-	Euro 6c	-	Total Bus et Cars GNV	160
Total VP diesel	325 638	Total VUL diesel	98 003	Total B&C	3 765
VP gpl		Total VUL	110 078	Total PL+B&C	
avant Euro 1	-				
Euro 1	135	PL essence		2 roues essence	
Euro 2	238	avant Euro I	0.002	avant Euro 1	120
Euro 3	344	Euro I	0.04	Euro 1	2 011
Euro 4	627	Euro II	0.3	Euro 2	4 826
Euro 5	345	Euro III	1.5	Euro 3	9 646
Euro 6	-	Euro IV	1.9	Euro 4	-
Euro 6c	-	Euro V	2.7	Euro 5	-
Total VP gpl	1 689	Euro VI	0.1	Total 2 roues essence	16 603
		Total PL essence	6.5		
VP Electrique		PL diesel			
avant Euro 1	-	avant Euro I	35		
Euro 1	-	Euro I	167		
Euro 2	0.2	Euro II	2 143		
Euro 3	2.7	Euro III	6 167		
Euro 4	1.9	Euro IV	7 601		
Euro 5	98	Euro V	11 315		
Euro 6	-	Euro VI	511		
Euro 6c	-	Total PL diesel	27 938		
Total VP electrique	103	Total PL	27 945		
VP GNV					
avant Euro 1	-				
Euro 1	8.0				
Euro 2	14				
Euro 3	20				
Euro 4	37				
Euro 5	20				
Euro 6	-				
Euro 6c	-				
Total VP GNV	100				
Total VP	422 891				

Scénario FAP

		ACTIVITE			ACTIVITE			ACTIVITE	
		Trafic			Trafic			Trafic	
		10 ⁶ veh.km			10 ⁶ veh.km			10 ⁶ veh.km	
VP essence		avant Euro 1	-	VUL essence		avant Euro 1	305	Bus et Cars diesel	
	Euro 1	3 243		Euro 1	412		avant Euro I	22	
	Euro 2	2 540		Euro 2	825		Euro I	22	
	Euro 3	2 820		Euro 3	439		Euro II	60	
	Euro 4	13 470		Euro 4	465		Euro III	289	
	Euro 5	4 290		Euro 5	404		Euro IV	228	
	Euro 6	35 535		Euro 6	5 000		Euro V	413	
	Euro 6c	35 535		Euro 6c	5 000		Euro VI	2 561	
Total VP essence		97 434	Total VUL essence		12 851	Total Bus et Cars diesel		3 596	
VP diesel		avant Euro 1	-	VUL diesel		avant Euro 1	1 157	Bus et Cars GNV	
	Euro 1	7 733		Euro 1	1 161		avant Euro I	-	
	Euro 2	11 339		Euro 2	4 626		Euro I	-	
	Euro 3	4 437		Euro 3	5 706		Euro II	-	
	Euro 4	57 060		Euro 4	14 092		Euro III	21	
	Euro 5	20 284		Euro 5	1 728		Euro IV	7.1	
	Euro 6	111 036		Euro 6	34 378		Euro V	15	
	Euro 6c	111 036		Euro 6c	34 378		Euro VI	125	
Total VP diesel		322 925	Total VUL diesel		97 227	Total Bus et Cars GNV		169	
			Total B&C					3 765	
VP gpl		avant Euro 1	-	Total VUL				110 078	
	Euro 1	123				Total PL+B&C		31 710	
	Euro 2	224							
	Euro 3	314							
	Euro 4	476							
	Euro 5	89							
	Euro 6	217							
	Euro 6c	217							
Total VP gpl		1 660							
			Total PL essence		6.4	Total 2 roues essence		16 642	
VP Electrique		avant Euro 1	-						
	Euro 1	-							
	Euro 2	-							
	Euro 3	-							
	Euro 4	-							
	Euro 5	-							
	Euro 6	217							
	Euro 6c	217							
Total VP electrique		434		Total PL diesel				27 939	
VP GNV		avant Euro 1	-	Total PL				27 945	
	Euro 1	-							
	Euro 2	3.9							
	Euro 3	-							
	Euro 4	-							
	Euro 5	-							
	Euro 6	217							
	Euro 6c	217							
Total VP GNV		438							
Total VP		422 891							

Annexe 11 : Facteurs d'émission des véhicules routiers pour la France et selon les scénarios

Dans les tableaux ci-dessous, les abréviations suivantes ont été utilisées :

- AEP : Acidification, Eutrophisation, pollution Photochimique (famille regroupant les polluants SO₂, NO_x, COV, CO et NH₃)
- PM : Matière particulaire (famille regroupant les émissions massiques des différentes tailles de particules)
- comb : émissions issues de la combustion
- evap : émissions de COVNM liées à l'évaporation de l'essence
- Abr : émissions issues de l'abrasion de pneus, freins et du revêtement routier.

Facteurs d'émission du scénario de référence

- Voitures particulières

	AEP						PM			
	SO2	NOx	NH3	COVNM	COVNM	CO	PM10		PM2.5	
	comb	comb	comb	comb	evap	comb	comb	Abr	comb	Abr
	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km
VP essence										
avant Euro 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 1	1.24	510.38	88.00	647.69	102.33	5 470.63	3.52	20.93	3.52	11.55
Euro 2	1.19	289.39	98.62	315.71	80.88	3 445.73	3.52	20.92	3.52	11.54
Euro 3	1.18	116.92	30.02	160.45	58.59	3 146.24	2.29	20.87	2.29	11.52
Euro 4	1.15	66.20	28.61	85.10	49.77	1 034.13	2.27	21.02	2.27	11.59
Euro 5	0.99	51.25	14.61	74.46	44.63	998.03	2.46	21.14	2.46	11.64
Euro 6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 6c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total VP essence	1.14	141.97	40.98	177.62	59.34	2 178.93	2.59	20.99	2.59	11.58
VP diesel										
avant Euro 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 1	1.12	671.27	0.61	49.01	-	341.35	87.84	20.33	87.84	11.26
Euro 2	1.14	682.88	0.61	43.75	-	213.25	58.91	20.30	58.91	11.25
Euro 3	1.08	768.28	0.61	21.82	-	69.05	51.43	20.32	51.43	11.26
Euro 4	1.04	561.57	0.61	12.48	-	66.19	45.61	20.36	45.61	11.28
Euro 5	1.01	589.95	1.17	5.59	-	46.35	4.65	20.37	4.65	11.28
Euro 6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 6c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total VP diesel	1.05	622.99	0.74	16.81	-	85.56	40.47	20.35	40.47	11.27
VP gpl										
avant Euro 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 1	6.05	530.53	-	1 066.56	-	5 445.32	-	20.51	-	11.35
Euro 2	6.05	269.17	-	562.32	-	3 822.40	-	20.51	-	11.35
Euro 3	6.05	144.70	-	324.55	-	4 032.46	-	20.51	-	11.35
Euro 4	6.05	79.83	-	176.65	-	1 502.61	-	20.51	-	11.35
Euro 5	6.05	79.83	-	176.65	-	1 386.64	-	20.51	-	11.35
Euro 6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 6c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total VP gpl	6.05	155.81	-	332.38	-	2 636.81	-	20.51	-	11.35
VP Electrique										
avant Euro 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 2	-	-	-	-	-	-	-	26.81	-	14.30
Euro 3	-	-	-	-	-	-	-	26.81	-	14.30
Euro 4	-	-	-	-	-	-	-	26.81	-	14.30
Euro 5	-	-	-	-	-	-	-	26.81	-	14.30
Euro 6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 6c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total VP electrique	-	-	-	-	-	-	-	26.81	-	14.30
VP GNV										
avant Euro 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 1	1.47	586.56	77.74	1 016.60	-	4 742.82	-	20.51	-	11.35
Euro 2	1.38	326.65	88.11	465.06	-	2 859.59	-	20.51	-	11.35
Euro 3	1.35	132.21	30.37	229.56	-	2 706.56	-	20.51	-	11.35
Euro 4	1.35	73.32	30.37	136.80	-	911.48	-	20.51	-	11.35
Euro 5	1.39	61.17	13.90	102.87	-	884.27	-	20.51	-	11.35
Euro 6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 6c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total VP GNV	1.37	159.62	38.92	265.47	-	1 852.77	-	20.51	-	11.35
Total VP	1.09	512.39	9.82	54.39	13.38	568.20	31.74	20.49	31.74	11.34

Facteurs d'émission du scénario de référence

- Véhicules utilitaires légers et camions

	AEP						PM				
	SO2	NOx	NH3	COVNM	COVNM	CO	PM10		PM2.5		
	comb	comb	comb	comb	evap	comb	comb	Abr	comb	Abr	
	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	
VUL essence											
avant Euro 1	1.36	3 319.56	2.00	1 830.30	2 433.78	26 432.43	4.33	25.31	4.33	14.32	
Euro 1	1.28	637.87	73.53	648.95	109.84	9 913.11	3.38	25.30	3.38	14.32	
Euro 2	1.26	284.42	83.44	298.93	93.10	6 803.32	3.38	25.30	3.38	14.32	
Euro 3	1.22	153.90	38.21	161.95	55.74	5 890.48	2.32	25.24	2.32	14.29	
Euro 4	1.15	79.13	38.57	86.29	45.52	2 176.37	2.33	25.02	2.33	14.19	
Euro 5	1.21	46.69	19.55	86.85	45.84	1 872.22	3.75	24.83	3.75	14.10	
Euro 6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Euro 6c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Total VUL essence	1.23	504.07	45.25	373.93	293.41	7 039.52	3.02	25.16	3.02	14.25	

VUL diesel											
avant Euro 1	1.51	1 524.31	0.61	149.23	-	1 323.16	369.38	26.31	369.38	14.78	
Euro 1	1.51	1 261.14	0.61	153.19	-	596.57	124.73	26.16	124.73	14.71	
Euro 2	1.52	1 299.08	0.61	159.37	-	600.31	133.06	25.95	133.06	14.62	
Euro 3	1.52	1 094.79	0.61	104.62	-	526.03	101.85	25.84	101.85	14.56	
Euro 4	1.52	900.79	0.61	39.46	-	430.80	71.38	25.67	71.38	14.48	
Euro 5	1.57	905.89	1.17	14.05	-	67.49	2.36	25.61	2.36	14.46	
Euro 6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Euro 6c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Total VUL diesel	1.53	1 012.32	0.72	68.14	-	429.35	80.52	25.75	80.52	14.52	

Total VUL	1.50	956.57	5.60	101.69	32.19	1 154.45	72.02	25.69	72.02	14.49
------------------	-------------	---------------	-------------	---------------	--------------	-----------------	--------------	--------------	--------------	--------------

	AEP						PM				
	SO2	NOx	NH3	COVNM	COVNM	CO	PM10		PM2.5		
	comb	comb	comb	comb	evap	comb	comb	Abr	comb	Abr	
	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	
PL essence											
avant Euro I	3.25	4 726.35	2.00	2 752.58	-	3 499.35	5.52	83.94	5.52	43.42	
Euro I	3.25	4 726.35	2.00	2 752.58	-	3 499.35	5.52	83.94	5.52	43.42	
Euro II	3.18	4 726.35	2.00	2 752.58	-	3 499.35	5.52	83.94	5.52	43.42	
Euro III	3.09	4 676.23	2.00	2 884.38	-	3 499.35	5.52	83.94	5.52	43.42	
Euro IV	2.96	4 660.38	2.00	2 934.91	-	3 499.35	5.52	83.94	5.52	43.42	
Euro V	2.85	4 660.38	2.00	2 934.91	-	3 499.35	5.52	83.94	5.52	43.42	
Euro VI	2.69	4 660.38	2.00	2 934.91	-	3 499.35	5.52	83.94	5.52	43.42	
Total PL essence	2.95	4 667.29	2.00	2 914.23	-	3 499.35	5.52	83.94	5.52	43.42	

PL diesel											
avant Euro I	5.61	11 756.50	3.00	1 327.53	-	3 415.40	460.08	104.55	460.08	56.14	
Euro I	4.89	7 599.94	3.00	539.42	-	1 753.18	296.50	105.07	296.50	56.56	
Euro II	5.04	8 795.31	3.00	371.66	-	1 550.29	153.50	105.72	153.50	57.22	
Euro III	5.78	7 771.09	3.00	343.06	-	1 989.84	168.62	105.90	168.62	57.97	
Euro IV	6.08	5 803.19	3.00	57.10	-	1 018.35	42.77	106.14	42.77	58.68	
Euro V	6.04	4 478.69	11.00	78.07	-	1 497.31	43.22	105.20	43.22	58.29	
Euro VI	6.10	403.72	9.00	-	-	1 051.34	4.44	105.16	4.44	58.38	
Total PL diesel	5.91	5 850.04	6.35	156.26	-	1 475.55	80.56	105.65	80.56	58.23	

Total PL	5.91	5 849.77	6.35	156.91	-	1 476.02	80.54	105.64	80.54	58.23
-----------------	-------------	-----------------	-------------	---------------	----------	-----------------	--------------	---------------	--------------	--------------

Facteurs d'émission du scénario de référence

- autobus et autocars, et deux-roues

	AEP						PM			
	SO2	NOx	NH3	COVNM	COVNM	CO	PM10		PM2.5	
	comb	comb	comb	comb	evap	comb	comb	Abr	comb	Abr
	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km
Bus et Cars diesel										
avant Euro I	6.56	12 259.77	3.00	1 456.02	-	4 103.50	602.53	97.45	602.53	50.59
Euro I	5.67	8 857.06	3.00	802.42	-	2 529.33	391.33	97.46	391.33	50.59
Euro II	5.53	9 925.73	3.00	552.56	-	2 212.67	180.58	97.45	180.58	50.58
Euro III	5.79	8 838.60	3.00	521.67	-	2 627.85	209.73	97.39	209.73	50.64
Euro IV	5.30	5 512.59	3.00	63.22	-	1 264.87	44.70	97.56	44.70	50.80
Euro V	5.40	6 387.56	10.83	99.34	-	1 849.03	48.41	98.24	48.41	51.12
Euro VI	5.40	566.32	9.00	-	-	1 339.22	4.66	97.77	4.66	50.82
Total Bus et Cars diesel	5.51	7 308.99	5.71	295.58	-	1 995.91	123.65	97.73	123.65	50.83

Bus et Cars GNV										
avant Euro I	13.76	16 500.00	-	200.00	-	8 400.00	-	104.53	-	55.49
Euro I	13.76	16 500.00	-	200.00	-	8 400.00	-	104.53	-	55.49
Euro II	12.05	15 000.00	-	200.00	-	2 700.00	-	104.53	-	55.49
Euro III	11.28	10 000.00	-	50.00	-	1 000.00	-	104.53	-	55.49
Euro IV	11.28	2 500.00	-	20.00	-	1 000.00	-	104.53	-	55.49
Euro V	11.28	2 500.00	-	20.00	-	1 000.00	-	104.53	-	55.49
Euro VI	11.28	2 500.00	-	20.00	-	1 000.00	-	104.53	-	55.49
Total Bus et Cars GNV	11.35	5 570.61	-	41.42	-	1 167.03	-	104.53	-	55.49

Total B&C	5.76	7 234.98	5.47	284.76	-	1 960.62	118.38	98.02	118.38	51.03
----------------------	-------------	-----------------	-------------	---------------	----------	-----------------	---------------	--------------	---------------	--------------

	AEP						PM			
	SO2	NOx	NH3	COVNM	COVNM	CO	PM10		PM2.5	
	comb	comb	comb	comb	evap	comb	comb	Abr	comb	Abr
	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km
2 roues essence										
avant Euro 1	0.77	276.48	1.84	3 272.36	321.15	20 343.56	58.35	10.35	58.35	5.55
Euro 1	0.74	335.79	1.99	1 145.00	288.43	12 653.07	24.54	9.93	24.54	5.35
Euro 2	0.53	214.03	1.47	1 392.50	232.32	4 081.78	15.27	11.33	15.27	6.00
Euro 3	0.67	184.14	2.00	317.72	268.81	5 148.80	5.28	9.85	5.28	5.32
Euro 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total 2 roues essence	0.64	211.87	1.85	751.73	260.96	5 857.73	10.90	10.30	10.90	5.52

Facteurs d'émission du scénario FAP

- Voitures particulières

	AEP						PM			
	SO2	NOx	NH3	COVNM	COVNM	CO	PM10		PM2.5	
	comb	comb	comb	comb	evap	comb	comb	Abr	comb	Abr
	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km
VP essence										
avant Euro 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 1	0.53	542.24	77.09	676.14	48.12	5 750.25	3.45	20.23	3.45	11.22
Euro 2	0.52	295.12	89.42	344.25	39.82	3 304.72	3.41	20.15	3.41	11.18
Euro 3	0.50	116.07	31.68	179.74	30.57	2 887.53	2.20	20.06	2.20	11.14
Euro 4	0.49	65.15	27.47	95.57	44.46	1 013.94	2.15	20.90	2.15	11.53
Euro 5	0.40	47.50	13.54	78.02	48.73	890.97	2.22	21.11	2.22	11.63
Euro 6	0.39	53.73	16.13	90.06	38.81	939.73	2.50	20.83	2.50	11.50
Euro 6c	0.39	55.60	16.36	89.01	33.26	941.23	2.65	20.82	2.65	11.49
Total VP essence										

VP diesel										
avant Euro 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 1	0.38	689.41	0.62	52.24	-	370.38	100.69	19.64	100.69	10.94
Euro 2	0.40	701.81	0.62	49.69	-	223.87	62.92	19.77	62.92	11.00
Euro 3	0.40	774.02	0.62	30.65	-	68.63	53.23	19.67	53.23	10.96
Euro 4	0.34	574.62	0.62	13.14	-	70.28	45.33	20.17	45.33	11.19
Euro 5	0.32	596.74	1.17	5.76	-	47.55	4.63	20.21	4.63	11.21
Euro 6	0.28	206.11	4.32	5.62	-	68.24	2.16	20.06	2.16	11.14
Euro 6c	0.28	117.18	4.32	5.62	-	68.25	2.15	20.04	2.15	11.13
Total VP diesel										

VP gpl										
avant Euro 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 1	2.25	539.43	-	1 019.44	-	5 646.35	-	19.91	-	11.07
Euro 2	2.23	273.85	-	536.00	-	3 899.67	-	20.06	-	11.14
Euro 3	2.21	146.21	-	309.31	-	4 133.18	-	20.23	-	11.22
Euro 4	2.20	80.20	-	169.32	-	1 511.96	-	20.37	-	11.29
Euro 5	2.20	79.40	-	171.22	-	1 362.14	-	20.40	-	11.30
Euro 6	2.18	79.31	-	171.32	-	1 243.41	-	20.38	-	11.29
Euro 6c	2.17	53.31	-	171.26	-	1 245.02	-	20.38	-	11.29
Total VP gpl										

VP Electrique										
avant Euro 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 6	-	-	-	-	-	-	-	26.54	-	14.17
Euro 6c	-	-	-	-	-	-	-	26.51	-	14.15
Total VP electrique										

VP GNV										
avant Euro 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 2	0.49	331.36	88.93	449.03	-	2 817.77	-	20.19	-	11.20
Euro 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 6	0.49	62.38	13.47	104.67	-	811.32	-	20.38	-	11.29
Euro 6c	0.49	62.37	13.43	108.38	-	813.00	-	20.38	-	11.29
Total VP GNV										

Facteurs d'émission du scénario FAP

- Véhicules utilitaires légers et camions

	AEP						PM			
	SO2	NOx	NH3	COVNM	COVNM	CO	PM10		PM2.5	
	comb	comb	comb	comb	evap	comb	comb	Abr	comb	Abr
	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km
VUL essence										
avant Euro 1	0.06	299.83	0.18	216.45	102.29	3 059.41	1.57	2.24	1.57	1.27
Euro 1	0.06	73.82	7.52	82.47	6.69	1 326.90	0.38	2.87	0.38	1.63
Euro 2	0.46	276.52	76.85	326.19	52.95	7 400.24	3.30	24.87	3.30	14.12
Euro 3	0.42	152.28	37.17	173.68	40.01	5 956.55	2.22	25.08	2.22	14.21
Euro 4	0.34	79.71	39.27	102.17	58.79	2 112.63	2.23	24.34	2.23	13.87
Euro 5	0.30	46.42	19.86	103.76	60.91	1 823.65	3.74	24.21	3.74	13.81
Euro 6	0.33	44.76	18.61	87.81	32.50	1 677.05	3.16	23.42	3.16	13.26
Euro 6c	0.32	44.58	18.78	85.29	26.00	1 668.52	3.14	23.33	3.14	13.21
Total VUL essence										

VUL diesel										
avant Euro 1	0.42	1 662.99	0.62	160.49	-	1 464.57	420.41	24.88	420.41	14.10
Euro 1	0.45	1 289.93	0.62	156.71	-	649.05	139.89	25.96	139.89	14.61
Euro 2	0.40	1 326.43	0.62	160.12	-	642.44	145.26	25.54	145.26	14.42
Euro 3	0.38	1 084.54	0.60	101.28	-	531.88	103.09	25.08	103.09	14.15
Euro 4	0.35	903.68	0.61	38.31	-	439.49	71.08	24.92	71.08	14.11
Euro 5	0.22	587.24	0.74	8.19	-	39.28	1.39	15.76	1.39	8.94
Euro 6	0.34	312.35	4.19	12.42	-	58.93	2.00	24.36	2.00	13.80
Euro 6c	0.32	171.56	4.01	11.88	-	56.36	1.92	23.25	1.92	13.18
Total VUL diesel										

	AEP						PM			
	SO2	NOx	NH3	COVNM	COVNM	CO	PM10		PM2.5	
	comb	comb	comb	comb	evap	comb	comb	Abr	comb	Abr
	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km
PL essence										
avant Euro I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro II	0.71	4 753.62	2.00	2 728.74	-	3 471.40	6.31	82.58	6.31	42.92
Euro III	0.68	4 708.56	2.00	2 833.71	-	3 471.23	5.44	82.80	5.44	43.02
Euro IV	0.65	4 677.04	2.00	2 901.32	-	3 481.69	5.47	83.65	5.47	43.40
Euro V	0.62	4 661.35	2.00	2 917.45	-	3 487.46	5.49	84.27	5.49	43.67
Euro VI	0.56	4 649.48	2.00	2 930.44	-	3 492.20	5.51	84.35	5.51	43.60
Total PL essence										

PL diesel										
avant Euro I	1.73	17 568.41	3.00	583.45	-	2 728.08	548.96	102.14	548.96	57.60
Euro I	2.18	6 200.68	3.00	406.34	-	1 330.49	231.81	99.83	231.81	53.20
Euro II	2.61	8 569.06	3.00	349.71	-	1 477.23	149.37	103.60	149.37	55.76
Euro III	2.82	7 096.58	3.00	336.22	-	1 838.07	158.84	104.58	158.84	56.54
Euro IV	2.14	6 600.89	3.00	63.91	-	1 119.69	48.03	105.71	48.03	59.22
Euro V	1.65	4 507.16	11.00	89.75	-	1 367.41	43.82	102.27	43.82	57.20
Euro VI	2.16	419.76	9.00	-	-	1 038.40	4.29	104.70	4.29	57.88
Total PL diesel										

Facteurs d'émission du scénario FAP

- autobus et autocars, et deux-roues

	AEP						PM			
	SO2	NOx	NH3	COVNM	COVNM	CO	PM10		PM2.5	
	comb	comb	comb	comb	evap	comb	comb	Abr	comb	Abr
	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km
Bus et Cars diesel										
avant Euro I	5.93	13 931.78	3.00	2 027.26	-	5 504.44	781.97	104.90	781.97	53.90
Euro I	4.93	9 635.90	3.00	805.70	-	2 840.16	439.13	101.34	439.13	52.07
Euro II	4.53	10 427.65	3.00	559.78	-	2 451.40	194.52	99.69	194.52	51.12
Euro III	3.41	8 410.21	3.00	504.06	-	2 509.88	204.32	95.23	204.32	49.72
Euro IV	2.43	4 931.39	3.00	57.88	-	1 174.44	40.20	93.63	40.20	49.40
Euro V	3.18	6 005.37	10.86	114.36	-	1 647.56	47.24	97.75	47.24	51.27
Euro VI	3.34	585.15	9.00	-	-	1 343.79	4.63	96.86	4.63	50.35
Total Bus et Cars diesel										

Bus et Cars GNV										
avant Euro I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro II	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro III	9.08	10 000.00	-	50.00	-	1 000.00	-	104.53	-	55.49
Euro IV	8.99	2 500.00	-	20.00	-	1 000.00	-	104.53	-	55.49
Euro V	8.91	2 500.00	-	20.00	-	1 000.00	-	104.53	-	55.49
Euro VI	8.84	2 500.00	-	20.00	-	1 000.00	-	104.53	-	55.49
Total Bus et Cars GNV										

	AEP						PM			
	SO2	NOx	NH3	COVNM	COVNM	CO	PM10		PM2.5	
	comb	comb	comb	comb	evap	comb	comb	Abr	comb	Abr
	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km
2 roues essence										
avant Euro 1	0.27	299.75	1.78	3 424.67	253.89	20 357.12	63.46	9.98	63.46	5.37
Euro 1	0.25	334.07	1.97	1 242.46	178.07	13 013.52	25.67	9.76	25.67	5.27
Euro 2	0.25	225.64	1.49	1 575.95	191.46	4 156.84	17.12	11.19	17.12	5.93
Euro 3	0.28	167.56	1.04	1 062.05	222.91	2 369.74	10.77	12.39	10.77	6.48
Euro 4	0.22	85.74	2.00	380.37	209.64	2 010.61	5.27	9.94	5.27	5.35
Euro 5	0.22	73.13	2.00	382.91	208.35	1 020.08	5.30	9.95	5.30	5.36
Total 2 roues essence										

Facteurs d'émission du scénario Essence

- Voitures particulières

	AEP						PM			
	SO2	NOx	NH3	COVNM	COVNM	CO	PM10		PM2.5	
	comb	comb	comb	comb	evap	comb	comb	Abr	comb	Abr
	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km
VP essence										
avant Euro 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 4	0.22	14.93	0.07	16.92	47.90	29.32	1.07	20.23	1.07	11.22
Euro 5	0.43	51.72	15.78	88.01	46.73	994.29	2.39	21.09	2.39	11.62
Euro 6	0.40	53.89	16.22	90.46	38.77	944.56	2.51	20.83	2.51	11.50
Euro 6c	0.39	55.77	16.45	89.41	33.23	946.07	2.66	20.82	2.66	11.49
Total VP essence										

VP diesel										
avant Euro 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 1	0.38	689.41	0.62	52.24	-	370.38	100.69	19.64	100.69	10.94
Euro 2	0.40	701.81	0.62	49.69	-	223.87	62.92	19.77	62.92	11.00
Euro 3	0.40	774.02	0.62	30.65	-	68.63	53.23	19.67	53.23	10.96
Euro 4	0.34	574.62	0.62	13.14	-	70.28	45.33	20.17	45.33	11.19
Euro 5	0.32	596.35	1.17	5.76	-	47.38	4.62	20.15	4.62	11.18
Euro 6	0.28	207.01	4.30	5.61	-	68.07	2.17	20.06	2.17	11.14
Euro 6c	0.28	117.37	4.30	5.61	-	68.08	2.15	20.04	2.15	11.13
Total VP diesel										

VP gpl										
avant Euro 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 1	2.25	539.43	-	1 019.44	-	5 646.35	-	19.91	-	11.07
Euro 2	2.23	273.85	-	536.00	-	3 899.67	-	20.06	-	11.14
Euro 3	2.21	146.21	-	309.31	-	4 133.18	-	20.23	-	11.22
Euro 4	2.20	80.20	-	169.32	-	1 511.96	-	20.37	-	11.29
Euro 5	2.20	79.40	-	171.22	-	1 362.14	-	20.40	-	11.30
Euro 6	2.18	79.31	-	171.32	-	1 243.41	-	20.38	-	11.29
Euro 6c	2.17	53.31	-	171.26	-	1 245.02	-	20.38	-	11.29
Total VP gpl										

VP Electrique										
avant Euro 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 6	-	-	-	-	-	-	-	26.54	-	14.17
Euro 6c	-	-	-	-	-	-	-	26.51	-	14.15
Total VP electrique										

VP GNV										
avant Euro 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 2	0.49	331.36	88.93	449.03	-	2 817.77	-	20.19	-	11.20
Euro 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 6	0.49	62.38	13.47	104.67	-	811.32	-	20.38	-	11.29
Euro 6c	0.49	62.37	13.43	108.38	-	813.00	-	20.38	-	11.29
Total VP GNV										

Facteurs d'émission du scénario Essence

- Véhicules utilitaires légers et camions

	AEP						PM			
	SO2	NOx	NH3	COVNM	COVNM	CO	PM10		PM2.5	
	comb	comb	comb	comb	evap	comb	comb	Abr	comb	Abr
	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km
VUL essence										
avant Euro 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro 5	0.34	46.59	20.27	100.97	52.50	1 819.15	3.70	24.61	3.70	13.99
Euro 6	0.36	48.16	20.02	94.47	34.97	1 804.20	3.40	25.19	3.40	14.26
Euro 6c	0.28	39.21	16.52	75.03	22.87	1 467.69	2.76	20.53	2.76	11.62
Total VUL essence										

VUL diesel										
avant Euro 1	0.42	1 662.99	0.62	160.49	-	1 464.57	420.41	24.88	420.41	14.10
Euro 1	0.45	1 289.93	0.62	156.71	-	649.05	139.89	25.96	139.89	14.61
Euro 2	0.40	1 326.43	0.62	160.12	-	642.44	145.26	25.54	145.26	14.42
Euro 3	0.38	1 084.54	0.60	101.28	-	531.88	103.09	25.08	103.09	14.15
Euro 4	0.35	903.68	0.61	38.31	-	439.49	71.08	24.92	71.08	14.11
Euro 5	0.34	878.42	1.12	12.31	-	59.03	2.09	23.83	2.09	13.51
Euro 6	0.34	312.35	4.19	12.42	-	58.93	2.00	24.36	2.00	13.80
Euro 6c	0.32	171.56	4.01	11.88	-	56.36	1.92	23.25	1.92	13.18
Total VUL diesel										

	AEP						PM			
	SO2	NOx	NH3	COVNM	COVNM	CO	PM10		PM2.5	
	comb	comb	comb	comb	evap	comb	comb	Abr	comb	Abr
	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km
PL essence										
avant Euro I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro II	0.71	4 753.62	2.00	2 728.74	-	3 471.40	6.31	82.58	6.31	42.92
Euro III	0.68	4 708.56	2.00	2 833.71	-	3 471.23	5.44	82.80	5.44	43.02
Euro IV	0.65	4 677.04	2.00	2 901.32	-	3 481.69	5.47	83.65	5.47	43.40
Euro V	0.62	4 661.35	2.00	2 917.45	-	3 487.46	5.49	84.27	5.49	43.67
Euro VI	0.56	4 649.48	2.00	2 930.44	-	3 492.20	5.51	84.35	5.51	43.60
Total PL essence										

PL diesel										
avant Euro I	1.73	17 568.41	3.00	583.45	-	2 728.08	548.96	102.14	548.96	57.60
Euro I	2.18	6 200.68	3.00	406.34	-	1 330.49	231.81	99.83	231.81	53.20
Euro II	2.61	8 569.06	3.00	349.71	-	1 477.23	149.37	103.60	149.37	55.76
Euro III	2.82	7 096.58	3.00	336.22	-	1 838.07	158.84	104.58	158.84	56.54
Euro IV	2.14	6 600.89	3.00	63.91	-	1 119.69	48.03	105.71	48.03	59.22
Euro V	1.65	4 507.16	11.00	89.75	-	1 367.41	43.82	102.27	43.82	57.20
Euro VI	2.16	419.76	9.00	-	-	1 038.40	4.29	104.70	4.29	57.88
Total PL diesel										

Facteurs d'émission du scénario Essence

- autobus et autocars, et deux-roues

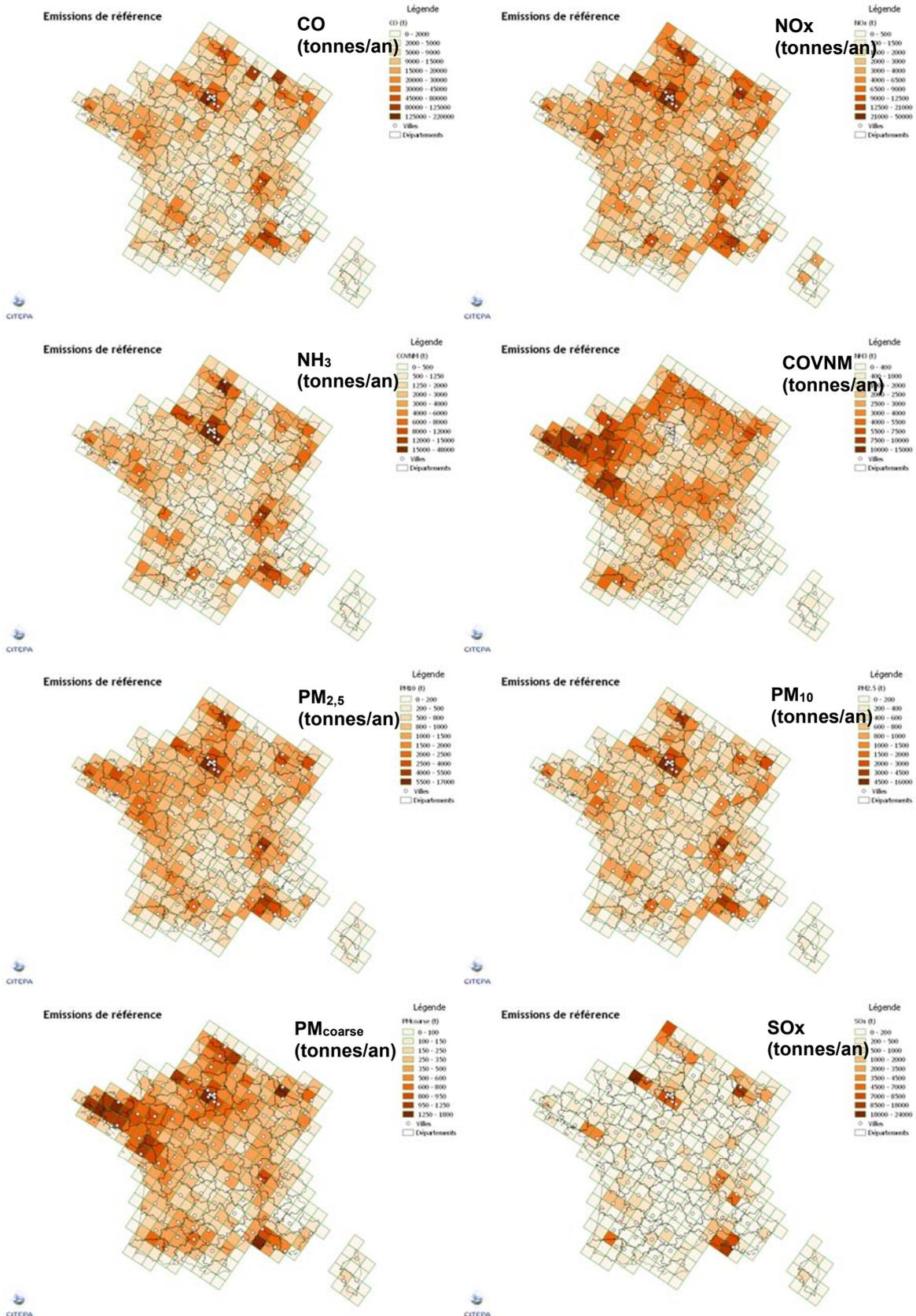
	AEP						PM			
	SO2	NOx	NH3	COVNM	COVNM	CO	PM10		PM2.5	
	comb	comb	comb	comb	evap	comb	comb	Abr	comb	Abr
	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km
Bus et Cars diesel										
avant Euro I	5.93	13 931.78	3.00	2 027.26	-	5 504.44	781.97	104.90	781.97	53.90
Euro I	4.93	9 635.90	3.00	805.70	-	2 840.16	439.13	101.34	439.13	52.07
Euro II	4.53	10 427.65	3.00	559.78	-	2 451.40	194.52	99.69	194.52	51.12
Euro III	3.41	8 410.21	3.00	504.06	-	2 509.88	204.32	95.23	204.32	49.72
Euro IV	2.43	4 931.39	3.00	57.88	-	1 174.44	40.20	93.63	40.20	49.40
Euro V	3.18	6 005.37	10.86	114.36	-	1 647.56	47.24	97.75	47.24	51.27
Euro VI	3.34	585.15	9.00	-	-	1 343.79	4.63	96.86	4.63	50.35
Total Bus et Cars diesel										

Bus et Cars GNV										
avant Euro I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro II	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Euro III	9.08	10 000.00	-	50.00	-	1 000.00	-	104.53	-	55.49
Euro IV	8.99	2 500.00	-	20.00	-	1 000.00	-	104.53	-	55.49
Euro V	8.91	2 500.00	-	20.00	-	1 000.00	-	104.53	-	55.49
Euro VI	8.84	2 500.00	-	20.00	-	1 000.00	-	104.53	-	55.49
Total Bus et Cars GNV										

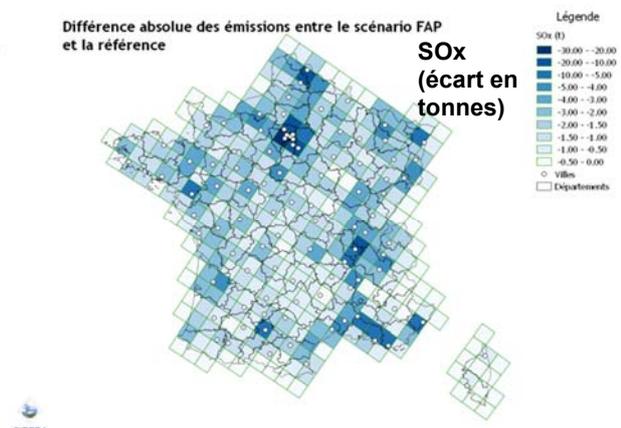
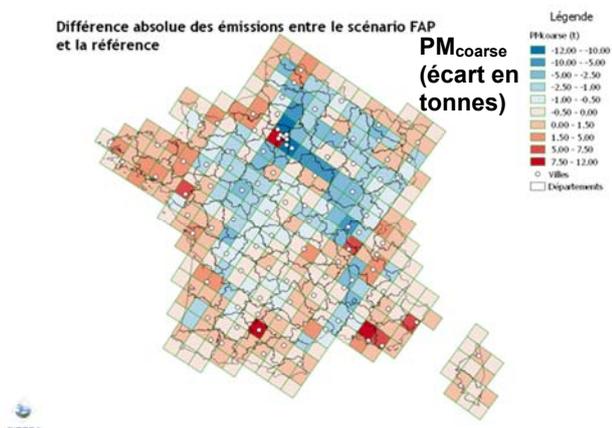
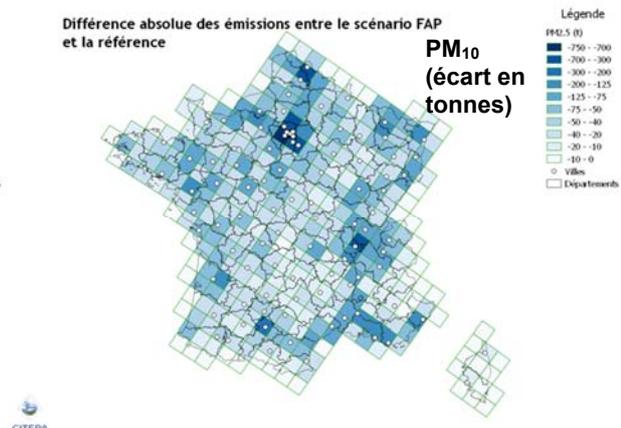
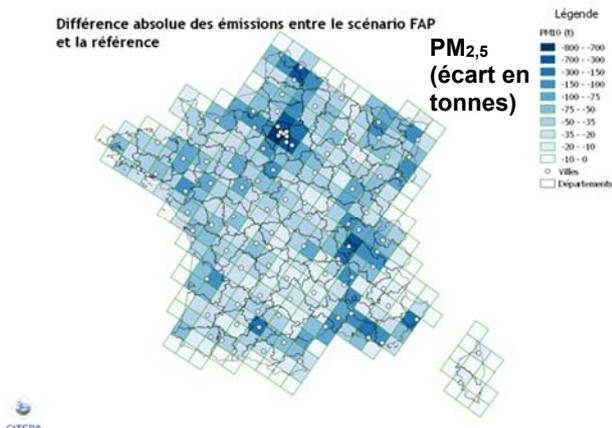
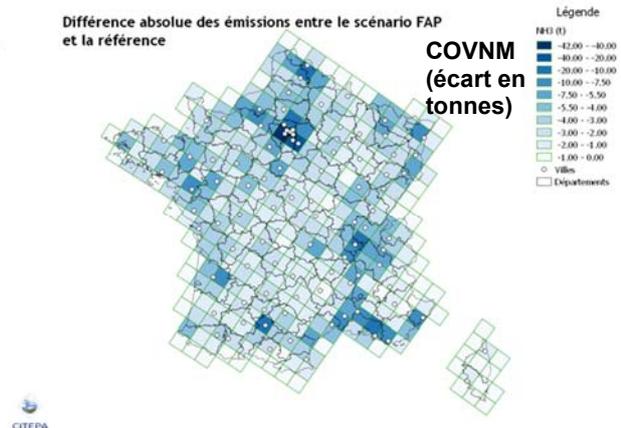
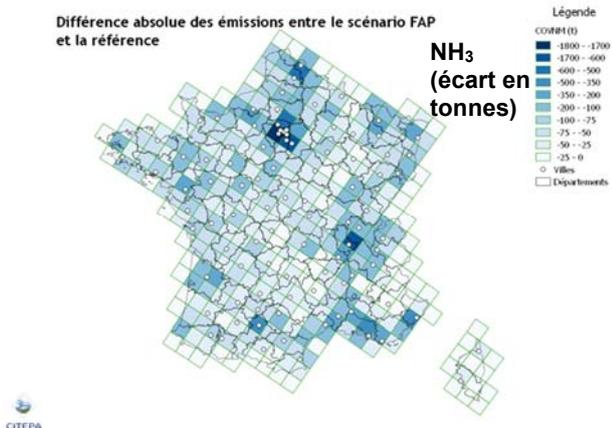
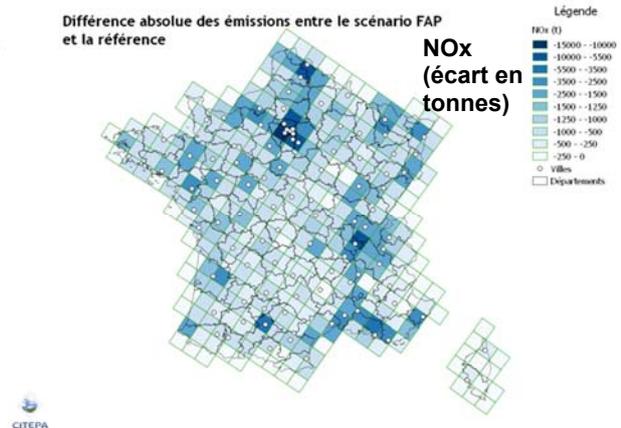
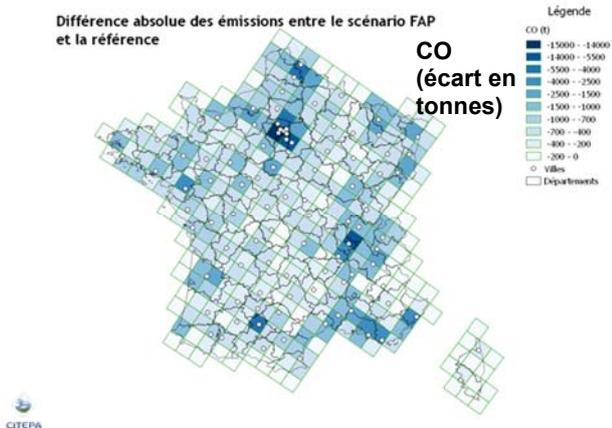
	AEP						PM			
	SO2	NOx	NH3	COVNM	COVNM	CO	PM10		PM2.5	
	comb	comb	comb	comb	evap	comb	comb	Abr	comb	Abr
	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km
2 roues essence										
avant Euro 1	0.27	299.75	1.78	3 424.67	253.89	20 357.12	63.46	9.98	63.46	5.37
Euro 1	0.25	334.07	1.97	1 242.46	178.07	13 013.52	25.67	9.76	25.67	5.27
Euro 2	0.25	225.64	1.49	1 575.95	191.46	4 156.84	17.12	11.19	17.12	5.93
Euro 3	0.28	167.56	1.04	1 062.05	222.91	2 369.74	10.77	12.39	10.77	6.48
Euro 4	0.22	85.74	2.00	380.37	209.64	2 010.61	5.27	9.94	5.27	5.35
Euro 5	0.22	73.13	2.00	382.91	208.35	1 020.08	5.30	9.95	5.30	5.36
Total 2 roues essence										

Annexe 12 : Cartographie des émissions tous secteurs, maillage EMEP sur la France

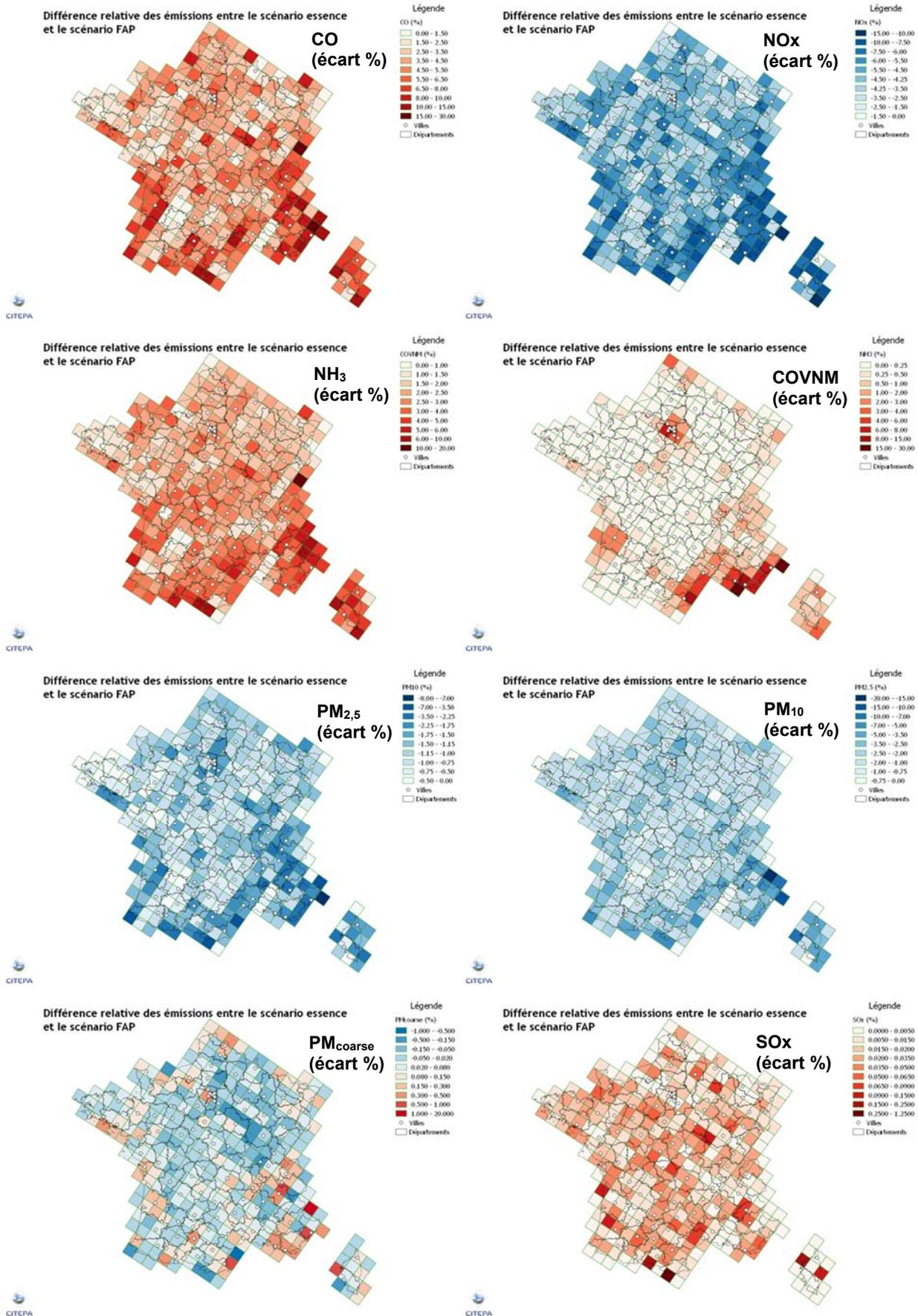
Émissions totales annuelles du scénario de référence



Différences absolues entre les émissions du scénario FAP et la Référence



Différences relatives entre les émissions des scénarios Essence et FAP



Annexe 13 : Plan National de Réduction des Émissions de Polluants Atmosphériques (PREPA) - Analyse bibliographique

I. Introduction, objectifs

Les travaux du PREPA ont été menés en vue de la définition du Plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques afin d'améliorer la qualité de l'air sur le territoire national, et ainsi de protéger la population et l'environnement. À l'issue de ces travaux, le « PREPA » est ainsi constitué d'un décret fixant des objectifs de réduction aux horizons 2020, 2025 et 2030 et d'un arrêté déterminant les actions de réductions à renforcer et à mettre en œuvre (PREPA 2017).

L'élaboration de ce PREPA repose sur les travaux intitulés « aide à la décision pour l'élaboration du PREPA » réalisés entre 2015 et 2016. Ceux-ci sont récapitulés dans une synthèse (MEEM 2016a), un rapport principal (MEEM 2016b), complétés d'annexes sur les « fiches mesures » (c'est-à-dire les mesures de réduction des émissions envisagées pour chacun des différents secteurs d'activité et dans le cadre de différents scénarios), résumées (MEEM 2016c) ou détaillées (MEEM 2016d), ces dernières incluant les résultats d'évaluation (nombreux critères évoqués ci-après) pour chacune des mesures envisagées.

Un rapport complémentaire décrit plus spécifiquement l'analyse (ou évaluation ex-ante) des émissions, concentrations et impacts sanitaires du projet du PREPA (MEEM 2017).

L'annexe D récapitule la méthodologie employée (MEEM 2016e), mais plusieurs aspects n'y figurent pas et sont décrits soit dans le rapport principal, soit dans le rapport d'évaluation ex-ante (MEEM 2016b et MEEM 2017).

Enfin le rapport (MEEM et al. 2017) propose une évaluation globale du PREPA (scénario combinant les mesures retenues dans les travaux précédant en raison de leur efficacité ou pertinence, et après consultation) sur l'ensemble des impacts environnementaux. Pour l'évaluation des émissions, concentrations, expositions et impacts sanitaires liés à la pollution de l'air, ce rapport reprend textuellement les éléments du rapport précédant (MEEM 2017).

Ce sont donc 7 rapports et plus de 1200 pages qui récapitulent ces travaux. Ces documents ont été analysés et sont synthétisés dans les chapitres suivants. La description des méthodes étant parfois assez succincte et répartie entre plusieurs documents, il est possible qu'il subsiste des imprécisions dans ce qui suit.

II. Principaux aspects méthodologiques

Évaluation aux horizons 2020 et 2030, selon un scénario tendanciel

Les analyses préparatoires à l'élaboration du PREPA considèrent l'ensemble des secteurs d'activités, et leur évolution à différents horizons temporels : 2020, 2030, selon un scénario tendanciel existant (AME scénario avec mesures existantes pour le climat, développé en 2012). Ce scénario intègre ainsi l'évolution des secteurs d'activités, les consommations et le mix énergétiques aux horizons étudiés, en tenant compte de mesures déjà adoptées pour le climat. Par rapport au scénario AME initial, une mise à jour est proposée pour l'évolution de l'agriculture.

Les évaluations (de mesures individuelles de réduction ou de combinaisons de mesures préfigurant différentes configurations du plan PREPA) se font aux horizons 2020 et 2030, le plus souvent en comparant l'évolution avec la mesure (ou le plan PREPA) à l'évolution sans la mesure.

D'autres résultats d'évolution sont également présentés et discutés :

- les émissions de polluants aux horizons 2020 et 2030 sont ainsi comparées à celles des années de référence 2005 et 2013, en réponse à la question du respect des engagements de réduction des émissions du protocole de Göteborg ;
- les concentrations de polluants en 2020 et 2030 sont comparées à celles de l'année 2010.

Un ensemble de mesures concernant tous les secteurs d'activité, analysées puis regroupées sous forme de scénarios

Une cinquantaine de mesures de réductions des émissions polluantes ou d'amélioration de la qualité de l'air sont envisagées pour l'ensemble des secteurs. Pour beaucoup d'entre elles, ces mesures sont d'ordre réglementaire (application de normes). D'autres concernent des politiques de restriction, d'amélioration et aide à l'amélioration, de rénovation, ou encore des mesures fiscales ou organisationnelles.

Ces mesures se répartissent en :

- des mesures réglementaires entrées en vigueur récemment (réglementations des années 2010 à 2015) et donc antérieures au PREPA ;
- des mesures réglementaires européennes entrant en application entre 2015 et 2020 ;
- des mesures nationales et locales envisagées dans le cadre du PREPA (gestion / restriction du trafic, renouvellement du parc automobile et véhicules électriques et alternatifs, transports combinés et mesures climat dans le bâtiment).

Ces différentes mesures sont l'objet d'une évaluation multicritère puis - selon leur efficacité potentielle - elles seront retenues ou non et regroupées ultérieurement sous forme de scénarios (différentes hypothèses de contenu du PREPA). C'est l'ensemble des mesures « entrées en vigueur récemment » ou « à venir » qui entre dans le contenu et l'évaluation du PREPA.

Onze mesures pour le trafic routier et deux pour transports combinés et voies navigables

Pour le secteur des transports, les mesures envisagées dans le cadre des travaux (et considérées pour inclusion ou non dans le plan PREPA) sont décrites succinctement ci-après. Ces mesures sont spécifiées assez précisément dans les annexes et les résultats de leur évaluation individuelle (multicritère) sont détaillés.

Pour le trafic routier, onze mesures ont été considérées :

- Mesures réglementaires entrées en vigueur récemment :
 - o TR1 - les réglementations Euro 5 pour les véhicules particuliers et utilitaires légers et EURO V pour les véhicules lourds, autobus et autocars,
 - o TR2 - les réglementations Euro 6a et b pour les véhicules particuliers et utilitaires légers et EURO VI pour les véhicules lourds, autobus et autocars ;
- Mesures nouvelles ou en préparation au niveau européen et entrant en application entre 2015 et 2020 :
 - o TR4 - la réglementation Euro 6c (avec procédures RDE - Real Driving Emission),
 - o TR5 - la directive 168/2013 pour les véhicules 2-roues, 3-roues et quadricycles, introduisant les réglementations Euro 4 (entre 2016 et 2018) et Euro5 (en 2020 ou 2021) ;
- Mesures nationales et locales de gestion du trafic routier :
 - o TR7 - restrictions de circulation en cas de dépassements des seuils d'alerte en zone urbaine,
 - o TR10 - Zones de circulation restreinte (ZCR) limitant l'accès aux centres villes des véhicules les plus polluants (hypothèse : dans toutes les villes de plus de 300,000 habitants, restriction s'appliquant aux voitures et VUL Euro 3 et antérieurs en 2020, Euro 4 en 2030, induisant une diminution du trafic urbain national de 18%),
 - o TR9 - l'augmentation des taxes sur les carburants (hausse finale du prix à la pompe de 10%, qui entraînerait une diminution du trafic des voitures de 8,5%) ;
- Mesures de modernisation du parc routier :
 - o TR3 - augmentation de la pénétration des véhicules électriques et hybrides (Hypothèses : les véhicules hybrides et électriques atteignent 16% des nouvelles

- immatriculations en 2020 et 50% en 2030 ; émissions des véhicules hybrides inférieures de 30% à celles des véhicules thermiques),
- TR6 - véhicules à faibles émissions pour les flottes publiques (hypothèse : renouvellement en véhicules électriques ou hybrides plug-in de 20% des véhicules de plus de 3,5 tonnes des flottes de plus de 20 véhicules – soit 25,000 véhicules faibles émissions),
- TR8 - développement de véhicules de transports en commun propres (bien que la mesure envisage différentes solutions techniques (GNV, biogaz, hydrogène, etc.), l'hypothèse retenue se base sur la motorisation électrique : 15% du parc de véhicules de transports en commun urbains en électrique en 2020 et 25% en 2030) ;
- Une autre mesure était proposée initialement :
 - TR11 - la limitation des émissions de particules par abrasion des freins (hypothèse : équipement de l'ensemble du parc automobile d'ici 2020, par un système de capture des particules des freins, réduction à 90%).

Pour le transport combiné, 2 mesures sont évoquées :

- TC1 - le développement du transport combiné rail -route (report de trafic total de marchandises à hauteur de 1% en 2020 et 2% en 2030 vers le transport combiné rail-route) ;
- TC2 - l'amélioration ou la création de voies navigables (hypothèse : projet de Canal Seine Nord Europe, impliquant un report de 1.7 milliards de tonnes x km par an vers le fluvial).

Des leviers additionnels à caractère incitatif sont finalement évoqués, mais ces mesures ne seront pas évaluées quantitativement. Elles ne sont d'ailleurs pas spécifiées en envergure ou temporalité. Pour le transport ce sont :

- les transports partagés (covoiturage et autopartage) et les modes de déplacements doux ;
- les chartes « Objectif CO₂ » et la démarche FRET21 pour le transport routier de marchandises, visant à engager les transporteurs dans la réduction de l'impact de leur activité sur le climat.

III. Évaluation des mesures individuelles et des scénarios - méthodes

Émissions et concentrations de polluants

Les mesures individuelles et scénarios les regroupant sont évalués en regard des réductions d'émissions de polluants qu'ils permettent. S'agissant d'inventaires d'émission nationaux, ce sont les méthodologies de calcul des émissions habituellement mises en œuvre par le CITEPA qui doivent être utilisées, en particulier la méthodologie OMINEA / COPERT4 pour les émissions du trafic routier. Il n'est cependant pas aisé de comprendre comment sont estimées précisément les réductions effectives d'émissions correspondant à la diversité de mesures des différents secteurs, ni si des interactions entre les différentes mesures ou les différents secteurs sont prises en compte (par exemple l'évolution de l'industrie ou de l'agriculture peut influencer les transports, une mesure de réduction pour un secteur peut affaiblir ou amplifier le potentiel d'une autre mesure pour un autre secteur, etc.).

Les mesures de réduction des émissions sont simulées en concentrations dans les cas suivants :

- la réduction d'émission est d'au moins 3% pour l'un des polluants, sur l'inventaire du ou des secteurs concernés, et en comparaison à la simulation au même horizon mais sans la mesure ;
- leur enjeu local est important.

Pour les réductions plus limitées ou lorsqu'une mesure similaire de plus grande envergure a déjà été simulée, les gains en concentrations sont estimés par interpolation au prorata des gains en émissions.

La simulation des concentrations repose sur la spatialisation et la désagrégation temporelle des émissions des différents secteurs, selon les clés de distribution spatio-temporelle de l'inventaire National Spatialisé (INS) développées pour chaque secteur d'activité. Le modèle chimie-transport CHIMÈRE est utilisé. Comme Polyphemus il prend en compte la plupart des phénomènes physico-chimiques connus aux différentes échelles, bien que la version du modèle CHIMÈRE alors utilisée soit plus limitée dans la prise en compte des émissions de COSV. Une simulation avec une résolution géographique de 7 km (mailles de 50 km²) et au pas horaire est effectuée sur l'ensemble du territoire métropolitain. Les conditions météorologiques sont celles de l'année 2010, quel que soit l'horizon temporel.

La simulation des concentrations pour l'année 2010 permet une comparaison aux concentrations enregistrées par les stations de mesure. Une méthode de krigeage en dérive externe est appliquée pour corriger l'ensemble des concentrations simulées pour 2010 (NO₂, O₃, PM₁₀ et PM_{2.5}) selon ces valeurs mesurées. Ces corrections pour 2010 seront utilisées ultérieurement pour corriger également les concentrations simulées pour les années 2020 et 2030 (correction proportionnelle au ratio de 2010 pour O₃, PM₁₀ et PM_{2.5}, décalage de l'écart pour NO₂). Cette technique de « redressement » limite selon les auteurs les incertitudes des simulations prospectives (sous réserve que les régimes chimiques locaux ne changent pas).

Deux limites des simulations sont évoquées (Annexe D, MEEM 2016e) :

- la non comptabilisation de la remise en suspension des particules par le trafic (qui pourrait contribuer à 50% des concentrations en PM₁₀, par temps sec et en proximité des axes routiers) ;
- les connaissances insuffisantes des COSV dans les émissions de polluants et de leur contribution aux aérosols secondaires, et plus encore la méconnaissance de l'évolution des COSV avec les différentes mesures de réduction des émissions de polluants. Les paramétrisations employées ne sont pas précisées, mais elles restent donc constantes pour la simulation des différentes mesures et scénarios.

Dépassements de seuils, exposition

Les gains en concentrations de polluants simulés aux emplacements des stations de mesure de la qualité de l'air permettent d'estimer les réductions des nombres de dépassements des seuils réglementaires (journalier pour PM₁₀ et horaires pour NO₂ et O₃).

Un indicateur agrégé (somme des nombres de dépassements pour ces trois polluants, ramenée au nombre de stations de mesure) est également proposé comme indicateur de dépassements des seuils.

Un second indicateur d'impact géographique est également proposé qui estime la portée territoriale des gains en concentrations. Cet indicateur est recodé de 1 (portée très locale) à 4 (ensemble du territoire).

Enfin, un indicateur moyen d'exposition (IEM) est estimé à partir de la moyenne annuelle des concentrations de PM_{2.5} dans des lieux de pollutions de fond urbaine, c'est-à-dire sur une sélection de stations de mesure dans les agglomérations.

Ces indicateurs ne reposent cependant que sur les valeurs simulées aux seuls emplacements des stations de mesure, alors qu'ils auraient pu être calculés sur l'ensemble des mailles (en distinguant celles-ci par type ou contexte - urbain, rural, etc.).

Impacts sanitaires

Les impacts sanitaires des mesures individuelles et scénarios du PREPA sont quantifiés à l'aide du modèle ARP-FR⁷⁴ de l'INERIS. Ce modèle tient compte des impacts sanitaires (morbidité et mortalité) associés à l'exposition de la population aux particules PM_{2.5} (indépendamment de leur source et composition chimique), à l'ozone (O₃) et au dioxyde d'azote (NO₂), et selon des relations doses -réponses, dérivées d'études épidémiologiques.

Dans ce but, les concentrations simulées sont donc croisées avec les densités de population (zones de résidence) pour estimer l'exposition moyenne de la population. La résolution spatiale n'est pas précisée mais elle pourrait correspondre aux mailles simulées.

La méthodologie distingue les classes d'âge et leur évolution aux horizons 2020 et 2030, en utilisant des fonctions dose - réponse spécifiques selon l'âge.

Les bénéfices sanitaires (réduction des impacts) sont ensuite quantifiés monétairement en s'appuyant sur différents indicateurs dérivés des travaux internationaux ou nationaux.

Autres critères et évaluation multicritère

D'autres critères d'évaluation sont pris en compte. Il s'agit notamment :

- a) des coûts des mesures de réduction des émissions (investissement, mise en œuvre), dont est dérivé un ratio d'efficacité (bénéfices liés à la réduction d'émission, en € par tonne de polluants évités) ;
- b) de critères de faisabilité et de besoin de leviers juridiques ;
- c) de critères de faisabilité sociale et de niveau de controverse (acceptabilité faible à forte auprès du public, des pouvoirs publics, et [des acteurs] du secteur.

Une analyse multicritère est proposée. Elle consiste à regrouper / agréger les différents critères selon 2 axes (les critères agrégés de chacun de ces axes sont notés de 1 à 4) :

- un axe d'acceptabilité / faisabilité juridique et sociale (2 critères b et c ci-dessus) ;
- un axe environnement - économie qui combine :
 - o l'efficacité environnementale en émissions (somme des réductions exprimées en pourcentage des plafonds du protocole de Göteborg) ;
 - o l'efficacité environnementale en concentrations (réduction des dépassements exprimée par l'indicateur agrégé) ;
 - o l'efficacité relative aux « co-polluants » via un indicateur d'impact synergique (bénéfices sur d'autres polluants environnementaux) ;
 - o l'efficacité économique relative à la réduction d'émission (on estime d'abord le coût de réduction d'une tonne d'émission du polluant visé par la mesure ; afin de tenir compte de différents polluants, on relativise ce ratio par le coût des dommages du polluant (coûts de référence établis par l'Agence Européenne pour l'Environnement) ;
 - o l'efficacité économique exprimée en bénéfices sanitaires (monétarisés).

Sans entrer dans le détail des méthodes d'agrégation utilisées pour cette évaluation multicritère, cette approche semble accorder un poids important aux aspects juridiques et d'acceptabilité (un axe), tandis que pour le second axe, l'efficacité environnementale est d'une part limitée à certains critères simplificateurs (réduction des émissions exprimée en pourcentage de plafonds négociés, réduction des concentrations exprimée en nombre total de dépassements de seuils, tous polluants), et d'autre part associée aux critères économiques.

⁷⁴ Alpha-Risk Poll France. Outil cohérent avec le modèle utilisé pour les évaluations menées dans le cadre de la Directive NEC et du Protocole de Göteborg, et adapté aux spécificités françaises. Basé initialement sur la méthodologie d'évaluation des impacts sanitaires du programme CAFE de l'Europe, avec mise à jour selon la méthode validée par l'OMS/Europe sur la base de HRAPIE (OMS 2013)

IV. Principaux résultats des simulations

Réductions d'émissions par différents scénarios du PREPA intégrant les mesures pour les différents secteurs

Il est assez difficile de comptabiliser les réductions effectives d'émission résultant des scénarios du PREPA (bas, haut ou correspondant à l'arrêté). Ces réductions sont en effet le plus souvent exprimées en kT de polluants / an et comme suit :

- d'une part en comparaison aux niveaux d'émission de 2005 et 2014 ;
- d'autre part en comparaison à un scénario tendanciel ou fil de l'eau qui ne tient compte d'aucune des mesures du PREPA, en particulier celles déjà engagées entre 2010 et 2015. Ceci revient - par exemple pour le trafic routier - à comparer les émissions de 2020 à une situation (2020) correspondant aux réglementations Euro 4.

Nous avons reconstitué dans le tableau ci-dessous ces réductions d'émissions en % selon les différentes références.

Globalement, les réductions obtenues par le PREPA en 2020, par rapport à un fil de l'eau tendanciel de type Euro 4 (mesures existantes en 2010) pour la même année 2020 auraient été de -10% (COVNM), -27% (PM_{2.5}) à -37% (NO_x).

En comparaison aux années antérieures, le PREPA conduit à des réductions d'émissions de -12 à -70% en 2025 ou 2030 par rapport aux niveaux d'émissions de 2005 et de -6 à -55% par rapport aux émissions de 2014.

Le bénéfice net des mesures nouvelles du PREPA (par rapport aux mesures déjà engagées jusqu'en 2015) varie selon les polluants de -2 à -13% des émissions de 2005, en 2025 ou 2030.

La contribution du trafic routier à ces réductions est prédominante pour NO_x (de l'ordre de 60% de la réduction totale) et de 27-28% pour COVNM et PM_{2.5}.

Réductions des émissions de polluants selon différents scénarios ou ensembles de mesures du PREPA, en comparaison à un scénario tendanciel sans mesures après 2010 (première ligne) et en comparaison aux années 2005 et 2014

Réductions induites par les scénarios ou ensembles de mesures ci-dessous	Année d'évaluation	SO ₂	NOx	COVNM	NH ₃	PM _{2,5}	PM ₁₀
PREPA (haut ou bas) comparé à un scénario tendanciel n'incluant aucune mesure après 2010, même si déjà engagée (équivalent à Euro 4 pour trafic)	2020	-29%	-37%	-10%	-18%	-27%	NA
Mesures du PREPA déjà adoptées entre 2010 et 2015							
• comparées aux émissions de l'année 2005	2020	-64%	-56%	-48%	3%	-49%	-38%
	2025	-66%	-63%	-49%	3%	-53%	-39%
	2030	-67%	-69%	-49%	4%	-56%	-41%
• comparées aux émissions de l'année 2014	2020	0%	-29%	-4%	-1%	-23%	-14%
	2025	-6%	-40%	-5%	0%	-28%	-17%
	2030	-9%	-51%	-6%	0%	-33%	-20%
Arrêté PREPA (incluant mesures déjà adoptées entre 2010 et 2015 et mesures nouvelles / additionnelles							
• comparé aux émissions de l'année 2005	2020	-66%	-57%	-49%	-7%	-52%	-40%
	2025	-68%	-65%	-50%	-12%	-57%	-43%
	2030	-69%	-72%	-51%	-17%	-62%	-46%
• comparé aux émissions de l'année 2014	2020	-6%	-31%	-5%	-10%	-27%	-17%
	2025	-11%	-43%	-6%	-15%	-35%	-21%
	2030	-15%	-55%	-8%	-19%	-42%	-26%
Mesures nouvelles (post 2015) du PREPA							
• comparées aux émissions de l'année 2005	2020	-2%	-1%	-1%	-6%	-3%	-2%
	2025	-2%	-2%	-1%	-10%	-4%	-3%
	2030	-1%	-3%	-1%	-14%	-6%	-4%
• comparées aux émissions de l'année 2014	2020	-6%	-2%	-1%	-6%	-4%	-3%
	2025	-5%	-3%	-2%	-10%	-7%	-4%
	2030	-4%	-4%	-2%	-13%	-9%	-6%
Mesures nouvelles (post 2015) du PREPA							
• Bénéfices nets par rapport aux émissions de 2005, des mesures nouvelles du PREPA	2020	-6%	-3%	-1%	-6%	-5%	-3%
	2025	-5%	-5%	-2%	-10%	-9%	-5%
	2030	-4%	-8%	-2%	-13%	-13%	-8%

Évolution des concentrations et expositions par différents scénarios du PREPA

Les analyses en concentrations sont assez succinctes (peut-être en raison de la complexité des simulations). Globalement, les scénarios du PREPA sont analysés en référence à l'année 2010, sous forme de cartes nationales de concentrations en 2010 et 2020 (assez peu commentées), et d'évolution des nombres de dépassements (mesurés ou simulés) sur les stations d'observation de la qualité de l'air (68 points de mesure pour PM_{2,5}, 286 pour PM₁₀, 359 et 378 pour O₃ et NO₂). Les analyses sont étendues aussi à l'année 2030 dans (MEEM 2017).

Comme dans nos travaux, des concentrations élevées sont observées à proximité des axes routiers (ici les stations « trafic »). Des spécificités territoriales ou liées au contexte (régime chimique) sont constatées, de même que des possibles hausses des concentrations d'O₃ en des lieux où elles étaient faibles (région parisienne, nord de la France, proximité du trafic) par la réduction des émissions d'oxydes d'azote.

Le scénario PREPA - mesures existantes diminue considérablement les dépassements aux stations : pour l'année 2020, plus de dépassements en PM₁₀ et PM_{2,5}, réduction de 75% des dépassements de la valeur moyenne annuelle de NO₂ et de 96% des dépassements du seuil horaire, réduction de 60 à 80% du niveau d'exposition cumulé (AOT, Accumulated Ozone Exposure)

et de la limite annuelle des dépassements journaliers d'O₃. Les mesures nouvelles du PREPA réduisent légèrement les dépassements de NO₂ et O₃. Ces réductions se poursuivent pour l'année 2030.

Pour l'indicateur moyen d'exposition (IEM) caractérisant les concentrations moyennes de PM_{2.5} en fond urbain, les simulations donnent une estimation de 13,5 µg/m³ en 2020 et 11 µg/m³ en 2030, tandis que les objectifs français sont fixés respectivement à 14,7 et 10 µg/m³ (MEEM 2017), les auteurs soulignant que ces seuils pourraient être plus fortement dépassés si les conditions météorologiques étaient défavorables.

Évolution des impacts sanitaires par différents scénarios du PREPA

Bien que l'approche méthodologique soit apparue assez ambitieuse, l'évaluation des impacts sanitaires reste très succincte et limitée à 1 ou 2 pages et quelques indicateurs. Il est mentionné que l'arrêté PREPA (mesures existantes et nouvelles) permet de diminuer le nombre de morts prématurées par l'exposition aux particules fines d'environ 11 200 cas / an entre 2010 et 2030 (soit -30%). Les bénéfices sanitaires (différents impacts) seraient respectivement 11 et 17 Milliards d'€ en 2020 et 2030. La contribution des « mesures nouvelles » est probablement limitée (compte tenu des faibles bénéfices en émissions) mais elle n'est pas précisée. Il en est de même pour la comparaison au scénario tendanciel existant (AME avec mesures climat).

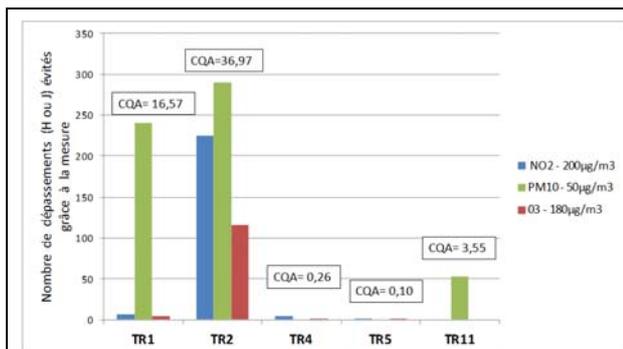
Potentiel des mesures individuelles / caractérisation des mesures

La comparaison des mesures individuelles - quant à leur réduction potentielle d'émissions ou à la diminution des concentrations - est particulièrement intéressante. Elle permet en effet de positionner et hiérarchiser les enjeux et d'identifier les gisements potentiels d'amélioration de la qualité de l'air. Nous n'évoquerons ici que quelques résultats spécifiques.

Pour les émissions, c'est la mesure trafic routier TR2 (réglementation Euro 6) qui est la mesure clé de réduction des NOx (impacts faibles en 2020 mais très forts en 2030). L'amélioration des installations de combustion et la réglementation des émissions des engins mobiles non-routiers (tracteurs, etc.) offrent un potentiel moindre et incertain. La taxation des carburants pourrait être un levier très significatif par la réduction du trafic escomptée. Pour les émissions de particules PM_{2.5}, l'habitat est le levier principal de réduction, au travers de l'amélioration (taux de remplacement de 95%) des équipements de chauffage domestique au bois. L'amélioration des installations de combustion et les normes Euro 6 (TR2) apportent aussi des réductions substantielles.

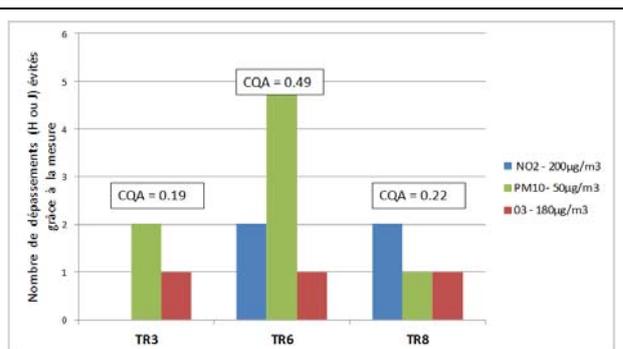
Concernant les concentrations de polluants et les dépassements de seuils (évaluation globale), ce sont les réglementations d'émissions pour les véhicules routiers (Euro 5 et Euro 6) et pour les engins mobiles non-routiers qui se détachent nettement. On retrouve ensuite les mesures d'amélioration des installations de combustion, de remplacement des équipements de chauffage au bois, les taxes sur le carburant, le remplacement de l'urée dans l'agriculture, et aussi la réduction des émissions liée à l'abrasion des freins. Il est noté que les mesures additionnelles de taxation des carburants et de restriction de circulation aux véhicules polluants (ZCR) réduisent peu les dépassements (au-delà des mesures déjà mises en œuvre). Les ZCR sont cependant la seule mesure additionnelle ayant un impact sur les dépassements de NO₂, car focalisées sur les centres urbains.

La figure ci-dessous montre les améliorations induites par les différentes mesures concernant le trafic routier et les transports (combiné et voie fluviale). Le critère qualité de l'air donne une indication de l'envergure de chacune des mesures. Les mesures réglementaires offrent un potentiel très supérieur aux autres mesures. Il est cependant pour partie déjà épuisé. Les autres mesures (motorisations alternatives, restriction de circulation) permettraient des gains complémentaires assez réduits (malgré des hypothèses assez ambitieuses).



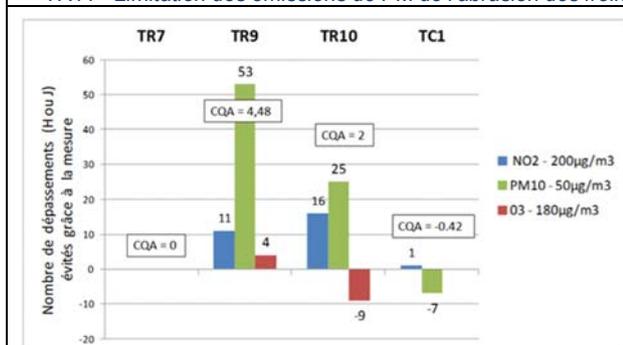
a) Mesures émissions échappement et abrasion des freins

- TR1 - Normes Euro 5 et V
- TR2 - Normes Euro 6 et VI
- TR4 - Norme Euro 6 c RDE
- TR5 - Normes émissions 2013 véhicules à 2 ou 3 roues
- TR11 - Limitation des émissions de PM de l'abrasion des freins



b) Nouvelles motorisations

- TR3 - Véhicules hybrides et électriques
- TR6 - Renouvellement en véhicules propres d'une part des véhicules des flottes publiques
- TR8 - Développement des TC urbains propres



c) Restriction du trafic routier et transport multimodal.

- TR7 - Restriction si seuils d'alerte de qualité de l'air
- TR9 - Taxes sur les carburants
- TR10 - ZCR, Restriction centres-villes / véhicules polluants
- TC1 - Développement du transport combiné Route Rail

Dépassements horaires (O₃, NO₂) et journaliers (PM₁₀) évités par la mise en place des mesures trafic routier et transports du PREPA (Plan de réduction des émissions de polluants atmosphériques) en 2020

Le critère de qualité de l'air (CQA) est indiqué pour chaque mesure.

L'analyse multicritère des mesures offre finalement une hiérarchisation intéressante des mesures et des secteurs d'activité (MEEM 2016a), indiquant notamment qu'aucun secteur ne se détache réellement, tous devant contribuer aux réductions d'émissions.

V. Comparaison aux travaux du présent rapport, originalités méthodologiques, limites et apports

Globalement, l'approche de simulation des émissions et concentrations des travaux d'élaboration du PREPA est assez similaire à celle mise en œuvre dans le cadre des travaux du présent rapport sur les particules (mêmes polluants d'intérêt, enjeux comparables, etc.). Les outils ne sont cependant pas les mêmes et de nombreuses hypothèses peuvent différer sans qu'il soit réellement possible d'identifier toutes ces différences (et encore moins leur impact potentiel sur les résultats).

Il y a cependant une différence importante d'objectif : dans notre cas il s'agit principalement d'évaluer (de manière comparative) différentes options technologiques concernant uniquement le trafic routier ; dans le PREPA sont évaluées différentes mesures de réduction de moyen à long terme,

concernant tous les secteurs d'activités, et en regard d'un scénario tendanciel. Les scénarios « trafic » considérés dans l'élaboration du PREPA sont d'ailleurs très différents.

Faisabilité de comparaison des résultats du PREPA à ceux du présent rapport

Compte tenu des différences d'objectifs et d'approches, les comparaisons entre les simulations des travaux du PREPA et nos simulations (France) sont assez limitées.

Les réductions en émissions (tous secteurs) sont rapportées dans le tableau ci-dessous. Ces réductions et notamment pour les émissions particulières sont beaucoup plus limitées dans nos travaux, indiquant bien l'importance de la contribution des autres secteurs et la prévision d'une évolution à la baisse.

Les réductions en concentrations ne peuvent être comparées compte tenu d'approches de quantification et d'indicateurs très différents.

Comparaisons des simulations effectuées dans le cadre de l'élaboration du PREPA, et celles effectuées dans le cadre du présent rapport (simulations France)

Réductions d'émissions induites par les scénarios ci-dessous	Année d'évaluation	SO ₂	NOx	COVNM	NH ₃	PM _{2,5}	PM ₁₀
Mesures du PREPA déjà adoptées entre 2010 et 2015							
• comparées aux émissions de l'année 2014	2025	-6%	-40%	-5%	0%	-28%	-17%
Arrêté PREPA (mesures déjà adoptées entre 2010 et 2015 et mesures nouvelles / additionnelles)							
• comparé aux émissions de l'année 2014	2025	-11%	-43%	-6%	-15%	-35%	-21%
Simulations France - comparé à l'année 2014							
	2025						
• Scénario FAP ou fil de l'eau		-0,2%	-24%	-1%	-0,1%	-7%	-5%
• Scénario Essence		-0,2%	-26%	-0,5%	+0,1%	-9%	-6%

Originalités et extensions méthodologiques

Certaines originalités méthodologiques et extensions ont été relevées, et notamment :

- la définition d'indicateurs synthétiques, dépassements de seuils, exposition moyenne, impact géographique, permettant un classement plus aisé de différentes mesures ;
- les concentrations simulées corrigées par les biais observés sur les sites des stations de mesure (écarts entre concentrations mesurées et simulées). Il est à noter cependant que seuls les dépassements aux stations sont analysés (et non pas sur l'ensemble du territoire ;
- l'approche d'évaluation des réductions de concentrations par interpolation des gains en émissions dans certains cas ;
- les impacts sanitaires également quantifiés (méthodologie européenne d'évaluation des impacts sanitaires) ;
- l'extension de l'évaluation aux aspects économiques, faisabilité et acceptabilité et la mise en œuvre d'une approche multicritère sur l'ensemble des aspects environnementaux ou non.

Limites, avantages et apports des travaux

Les principales limites de ces travaux (en regard de nos objectifs ou d'une analyse prospective plus générale sur la pollution de l'air) résident dans :

- la palette restreinte des mesures envisagées pour le trafic routier ; en particulier, l'absence de mesure discutées actuellement (déclin / abandon des moteurs Diesel au profit des moteurs essence, déclin marqué des moteurs thermiques, réduction du trafic) ; les mesures concernant le transport non routier (maritime, aérien, ferroviaire) ou une organisation plus structurée de la multi-modalité ou de la logistique transport - livraison sont également absentes ;

- l'interprétation relativement limitée des évolutions des concentrations de polluants (pas d'analyse quantitative des cartes de concentrations, pas ou peu d'analyse temporelle, analyse quantitative limitée aux valeurs simulées aux seuls emplacements des stations de mesures - et non comptabilisées sur l'ensemble des mailles - et considérant des nombres de dépassements aux stations et des valeurs moyennes d'exposition pour les stations de fond urbain) ;
- l'absence d'une analyse à des échelles plus fines (en complément de l'analyse menée sur l'ensemble du territoire) qui permettrait d'appréhender plus précisément les phénomènes à échelle d'agglomération (comme dans nos travaux sur l'Île-de-France), voire à échelle encore plus fine (avec d'autres outils) ;
- l'analyse peu développée des expositions et des impacts sanitaires ;
- l'analyse des incertitudes (Annexe D, MEEM 2016e) très succincte et peu conclusive. Elle se heurte - comme pour nos travaux - à la très grande complexité des simulations, et à l'absence de données quantitatives ;

Les travaux présentent par contre des avantages ou des apports très intéressants :

- la prise en compte d'un scénario tendanciel (évolution démographique et des activités, et intégrant déjà des mesures « climat » affectant consommations et mix énergétiques) est particulièrement intéressante, même si elle rendrait plus difficiles les comparaisons de type « toutes choses étant égales par ailleurs » ;
- l'intégration des autres secteurs d'activités est aussi un enjeu majeur des simulations, car l'évolution de leurs émissions doit interférer avec celles simulées pour le trafic routier ;
- la simulation, évaluation et hiérarchisation des différentes mesures individuelles pour différents secteurs constitue enfin une réelle plus-value de ces travaux, permettant d'identifier des enjeux et leviers d'amélioration. A cet égard, la comparaison des différentes mesures « trafic / transport » considérés dans l'élaboration du PREPA (évolution réglementaire, motorisations alternatives, mesures d'organisation ou de restriction, etc.) est très intéressante, de même que leur positionnement relatif par rapport à des mesures de plus fort impact, pour les autres secteurs d'activité ;
- outre la grande richesse d'information cependant un peu dispersée dans les nombreux rapports, ceux-ci proposent également des encadrés très pédagogiques sur la pollution de l'air.

VI. Conclusions

Les travaux d'élaboration du PREPA constituent un ensemble conséquent, avec évaluation multicritère de nombreuses mesures de réduction des émissions des secteurs d'activité.

L'approche - bien que très complexe et insuffisamment explicitée sur certains points - comporte certains aspects intéressants : définition de critères, de thèmes environnementaux, sélection a priori des mesures de réduction, approche d'évaluation multicritère et qualitative reposant sur des critères simples ou graphiques. Ces aspects mériteraient d'être approfondis car leur définition est déterminante pour les travaux et pour les mesures finalement retenues pour le plan national PREPA.

Plusieurs aspects méthodologiques sont intéressants : la définition d'indicateurs de dépassements de seuils, d'exposition moyenne, d'impact géographique. Les concentrations simulées sont corrigées par les biais constatés entre concentrations simulées et mesurées sur les sites des stations de mesure (mais seuls les concentrations et dépassements aux stations sont analysés). Les impacts sanitaires sont également quantifiés (méthodologie européenne d'évaluation des impacts sanitaires). Ce sont surtout l'approche multi-secteurs et l'évaluation en comparaison à un scénario tendanciel prédéfini (avec évolution démographique, énergétique, etc.), l'évaluation des

impacts sanitaires (malheureusement assez succincte) et finalement la hiérarchisation de différentes mesures pour différents secteurs qui constituent une forte plus-value de ces travaux.

Références / liens

PREPA (2017) : Un engagement collectif pour améliorer la qualité de l'air et la santé des Français. PREPA - document explicatif. 4p.

https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/17095_prepa_4p_A4_DEF-1_light_0.pdf

MEEM (2016a) : « Aide à la décision pour l'élaboration du PREPA » - Synthèse. 36p.

https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/06-1_PREPA_Synthèse_-_aide_a_la_decision_pour_l_elaboration_du_PREPA.pdf

MEEM (2016b) : « Aide à la décision pour l'élaboration du PREPA » - Rapport Principal. 189p.

https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/06-2_PREPA_Rapport_principal.pdf

MEEM (2016c) : « Aide à la décision pour l'élaboration du PREPA » - Annexe B : Fiches mesures résumées. 192p

https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/03_AnnexeB%20Fiches%20mesures%20résumées%20en%20ligne.pdf

MEEM (2016d) : « Aide à la décision pour l'élaboration du PREPA » - Annexe C : Fiches mesures détaillées. 484p

https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/03_AnnexeC%20Fiches%20mesures%20détaillées%20en%20ligne.pdf

MEEM (2016e) : « Aide à la décision pour l'élaboration du PREPA » - Annexe D : Méthodologie employée. 55p.

https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/03_AnnexeD%20Méthodologie%20employée%20en%20ligne.pdf

MEEM (2017) : Évaluation ex-ante des émissions, concentrations et impacts sanitaires du projet de PREPA (Plan National de Réduction des Émissions de Polluants Atmosphériques), 42p.

https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Evaluation_ex_ante_du_PREPA%5B1%5D.pdf

MEEM, icare & consult (2017). Rapport d'évaluation des impacts environnementaux du Plan National de Réduction des Émissions de Polluants Atmosphériques (PREPA). 235p.

http://www.consultations-publiques.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/rapport_d_evaluation_des_impacts_environmentaux_du_prepa.pdf





Agence nationale de sécurité sanitaire
de l'alimentation, de l'environnement et du travail
14 rue Pierre et Marie Curie
F94701 Maisons-Alfort cedex
www.anses.fr
[@Anses_fr](https://twitter.com/Anses_fr)