



Particules de l'air ambiant extérieur

Effets sanitaires des particules de l'air ambiant extérieur
selon les composés, les sources et la granulométrie

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

Avis de l'Anses
Rapport de synthèse et de recommandations de l'expertise collective

Juillet 2019 - Édition scientifique



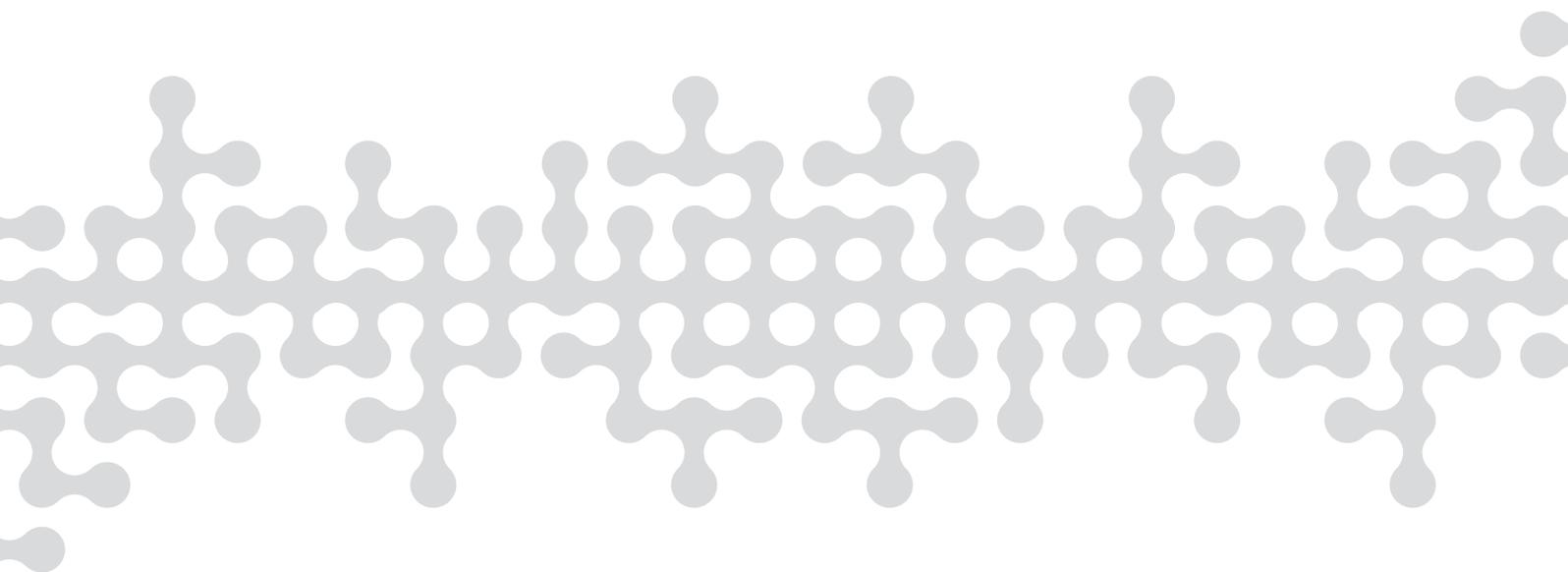
Particules de l'air ambiant extérieur

Effets sanitaires des particules de l'air ambiant extérieur
selon les composés, les sources et la granulométrie

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

Avis de l'Anses
Rapport de synthèse et de recommandations de l'expertise collective

Juillet 2019 - Édition scientifique



Le directeur général

Maisons-Alfort, le 5 juillet 2019

AVIS¹ **de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation,** **de l'environnement et du travail**

relatif à l'état des connaissances sur les particules de l'air ambiant
(effets sanitaires associés à la composition chimique, émissions du trafic routier)

L'Anses met en œuvre une expertise scientifique indépendante et pluraliste.

L'Anses contribue principalement à assurer la sécurité sanitaire dans les domaines de l'environnement, du travail et de l'alimentation et à évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter.

Elle contribue également à assurer d'une part la protection de la santé et du bien-être des animaux et de la santé des végétaux et d'autre part à l'évaluation des propriétés nutritionnelles des aliments.

Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque (article L.1313-1 du code de la santé publique).

Ses avis sont publiés sur son site internet.

L'Anses a été saisie le 30 juin 2014 par la Direction générale de la santé (DGS), la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) et la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) pour la réalisation d'une expertise scientifique relative à l'état des connaissances sur les particules de l'air ambiant (composition chimique et émissions du trafic routier). L'expertise demandée vise, d'une part, à évaluer les effets sanitaires des particules de l'air ambiant selon leurs composés, leurs sources et leur granulométrie et, d'autre part, à déterminer l'impact sur la pollution atmosphérique des technologies et de la composition du parc de véhicules automobiles circulant en France.

1. CONTEXTE ET OBJET DE LA SAISINE

1.1. Contexte

La pollution atmosphérique se caractérise par la présence dans l'air extérieur de différents gaz et de particules ayant des effets néfastes sur la santé humaine et sur l'environnement. La problématique des particules dans l'air ambiant (PM_{2,5} et PM₁₀) est prégnante dans plusieurs zones du territoire national qui présentent de manière récurrente des niveaux de concentration élevés de particules fines dans l'air ambiant par rapport aux normes et valeurs guide de qualité de l'air ambiant en vigueur. Cette situation est à l'origine de plusieurs avertissements de la Commission européenne adressés à la France depuis 2009 (mise en demeure, avis motivé, saisine de la Cour de justice de l'Union européenne) au motif du non-respect des normes réglementaires de qualité de l'air fixées pour les PM₁₀² par la Directive 2008/50/CE du 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe.

¹ Annule et remplace l'avis du 21 juin 2019 (cf. annexe 8)

² PM₁₀ : concentration en masse de particules de diamètre aérodynamique inférieur à 10 µm par unité de volume d'air.

Les particules fines de l'air ambiant représentent un enjeu de santé publique. L'impact de l'exposition humaine à la pollution atmosphérique par les particules fines $PM_{2,5}$ ³ en lien avec l'activité humaine a été estimé à 48 000 décès prématurés par an pour l'ensemble de la France ; il 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 de cette exposition (Pascal *et al.*, 2016). 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)⁴. Si les concentrations⁵ de particules dans l'air ambiant ont diminué au cours des années, elles restent cependant encore supérieures aux valeurs guides annuelles recommandées par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) (OMS Europe, 2006).

Les effets sanitaires des particules fines de l'air ambiant extérieur sont déjà bien documentés. La survenue d'effets cardiovasculaires et respiratoires associés à des expositions à la pollution particulaire de l'air ambiant à court et à long terme est largement documentée dans des études depuis plusieurs décennies. Plus récemment, des effets sur d'autres organes cibles ont été mis en évidence dans des études, comme par exemple des effets sur le cerveau, et sur certaines fonctions, comme la reproduction. En octobre 2013, le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) a classé la pollution de l'air ambiant extérieur dans son ensemble et les particules en suspension composant cette pollution atmosphérique comme cancérigènes pour l'Homme (groupe 1) (CIRC, 2016).

Des interrogations subsistent, qui concernent les effets sanitaires associés aux particules en fonction de leur composition, dans la mesure où l'évolution de celle-ci depuis ces vingt dernières années est vraisemblable.

L'US Environment Protection Agency (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 »* (US EPA, 2009). Cette conclusion était partagée et maintenue par l'OMS en 2013 dans son rapport *Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP* (OMS Europe, 2013). Depuis 2013, plusieurs études scientifiques ont été publiées sur le sujet, et notamment des études épidémiologiques d'envergure en Europe.

Les particules fines proviennent d'une multitude de sources d'émission et de processus de transformation physico-chimiques dans l'atmosphère. Les émissions résultent de phénomènes naturels (sable de désert, sels marins, éruptions volcaniques, feux de forêts, etc.) et d'activités humaines (industries, transports, agriculture, chauffage, etc.). Le transport routier et le chauffage résidentiel et tertiaire sont à l'origine de fortes concentrations d'aérosols organiques dans l'atmosphère, par la combustion d'énergie fossile et de biomasse. Outre les particules, le transport routier est aussi une source majeure d'oxydes d'azote (NO_x) et plus particulièrement de dioxyde d'azote (NO_2).

Les particules primaires issues des transports routiers sont principalement émises par les véhicules Diesel non équipés de filtre à particules. Ainsi, le niveau des émissions est très dépendant de l'âge et de la technologie du véhicule, les véhicules anciens contribuant fortement aux émissions

³ $PM_{2,5}$: concentration en masse de particules de diamètre aérodynamique inférieur à 2,5 μm par unité de volume d'air.

⁴ Comprend le coût sanitaire tangible « [...] qui se mesure principalement à travers les dépenses de santé remboursées par l'assurance maladie afin de prendre en charge les pathologies imputables à la pollution de l'air, qu'il s'agisse des hospitalisations, des soins de villes ou du versement d'indemnités journalières et de pensions d'invalidité », le coût sanitaire intangible « [...] dit coût social ou socio-économique, associé à la mortalité et à la morbidité imputables à la pollution de l'air (Ce coût, associé à une perte de bien-être, n'a pas d'impact direct sur le solde des finances publiques), et le coût non sanitaire, soit [...] les impacts négatifs en termes de baisse de rendements agricoles, de perte de biodiversité ou de dégradation et d'érosion des bâtiments, ainsi que les coûts associés à la lutte contre la pollution de l'air, à l'instar des dépenses liées aux activités de prévention et de recherche menées par l'administration ou par les agences sanitaires. » (Commission d'enquête du Sénat, 2015).

⁵ 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 et zones rurales).

particulaires du trafic routier. Certaines émissions de particules (hors échappement, démarrage à froid, deux-roues, etc.) liées au trafic routier sont cependant encore insuffisamment documentées. De même, la formation d'aérosols secondaires à partir des émissions du trafic routier et leur contribution à la pollution particulaire de l'air ambiant sont relativement incertaines, mais sont de plus en plus étudiées.

Le trafic routier est la source de pollution de l'air ambiant par les particules la plus documentée, tant pour ce qui concerne ses émissions que ses effets. Les effets sanitaires associés aux expositions aux particules de l'air ambiant incluent des effets cardiovasculaires et respiratoires en lien avec des expositions à court et long terme. En 2012, le CIRC a classé les émissions 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 a par ailleurs évalué que les indications d'une cancérogénicité en expérimentation animale étaient « suffisantes » pour ce qui concerne 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.

Plusieurs études mettent en évidence le fait que les populations résidant à proximité des voies à fort trafic routier ont une santé dégradée (HEI, 2010 ; ORS IdF, 2012). A titre d'exemple, le projet Aphekom relatif à dix 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 bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO) et de maladies coronariennes chez les adultes de plus de 65 ans* » (InVS, 2012).

La volonté de diminuer les émissions des moteurs des véhicules et leur impact sur la qualité de l'air a suscité, depuis au moins une vingtaine d'années en France et dans l'Union européenne, un processus continu d'évolution de la réglementation, d'amélioration de la composition des carburants et des groupes motopropulseurs, ainsi que le développement de nouvelles technologies de dépollution. L'efficacité réelle et comparée des différentes technologies reste cependant difficile à établir car elle dépend de nombreux facteurs (conditions de circulation, utilisation des véhicules, conditions topographiques et climatiques locales, etc.). **Dans ce contexte, des interrogations se posent sur l'impact environnemental et sanitaire potentiel de futurs choix technologiques pour le parc roulant français, dans le but de diminuer plus avant la contribution du trafic routier à l'impact sanitaire.**

1.2. Objet de la saisine

Par courrier du 30 juin 2014, l'Anses a été saisie par la Direction générale de la santé (DGS), la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) et la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) afin de répondre à plusieurs questions dans le champ de deux volets distincts.

- Concernant un premier volet relatif aux effets sanitaires des particules, les questions posées étaient les 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 ? ».

- Dans le cadre d'un second volet relatif aux émissions du trafic routier, il était demandé de :
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 pouvant être mis en regard avec les données d'émission disponibles concernant les autres sources de particules. »

Dans le cadre de cette saisine, il était également demandé à l'Anses son « avis quant à la transposition des conclusions émises en 2012 par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) sur les émissions d'échappement des moteurs diesel, aux émissions émises par les véhicules routiers à moteur diesel en France ». En réponse à ce point précis, l'agence a produit une note d'appui scientifique et technique publiée en avril 2017 sur son site Internet (Anses, 2017a).

A l'automne 2014 et à l'initiative de l'Ademe, une étude a été lancée (projet « SOURCES »), impliquant l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS)/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)). Son objectif premier était de réaliser une synthèse des études scientifiques visant l'identification et la quantification des sources de particules fines dans l'air ambiant (PM₁₀ et PM_{2,5}) en France (ADEME, 2018 ; LCSQA/Ineris/IGE, 2017a et 2017b). Dans ce contexte, le périmètre d'instruction de la saisine a dû être redéfini en concertation avec les commanditaires (DGPR, DGEC et DGS) de la saisine de l'Anses, afin d'éviter la redondance entre les travaux.

Les questions définitives posées à l'Anses ont ainsi été stabilisées en mai 2015 : la question 1 du 1^{er} volet cité en amont a été exclue de l'expertise à conduire⁶.

2. ORGANISATION DE L'EXPERTISE

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) ».

L'expertise relève du domaine de compétences du comité d'experts spécialisé (CES) « Évaluation des risques liés aux milieux aériens ». L'Anses a confié la réalisation de l'expertise à un groupe de travail (GT) dédié. Ce GT a été constitué en septembre 2015 après un appel à candidatures public. Il s'est réuni de septembre 2015 à décembre 2018, à 25 reprises en plénier et à 32 reprises en sous-groupes. Deux experts rapporteurs externes ont également été mandatés afin de contribuer aux travaux du GT sur des tâches précises (analyse des études épidémiologiques et élaboration des lignes de preuves). Les travaux du GT ont été présentés et discutés devant le CES tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques entre le 26 novembre 2015 et le 17 janvier 2019. Ils ont été adoptés par le CES en plusieurs étapes lors de ses séances du 13 septembre 2018, du 18 décembre 2018 et du 17 janvier 2019.

Sur un plan méthodologique, les travaux menés par le GT dans le cadre de la présente expertise pour répondre à la question 2 du 1^{er} volet cité en amont (voir chapitre 1.2) déclinent, dans leurs principes, les orientations données par le Conseil scientifique de l'Anses dans le cadre du GT MER (Méthodologie en évaluation de risques), notamment par son rapport « Illustrations et actualisation des recommandations pour l'évaluation du poids des preuves et l'analyse d'incertitude à l'Anses » (Anses, 2017b).

⁶ Il est à noter que l'Anses a pu suivre les travaux réalisés dans le cadre du projet « SOURCES » et les référencer dans la présente expertise.

Ces travaux font l'objet d'un rapport de synthèse (Anses, 2019c) et de deux rapports socles (Anses, 2019a et 2019b) consacrés respectivement aux deux volets de la saisine (cf. p.3).

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.

3. ANALYSE, CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DU GT ET DU CES

3.1. Effets sanitaires des particules de l'air ambiant : méthode et analyse conduite

Pour répondre à la question posée, une démarche d'évaluation du poids des preuves contenues dans la littérature a été développée et mise en œuvre. L'objectif de cette méthode est de conclure à un niveau d'indication d'effet sanitaire pour plusieurs composés et sources des particules de l'air ambiant, qui traduit la confiance portée dans une association (ou absence d'association) entre une exposition d'intérêt et une catégorie sanitaire d'intérêt d'après un ensemble de publications appelé corpus. Une catégorie sanitaire d'intérêt, comme par exemple la « santé cardiovasculaire », regroupe différents événements de santé (altération du rythme cardiaque, infarctus et événements coronariens, hospitalisation pour cause cardiovasculaire, etc.). Les termes soulignés sont définis plus en détail dans le glossaire en Annexe 1.

La finalité de l'évaluation de ce niveau d'indication d'effet sanitaire est donc de pouvoir conclure d'après l'analyse mise en œuvre de la littérature scientifique, si l'association observée entre un composé (ou une source) donné des particules de l'air ambiant et une catégorie sanitaire d'intérêt est fortement, ou modérément, ou encore faiblement plausible.

Il peut aussi être conclu qu'un composé n'a pas d'effet sur la santé, ou bien encore que les éléments disponibles dans la littérature sont inadéquats pour permettre de conclure.

A la base, l'exercice est reproduit pour autant de composés des particules, autant de sources, et autant d'événements de santé qui sont décrits/documentés dans la littérature scientifique analysée, pour ensuite aboutir, après compilation, à des conclusions par composé (ou source) et pour différentes catégories sanitaires d'intérêt qui représentent des « familles d'effets sanitaires ».

Pour conduire cette analyse, le groupe de travail a adapté la méthode proposée par l'*Office of Health Assessment and Translation* dans le cadre du *National Toxicology Program* (OHAT NTP, 2015). Le processus d'évaluation se décline en 7 étapes (Figure 1) décrites brièvement ci-après. Il inclut également une analyse critique de l'approche qui explicite les limites et incertitudes de celle-ci.

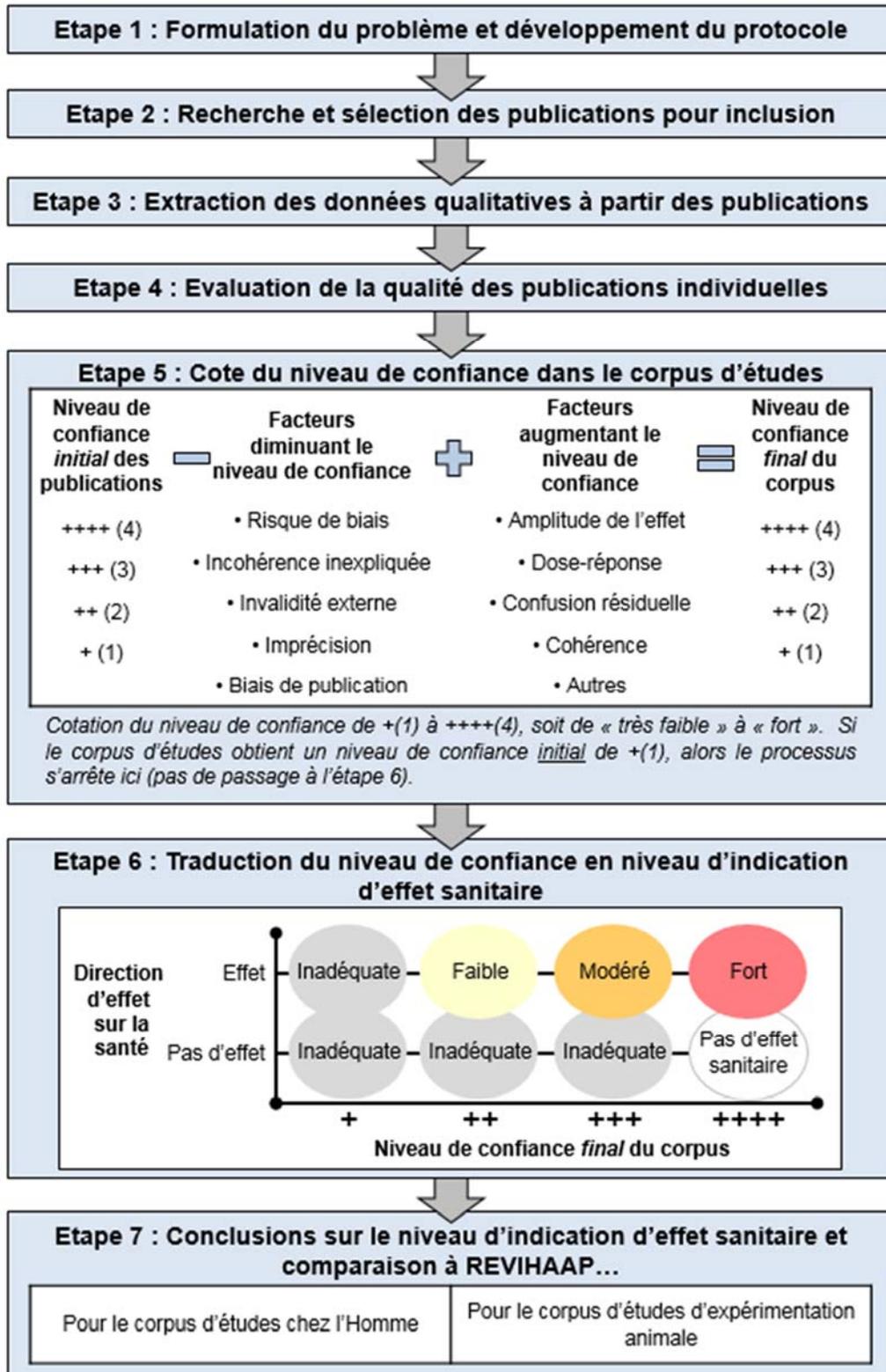


Figure 1 : Processus de l'approche adaptée de l'OHAT par le groupe de travail

Étape 1 : Formulation du périmètre du problème

La question à investiguer a été formulée par le groupe de travail de la manière suivante :

- Quels sont les effets sur la santé humaine des particules de l'air ambiant extérieur selon leurs composés, sources et granulométrie ?

Après une première recherche bibliographique, et en raison du volume considérable de publications scientifiques obtenues par des requêtes bibliographiques initiales sur les moteurs de recherche Pubmed et Scopus (environ 20000 références avant tri sur le titre et résumé), les experts ont retenu la revue de consensus REVIHAAP⁷ de l'OMS Europe, publiée en 2013, comme point de départ de la littérature à investiguer. Ainsi, les études publiées depuis la publication de la revue REVIHAAP et jusqu'en février 2016⁸ ont été incluses dans le processus d'évaluation du poids des preuves.

La population ciblée est la population générale, incluant les sous-populations plus vulnérables et sensibles à la pollution de l'air.

Les expositions ciblées sont les concentrations de particules de l'air ambiant extérieur catégorisées par composé, taille et source (Annexe 1). Les publications qui considéraient les PM₁₀ et PM_{2,5} sans spéciation chimique ou affectation de source ont été exclues. Les comparateurs⁹ ciblés sont une absence d'exposition ou des niveaux d'exposition plus faibles. Les durées d'exposition considérées sont les expositions à court terme (un à plusieurs jours chez l'Homme) et long terme (une à plusieurs années chez l'Homme).

Les événements néfastes pour la santé (cliniques et infracliniques) documentés dans la littérature analysée (Annexes 2 et 3) ont été répartis dans neuf grandes catégories sanitaires : santé respiratoire, santé cardiovasculaire, mortalité toutes causes, hospitalisations toutes causes, santé neurologique, santé périnatale, santé de la reproduction, cancers broncho-pulmonaires, autres cancers et diabète (incluant des troubles du métabolisme). Les études ont été incluses quelle que soit leur localisation géographique.

Étape 2 : Recherche et sélection des publications

Une recherche bibliographique sur les moteurs de recherche Pubmed et Scopus, ainsi que la littérature connue des experts, ont permis d'identifier 4 677 références publiées depuis REVIHAAP et jusqu'en février 2016. Après un premier tri (titres et résumés, double lecture par les coordinateurs du groupe de travail), 244 références ont été retenues comme éligibles au vu du périmètre précédemment défini. Après évaluation du texte intégral (double lecture par des membres du GT), 160 publications ont finalement été retenues, correspondant à 127 études chez l'Homme (observationnelle, clinique ou semi-expérimentale) et 33 études d'expérimentation animale (d'exposition unique, (sub) aiguë ou (sub) chronique).

Étape 3 : Extraction des données descriptives des études

Toutes les publications ont été lues par un ou deux membres du GT (deux membres pour les études humaines, un membre pour les études d'expérimentation animale) afin d'en collecter les données (qualitatives) descriptives. Ces descriptions individuelles suivent un format de grille proposé par

⁷ REVIHAAP : review of evidence on health aspects of air pollution – revue de la littérature / des preuves sur les aspects sanitaires de la pollution de l'air, OMS 2013

⁸ La date la plus récente de publication des études analysées a été arrêtée à février 2016, en raison du nombre déjà important d'études sur cette période et du temps nécessaire à leur analyse dans le cadre de la démarche d'évaluation du poids des preuves au regard du calendrier de travail. Une description des études publiées de février 2016 jusqu'en août 2018 a été réalisée, afin de mettre en lumière les dernières tendances de recherche et leur évolution éventuelle.

⁹ Les comparateurs (au sens de l'approche PECOTS) renvoient typiquement à une absence d'exposition dans les études expérimentales (groupe d'étude non traité) et à des niveaux d'exposition plus faibles dans les études observationnelles en population générale sur les effets des particules de l'air ambiant.

l'OHAT et synthétisent des informations concernant : les sujets (humains, animaux), les méthodes utilisées (durée de suivi, protocole d'étude, événements et catégories d'effets, mesure ou estimation de l'exposition...) et les résultats.

Étape 4 : Evaluation de la qualité des études individuelles

Le risque de biais a été évalué dans chacune des 160 études en utilisant une adaptation de l'outil de cotation proposé par l'OHAT qui s'applique à la fois aux études humaines et d'expérimentation animale. L'outil inclut 14 questions liées à de potentielles sources de biais, réparties en plusieurs grandes catégories (sélection, attrition, interprétation, confusion, détection, autres). Les quatre options de réponse représentent un gradient de plausibilité du risque de biais : risque faible, risque probablement faible, risque probablement fort et risque fort.

Les risques de biais dans chaque étude ont été évalués de manière indépendante puis discutés par deux membres du GT afin d'obtenir une cote finale. Toute divergence dans les cotations a fait l'objet de discussions pouvant inclure l'ensemble des membres du GT afin d'aboutir à un consensus.

Indépendamment de la cotation des risques de biais des études, un niveau de confiance initial a été calculé pour chaque étude en sommant les réponses à 4 questions (1 si oui, 0 si non) définissant des caractéristiques importantes liées au protocole de l'étude : l'exposition est-elle contrôlée ? L'exposition précède-t-elle l'effet ? Les données de l'effet sont-elles individuelles ? Existe-t-il un groupe de comparaison ?

Étape 5 : Cote du niveau de confiance des corpus d'études

Les publications ont été regroupées en corpus d'études dans un ensemble de lignes de preuves, selon les composés/sources, durées d'exposition, catégories d'effet et événements sanitaires examinés dans chacune. Une ligne de preuve rassemble ainsi des informations intégrées, de même nature. Au total, 724 lignes de preuves ont été obtenues d'après les 127 publications d'études chez l'Homme et 314 lignes de preuves ont été obtenues d'après les 33 publications d'études expérimentales chez l'animal. La qualité des corpus dans chacune des lignes de preuve a été évaluée sur la base de 10 facteurs proposés par l'OHAT (voir Figure 1 étape 5).

Le niveau de confiance final du corpus correspond au niveau de confiance initial des publications (de 1 à 4, cf. étape 4) auquel sont soustraits les facteurs de diminution (de 0 à 5) et additionnés les facteurs d'augmentation (de 0 à 5), selon le principe présenté dans la Figure 1, Etape 5. Chaque ligne de preuve a été évaluée, de manière indépendante, par un membre du GT puis discutée par le groupe au complet. Les décisions (d'augmentation et diminution du niveau de confiance) étaient actées après consensus.

Pour finir, dans chaque ligne de preuve, une conclusion a été tirée par le groupe de travail sur la base des résultats fournis par le corpus quant à la direction de l'effet sur la santé (effet néfaste vs. absence d'effet néfaste).

Étape 6 : Traduction en niveau d'indication d'effet sanitaire

Le niveau de confiance final du corpus et la direction d'effet sur la santé ont ensuite été combinés pour obtenir un niveau d'indication d'effet sanitaire d'un composé/source d'intérêt sur un événement sanitaire, pour une durée déterminée, selon le principe et les libellés présentés dans la Figure 1, Etape 6. Par exemple, une indication « forte » d'effet traduit une confiance « forte » dans le corpus (i.e. niveau de confiance final à 4) à l'égard de l'effet d'une exposition sur un événement sanitaire d'intérêt.

Les niveaux d'indication d'effet définis pour chacun des composés/sources, durées (ex : court terme), et événements sanitaires (ex : mortalité cardiovasculaire, hospitalisations pour causes cardiovasculaires, pression artérielle, etc.) ont été regroupés pour permettre de conclure à une indication d'effet sur la catégorie sanitaire correspondante (ex : santé cardiovasculaire). Les mêmes

libellés sont utilisés : « fort », « modéré », « faible », « inadéquat », et « pas d'effet sanitaire ». Pour les études chez l'Homme, le groupe de travail a mis en place un arbre de décision permettant de standardiser au mieux la définition du niveau d'indication d'effet pour chacun des composés/sources, durées d'exposition, et catégories sanitaires. Cet arbre intègre les niveaux d'indication d'effet sur les événements sanitaires (précédemment obtenus), la sévérité de ces événements (clinique ou infraclinique), le nombre de publications des corpus, et les éventuels risques de biais ou d'invalidité externe identifiés à l'étape 5. Pour les études d'expérimentation animale, un arbre décisionnel identique a été suivi sans faire de distinction entre les durées d'exposition (sub) aiguës et (sub)chroniques. Lorsque le corpus incluait seulement des études d'exposition unique (études mécanistiques), le niveau d'indication d'effet retenu était systématiquement « inadéquat ».

Etape 7 : Conclusion sur le niveau d'indication d'effet sanitaire

Les indications d'effets sanitaires obtenus sur la base des études publiées après REVIHAAP et jusqu'en février 2016¹⁰ (objets de la présente démarche d'évaluation du poids de la preuve) ont été synthétisées, afin d'être comparées au socle de connaissances apporté par la revue REVIHAAP. Ces deux apports sont mis en perspectives afin de conclure sur le poids des preuves des effets sur la santé de l'exposition aux particules de l'air ambiant d'après les études chez l'Homme et d'expérimentation animale, en mettant en évidence certaines tendances telles que la confirmation d'effets sur la santé déjà rapportés ou l'identification de nouvelles indications d'effets sanitaires (cf. Annexes 4 et 5).

3.2. Impact sur la pollution atmosphérique des technologies et de la composition du parc de véhicules automobiles circulant en France : méthodologie et analyse conduite

La méthode retenue afin d'évaluer l'impact de plusieurs scénarios d'évolution technologique du parc automobile sur les émissions issues du trafic et la qualité de l'air en Île-de-France et plus généralement en France s'est appuyée sur des calculs de simulations.

Pour répondre 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-France¹¹ et sur le territoire national (France métropolitaine) a été développée et mise en œuvre en considérant différents scénarios d'évolution de la composition du parc automobile (Figure 2).

¹⁰ Une description des 196 études publiées depuis février 2016 jusqu'en août 2018 a été réalisée montrant des tendances de recherche similaires à celles observées de janvier 2013 (REVIHAAP) à février 2016. En effet, la majorité des études chez l'Homme examine encore des événements sanitaires liés à la santé cardiovasculaire et à la santé respiratoire. Les composés les plus étudiés restent le carbone suie et le carbone élémentaire (n=26 publications), les particules ultrafines et les particules grossières (n=20). La source la plus étudiée reste le trafic routier (n=18) devant la combustion de biomasse (n=9) et la catégorie de source « industries » (n=8).

¹¹ La région Île-de-France a été choisie en raison de la disponibilité des outils et données à une échelle fine, et de l'enjeu important de pollution auquel contribue le trafic dans cette région, tandis que l'analyse sur le territoire national permet une représentativité élargie ainsi qu'une analyse selon les lieux et contextes.

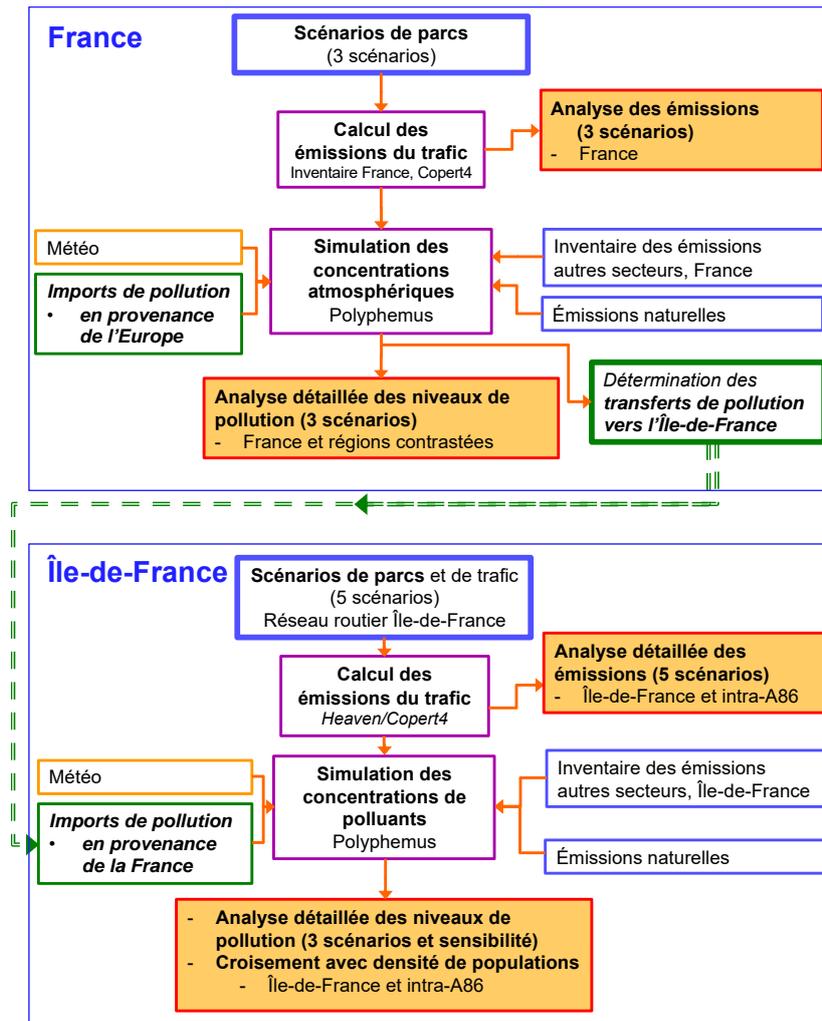


Figure 2 : Schéma de simulation des émissions et concentrations de polluants pour la France (en haut) et pour l'Île-de-France (en bas)

Cette approche combine des outils existants : plate-forme de modélisation Heaven d'Airparif et inventaire national du CITEPA pour le calcul des émissions de polluants du trafic en Île-de-France et en France (méthodologie européenne COPERT4) ; plate-forme Polyphemus de simulation des concentrations atmosphériques pour l'échelle régionale. Elle a également mobilisé de nombreuses données : trafic modélisé sur l'ensemble du territoire Île-de-France, données météorologiques, inventaires Île-de-France, France et Europe des émissions de polluants des différents secteurs d'activités, etc... Globalement, la démarche prend en compte les émissions de polluants anthropiques et naturelles, et les imports d'émissions des échelles supérieures (Europe vers France, France vers Île-de-France, cf. Figure 1). Elle intègre les interactions physicochimiques connues entre les polluants (ces dernières sont modélisées par des codes de calcul intégrés aux plates-formes de modélisation utilisées et citées ci-dessus).

Les scénarios d'évolution technologique des compositions du parc automobile ont été élaborés par le GT à partir des compositions actuelles du parc (Île-de-France et nationale, situation de référence, année 2014 – pour laquelle des données détaillées de parc, trafic et inventaires d'émission étaient disponibles).

Un modèle a été utilisé pour simuler le renouvellement des véhicules et l'évolution du parc à l'horizon 2025 (André *et al.*, 2016) selon les hypothèses suivantes :

- **Scénario FAP ou S1** : Généralisation du filtre à particules (les différentes technologies actuelles) et évolution concomitante de la réglementation des émissions (normes 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 des résultats de simulation 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 alors tous supposés 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 uniquement vis-à-vis des 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 (ou S1), 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 (ou S1).
- **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 (ou S1), sans réduction de trafic.

Plusieurs hypothèses et données d'entrées 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 de trafic (sauf pour le scénario « Ambition Air » où une réduction du trafic est considérée) et les conditions de circulation.

Les résultats des simulations ont été élaborés en combinant des statistiques d'évolution des concentrations de polluants (valeurs moyennes, valeurs en dépassement de seuils tels que les valeurs guides de qualité de l'air ambiant de l'OMS pour les PM_{2,5}) et des analyses territoriales. 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 atmosphérique, et des enjeux.

Ces travaux de simulation ont été complétés par une analyse documentaire de l'évolution rétrospective des émissions et concentrations de polluants en France et en Île-de-France.

Les polluants pris en compte dans les simulations sont :

- à l'émission : les polluants particulaires déclinés en masse et par classes de taille (PM_{10} , $PM_{2,5}$, $PM_{1,0}$)¹², en nombre de particules (PN) et selon leur nature (carbone suie ou *Black Carbon* BC¹³, matière organique OM), les polluants gazeux (oxydes d'azote NOx et dioxyde d'azote NO₂, ammoniac NH₃, composés organiques volatils COV, monoxyde de carbone CO) qui interviennent dans la formation des aérosols secondaires et de l'ozone O₃, ainsi que le CO₂ en raison de l'enjeu climatique ;
- dans l'atmosphère (en concentrations) : les polluants particulaires déclinés en masse et par classes de taille ($PM_{2,5}$, PM_{10}), en nombre de particules (PN) et selon leur nature (BC, fractions organiques et inorganiques des PM_{10}), ainsi que les polluants gazeux NO₂ et O₃.

Les travaux incluent une analyse critique de l'approche 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 de paramètres tels que les composés organiques semi-volatils (COSV) illustre la sensibilité des simulations.

Au final, les travaux présentés constituent une expérience assez unique par la mobilisation de moyens, données et compétences complémentaires en vue de la simulation des émissions et concentrations de polluants atmosphériques selon 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.

¹² PM_{10} , $PM_{2,5}$, $PM_{1,0}$: masse de particules de diamètre aérodynamique médian inférieur à 10 μ m, 2,5 μ m et 1 μ m respectivement.

¹³ Le carbone suie est un composé constitué de carbone (C) que l'on mesure généralement dans la fraction $PM_{2,5}$. Il est produit par les combustions incomplètes de combustibles d'origine fossile et biomassique.

3.1. Conclusions du GT et du CES

3.1.1. Conclusions relatives aux effets sanitaires des particules selon leur composition, leur granulométrie et leur source

a) Préambule

En réponse au premier volet de la saisine, les preuves rapportées dans la revue REVIHAAP de l'OMS Europe (publiée en 2013) et les niveaux d'indications sanitaires obtenus à partir des études chez l'Homme publiées depuis, sont illustrés de manière synthétique sous forme de tableaux en Annexe 4 pour les composés, et en Annexe 5 pour les sources des particules de l'air ambiant extérieur.

Les conclusions générales présentées par la suite résultent d'une mise en perspectives des conclusions de la revue REVIHAAP (socle de connaissances de départ) avec les indications sanitaires obtenues sur la base des études publiées depuis REVIHAAP jusqu'en février 2016 (études humaines et études d'expérimentation animale). Les indications accumulées depuis REVIHAAP font référence aux niveaux d'indication d'effet sanitaire obtenus sur la base des études publiées depuis REVIHAAP jusqu'en février 2016 :

- Ces indications, si elles sont modérées ou fortes, viennent confirmer l'effet sanitaire d'un composé ou d'une source lorsque REVIHAAP évoquait déjà, en 2013, l'effet spécifique de ce composé ou de cette source.
- Ces indications sont considérées nouvelles et viennent étayer l'effet sanitaire d'un composé ou d'une source lorsque REVIHAAP n'évoquait pas d'effet spécifique.
- Ces indications, si elles sont inadéquates ou faibles, ne permettent pas de conclure à un effet sanitaire ou ne font que suggérer cet effet ; elles sont le reflet d'une littérature émergente ne mettant pas en évidence d'associations, ou d'une littérature présentant un niveau de confiance¹⁴ insuffisant pour conclure malgré des associations observées.
- Des indications inexistantes font référence à l'absence d'études publiées depuis REVIHAAP parmi celles sélectionnées et évaluées dans le cadre des présents travaux.
- Une indication d'absence d'effet sanitaire correspond à une littérature présentant un niveau de confiance élevé et ne mettant pas en évidence d'association entre un composé ou une source et une catégorie d'effets sanitaires.

Les conclusions portent spécifiquement sur les effets sanitaires des composés et sources des particules de l'air ambiant extérieur. Ces conclusions ne remettent pas en cause les preuves apportées par la littérature issue d'autres corpus sur la nocivité des substances ou sur les effets sur la santé des particules (notamment pour la silice, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les particules d'échappement des moteurs Diesel, les particules d'échappement des moteurs essence, les particules issues de sources industrielles spécifiques et les particules issues de la combustion de biomasse). **Enfin, ces conclusions ne remettent pas en cause les preuves apportées par la littérature sur les effets sanitaires des PM_{2,5} et des PM₁₀ sans spéciation chimique ou répartition en sources.**

¹⁴ Niveau de confiance du corpus défini à partir de l'outil de cotation proposé par l'OHAT, Étape 6 Figure 1.

b) Conclusions par composés des particules de l'air ambiant extérieur

➤ *Particules ultrafines (<100 nm) et particules grossières (PM_{2,5-10})*

En 2013, REVIHAAP concluait à un effet sanitaire seulement suggestif pour les particules grossières et à des preuves encore limitées pour les particules ultrafines. Les indications accumulées depuis REVIHAAP sont modérées et confirment l'effet sanitaire de ces fractions sur la base de corpus larges d'études humaines, présentant un bon niveau de confiance et examinant de nombreuses catégories d'effets. Pour les particules ultrafines, les indications accumulées depuis REVIHAAP sur la base d'études d'expérimentation animale confortent ce résultat. Les niveaux d'indications sanitaires les plus élevés chez l'Homme sont obtenus pour la santé respiratoire (particules grossières), la santé cardiovasculaire (particules ultrafines), et la mortalité toutes causes (particules grossières). Enfin, les nouvelles indications accumulées depuis REVIHAAP sont faibles et ne font que suggérer un effet à long terme des particules ultrafines sur la santé neurologique (développement des performances cognitives de l'enfant), en raison du corpus limité à une unique publication.

➤ *Matières carbonées*

En 2013, REVIHAAP concluait à des preuves suffisantes d'un effet sanitaire du carbone suie, et à des preuves croissantes pour le carbone organique. Les indications accumulées depuis REVIHAAP sont fortes et confirment l'effet sanitaire de ces composés sur la base de larges corpus d'études humaines, présentant un bon niveau de confiance et examinant de nombreuses catégories d'effets. Les indications accumulées depuis REVIHAAP sur la base des études d'expérimentation animale tendent à conforter un effet sanitaire des matières carbonées avec des niveaux d'indication qui sont faibles à modérés. Les niveaux d'indications sanitaires les plus élevés chez l'Homme sont obtenus pour la santé respiratoire, la santé cardiovasculaire, la mortalité toutes causes, et les hospitalisations toutes causes, tant sur le court terme que sur le long terme. Enfin, les nouvelles indications accumulées depuis REVIHAAP sont faibles et suggèrent un effet à long terme du carbone suie des particules de l'air ambiant sur la santé neurologique (développement des performances cognitives de l'enfant) et sur la santé périnatale (faible poids de naissance), deux catégories sanitaires non évoquées dans REVIHAAP.

En 2013, REVIHAAP n'examinait pas les effets sanitaires des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) des particules de l'air ambiant extérieur et des aérosols organiques secondaires (AOS) en tant que facteur source¹⁵. Dans le cas des AOS (facteur source), les nouvelles indications accumulées depuis REVIHAAP sont inadéquates et ne permettent pas de conclure fermement à un effet sanitaire, en raison d'une littérature émergente, de taille encore réduite, ne mettant pas en évidence d'associations ; de plus, l'hétérogénéité des facteurs sources définis dans les publications peut rendre difficile l'interprétation et la comparaison des résultats. Dans le cas des HAP, les nouvelles indications accumulées depuis REVIHAAP sont faibles et ne permettent pas de conclure fermement à un effet sanitaire, en raison du niveau de confiance insuffisant placé dans le corpus ; aussi, la grande diversité des HAP contenus dans les particules de l'air ambiant rend difficile la comparaison des résultats. Cependant, les HAP peuvent être associés au carbone suie et sont inclus dans le carbone organique mesurés dans l'air ambiant, pour lesquels les indications accumulées sont fortes. De plus, il existe une large littérature, non prise en compte dans la présente expertise, sur la nocivité de certains HAP (exposition classée cancérigène par le CIRC).

➤ *Aérosols inorganiques secondaires*

En 2013, REVIHAAP rapportait des associations entre le sulfate et le nitrate, traceurs des aérosols inorganiques secondaires (AIS) dans l'air ambiant, et des événements néfastes pour la santé, mais ne concluait pas à un niveau de preuve en raison du manque d'indication sur le caractère direct et causal de l'association. Les indications accumulées depuis REVIHAAP sont fortes et confirment les

¹⁵ Facteur (regroupement de composés corrélés) obtenu par une méthode statistique de répartition des composés en catégories, représentant souvent les sources d'émissions ; par exemple, factorisation de matrice positive ou analyse en composante principale.

effets sanitaires du sulfate et du nitrate d'après des corpus larges d'études humaines, présentant un bon niveau de confiance et examinant de nombreuses catégories d'effets. Sur la base des études d'expérimentation animale, les indications accumulées depuis REVIHAAP sont faibles concernant les effets du nitrate présent dans des échappements de moteurs Diesel et essence sur la santé cardiovasculaire – lésions d'athérosclérose et effet sur la numération de la formule sanguine. Les niveaux d'indications sanitaires les plus élevés chez l'Homme sont obtenus pour la santé respiratoire, la santé cardiovasculaire, et la mortalité toutes causes. De plus, les nouvelles indications accumulées depuis REVIHAAP sont modérées et suggèrent un effet à long terme du sulfate et du nitrate des particules de l'air ambiant sur la santé périnatale (faible poids de naissance), une catégorie sanitaire non évoquée dans REVIHAAP. Bien que l'évaluation réalisée dans les présents travaux prenne en compte de nombreux critères de causalité, il ne peut être exclu que les indications sanitaires obtenues reflètent la capacité des sulfates et nitrates à moduler la toxicité des particules dans leur ensemble ou le potentiel effet sanitaire de leurs sources communes (combustions), plutôt que leur toxicité intrinsèque.

En 2013, REVIHAAP n'évoquait pas les effets d'autres aérosols inorganiques secondaires, tels que l'ammonium, ou des AIS en tant que facteur source. Dans le cas des AIS (facteur source), les nouvelles indications accumulées depuis REVIHAAP sont faibles et ne permettent pas de conclure à un effet sanitaire, en raison d'une littérature émergente, de taille réduite, ne présentant pas un niveau de confiance suffisant ; de plus, l'hétérogénéité des facteurs sources définis dans les publications rend difficile la comparaison des résultats. Dans le cas de l'ammonium, les nouvelles indications accumulées depuis REVIHAAP sont faibles et ne permettent pas de conclure fermement à un effet sanitaire, car le corpus ne présentait pas un niveau de confiance suffisant. Cependant, les niveaux d'ammonium sont généralement corrélés à ceux du sulfate et du nitrate, pour lesquelles les indications accumulées sont fortes.

➤ **Métaux de transition**

En 2013, REVIHAAP rapportait des associations entre certains métaux (nickel, zinc, vanadium ; en mélanges) et la santé. Les nouvelles indications accumulées depuis REVIHAAP, de modérées à fortes pour ces composés, viennent étayer les effets sanitaires du nickel, du zinc, du vanadium et du fer sur la base de larges corpus d'études humaines, présentant un bon niveau de confiance et examinant de nombreuses catégories d'effets. Les niveaux d'indications sanitaires les plus élevés sont obtenus pour la santé cardiovasculaire, la santé respiratoire (nickel et vanadium), et la mortalité toutes causes (fer). Cependant, il est difficile de distinguer les effets individuels des métaux de transition en raison de la forte corrélation des concentrations mesurées, liée à leurs sources communes : l'usure des freins et des pneus (fer, zinc et cuivre) et l'industrie ou la combustion (nickel, vanadium et fer). Ainsi, les indications sanitaires obtenues pour les métaux, considérés individuellement dans la démarche d'évaluation, peuvent tout à fait témoigner de l'effet sanitaire de leurs sources communes ou des métaux en mélange.

➤ **Autres composés chimiques des particules de l'air ambiant**

Aucune démarche d'évaluation du poids de la preuve n'a été mise en place pour les autres composés ou éléments (métalliques, inorganiques ou minéraux) des particules de l'air ambiant historiquement considérés comme moins souvent associés à des effets sur la santé dans les études épidémiologiques. Les études publiées depuis REVIHAAP, décrites au cours des travaux, rapportent néanmoins des associations entre la santé (respiratoire et cardiovasculaire) et le calcium, le potassium, le magnésium, le manganèse, le plomb et le chlorure. Certains de ces composés peuvent être associés à des sources (potassium : traceur de la combustion de biomasse), à des phénomènes (calcium : phénomène d'abrasion et envol des poussières liés aux chantiers, aux gravières et au travail ou à l'érosion des sols), ou à d'autres composés évalués individuellement.

➤ **Silice**

La revue REVIHAAP n'évoquait pas les effets sur la santé de la silice dans l'air ambiant extérieur. Les nouvelles indications accumulées depuis REVIHAAP sont modérées et viennent étayer les effets sanitaires de la silice contenue dans les particules de l'air ambiant, notamment sur la santé

respiratoire et la mortalité toutes causes, sur la base d'un corpus large d'études humaines présentant un bon niveau de confiance et examinant de nombreuses catégories d'effets. Il existe par ailleurs une large littérature, non évaluée ici, sur la nocivité de la silice cristalline (exposition classée cancérigène par le CIRC).

➤ **Endotoxines**

La revue REVIHAAP n'évoquait pas les effets sur la santé des endotoxines dans l'air ambiant extérieur. Les nouvelles indications accumulées depuis REVIHAAP sont modérées et viennent étayer les effets sanitaires des endotoxines contenues dans les particules de l'air ambiant, notamment sur la santé cardiovasculaire, sur la base d'un corpus de petite taille mais présentant un bon niveau de confiance. Le manque de standardisation dans les protocoles de mesure et d'analyse des endotoxines, ainsi que la diversité des composés auxquels elles peuvent s'attacher, appellent à la prudence dans l'interprétation de ces conclusions. Cependant, il existe une large littérature, non prise en compte dans cette expertise, examinant la nocivité de l'exposition à de fortes concentrations d'endotoxines chez des travailleurs manipulant de la matière organique, tels que les égoutiers, les ouvriers des usines de tri et de traitement de déchets et les agriculteurs.

➤ **Potentiel oxydant des particules**

Le potentiel oxydant des particules n'est pas un composé en soi. Il s'agit d'un indicateur mesuré par des tests acellulaires quantifiant la capacité intrinsèque des particules à générer des espèces réactives de l'oxygène¹⁶. Le potentiel oxydant des particules est proposé depuis quelques années comme une « métrique », autre que la masse ou la composition chimique des particules atmosphériques, pour évaluer leurs effets sanitaires.

En 2013, REVIHAAP ne faisait qu'évoquer le stress oxydant comme mécanisme potentiel de l'effet des particules sur la santé. Les nouvelles indications accumulées depuis REVIHAAP sont faibles et ne font que suggérer un effet du potentiel oxydant des particules sur la santé respiratoire et la santé cardiovasculaire, car la littérature est encore émergente (corpus de taille réduite) et ne présente pas un niveau de confiance suffisant pour permettre de conclure fermement. Sur la base des études d'expérimentation animale, les indications accumulées depuis REVIHAAP sont faibles et concernent les effets respiratoires et cardiovasculaires (infiltration inflammatoire respiratoire et inflammation systémique) du stress oxydant induit par l'inhalation de particules de l'air ambiant chez des souris. Il est à noter que la mesure du potentiel oxydant des particules est encore récente et plusieurs méthodes de mesure non standardisées existent, chacune sensible à des molécules ou des familles d'espèces chimiques qui peuvent être différentes. Cela peut expliquer en partie les limitations de taille et de confiance dans le corpus.

c) Conclusions par sources des particules de l'air ambiant extérieur

➤ **Trafic routier**

En 2013, la revue REVIHAAP concluait à des preuves suffisantes d'effets sur la santé du carbone suie (émis majoritairement par les véhicules Diesel dans la plupart des environnements urbains) et à des associations probables avec les PM_{2,5} liées au trafic routier et avec les poussières de route (incluant la matière crustale). Les nouvelles indications accumulées depuis REVIHAAP, de fortes à modérées selon le type d'émissions (ex : carbone suie lié au trafic, PM_{2,5} liées au trafic et poussières de route / matière crustale), confirment l'effet sanitaire de la source « trafic routier » dans son ensemble sur la base de corpus d'études humaines présentant un bon niveau de confiance et examinant de nombreuses catégories d'effets. Les corpus pour le carbone suie lié au trafic routier, les particules d'échappement Diesel et les particules d'échappement essence étaient néanmoins de petite taille. Les indications accumulées depuis REVIHAAP sur la base des études d'expérimentation

¹⁶ La capacité des particules à générer des ERO est impliquée, avec d'autres voies moléculaires et cellulaires, dans l'induction de stress oxydant dans les cellules cibles pulmonaires. Le stress oxydant est un mécanisme de la toxicité des particules. La capacité des particules à générer des ERO est également liée à la composition et à la surface des particules.

animale tendent à conforter un effet sanitaire de la source « trafic routier » avec des niveaux d'indication qui sont faibles à modérées concernant les effets respiratoires (lésions ultra structurales, fonction respiratoire, remodelage pulmonaire) et cardiovasculaires (fonction vasculaire, coagulation, lésions d'athérosclérose) des PM_{2,5} liées au trafic routier et des particules d'échappement Diesel. Les niveaux d'indications sanitaires les plus élevés chez l'Homme sont obtenus pour le carbone suie lié au trafic routier (sur la santé respiratoire, la santé cardiovasculaire, et la mortalité toutes causes) et les poussières de routes (sur la santé respiratoire), d'après des corpus larges. Les nouvelles indications accumulées depuis REVIHAAP sont modérées et suggèrent un effet à long terme des PM_{2,5} issues du trafic routier sur la santé neurologique et la santé périnatale, deux catégories sanitaires non évoquées dans REVIHAAP. Les conclusions pour la source « trafic routier » sont cohérentes avec les indications obtenues pour certains composés évalués individuellement, tels que le carbone suie, le carbone organique et certains métaux. Indépendamment du corpus sur les effets des particules de l'air ambiant extérieur issues du trafic routier, il existe une large littérature, non évaluée ici, sur la nocivité des effluents d'échappement des moteurs Diesel et des particules Diesel (exposition classée cancérigène par le CIRC) et des effluents d'échappement des moteurs à essence (exposition classée cancérigène probable par le CIRC).

➤ **Combustion de charbon et de produits pétroliers**

En 2013, REVIHAAP rapportait des preuves solides de l'effet sur la santé de la combustion de charbon, en se basant notamment sur les preuves rapportées d'un effet du sulfate ; seules des associations mitigées étaient rapportées pour la combustion de produits pétroliers. Les indications accumulées depuis REVIHAAP confirment les effets sanitaires des particules de l'air ambiant issues de ces sources d'après des corpus larges d'études humaines, présentant un bon niveau de confiance et examinant plusieurs événements sanitaires. Les indications vont de fortes pour la combustion de charbon à modérées pour la combustion de produits pétroliers. Ces conclusions sont cohérentes avec les indications sanitaires obtenues pour certains composés évalués individuellement : le sulfate (traceur de la combustion de charbon), le nickel et le vanadium (traceurs de la combustion de produits pétroliers). Par ailleurs, il existe une large littérature, non évaluée ici, sur la nocivité des émissions issues de la combustion de charbon, notamment pour la combustion domestique (cuisine et chauffage) à l'intérieur des habitations dans des pays en voie de développement (exposition classée cancérigène par le CIRC).

➤ **Combustion de biomasse**

En 2013, REVIHAAP évoquait une association probable entre les émissions particulières de la combustion de biomasse et la santé, en se basant principalement sur des publications s'intéressant aux événements de santé durant des épisodes de feux de forêts. Les indications accumulées depuis REVIHAAP sont inadéquates et ne permettent pas de conclure à un effet sanitaire des particules issues de la combustion de biomasse dans l'air ambiant extérieur, en raison d'un corpus de taille réduite rapportant des résultats peu concluants. Le corpus évalué est restreint vraisemblablement en raison des critères de sélection des études utilisés favorisant l'inclusion des publications utilisant des méthodes statistiques de répartition des sources. Néanmoins, de nombreuses associations entre la santé et le potassium, traceur de la combustion de biomasse, ont été rapportées dans les études publiées depuis REVIHAAP. Par ailleurs, il existe une large littérature, non évaluée ici, sur la nocivité des émissions issues de la combustion de biomasse, notamment pour la combustion domestique (cuisine et chauffage) à l'intérieur des habitations dans des pays en voie de développement (exposition classée cancérigène par le CIRC).

➤ **Industrie**

En 2013, REVIHAAP rapportait des associations entre la catégorie de sources « industrie » et des effets sur la santé, mais ne concluait pas à un niveau de preuve en raison de l'hétérogénéité de cette catégorie, pouvant inclure une source dominante, un mélange de sources, ou diverses sources de combustion. Les indications accumulées depuis REVIHAAP, d'inadéquates à faibles selon le type d'industrie, ne permettent pas de conclure fermement à un effet sanitaire des émissions particulières de sources industrielles, en raison de corpus d'études présentant un niveau de confiance insuffisant

ou rapportant des résultats peu concluants. De plus, l'hétérogénéité des définitions de la source « industrie » dans les différentes publications évaluées rend difficile l'interprétation et la comparaison des résultats. Néanmoins, les effets sanitaires potentiels de cette catégorie de sources sont cohérents avec les indications obtenues pour la combustion de charbon et de produits pétroliers ainsi que pour certains métaux évalués individuellement (nickel et vanadium). Par ailleurs, il existe une large littérature, non évaluée ici, sur les effets néfastes pour la santé humaine de contaminations environnementales par des sites industriels (ex : OMS Europe, 2014).

➤ **Sites de déchets dangereux**

En 2013, REVIHAAP évoquait deux publications ne rapportant pas d'association claire entre la proximité résidentielle à des sites de stockage de déchets dangereux et la santé périnatale. Les indications accumulées depuis REVIHAAP sont inadéquates et ne permettent pas de conclure à un effet sanitaire de cette catégorie de source, en raison d'un corpus composé d'une unique publication rapportant de résultats peu concluants pour de nombreux événements de santé. Le corpus évalué est réduit vraisemblablement en raison des critères de sélection des études favorisant les publications utilisant des méthodes statistiques de répartition des sources.

➤ **Agriculture**

En 2013, REVIHAAP n'évoquait pas les effets sanitaires des particules de l'air ambiant extérieur issues de l'agriculture. Les nouvelles indications accumulées depuis REVIHAAP sont inexistantes (études chez l'Homme) ou inadéquates (études d'expérimentation animale), ce qui ne permet pas de conclure sur un effet sanitaire des particules issues de cette catégorie de source. Le corpus évalué est réduit vraisemblablement en raison des critères de sélection des études favorisant les publications utilisant des méthodes statistiques de répartition des sources (dans ces publications, l'application de ces méthodes n'identifiait pas de source agricole). Par ailleurs, il existe une large littérature, non évaluée ici, examinant les effets sur la santé de l'exposition professionnelle aux pesticides.

➤ **Poussières de désert**

En 2013, REVIHAAP évoquait une augmentation de la fréquence des événements sanitaires néfastes pendant des épisodes de pollution de l'air ambiant par des poussières en provenance de déserts. Les indications accumulées depuis REVIHAAP sont modérées et confirment l'effet sanitaire des poussières de désert, notamment sur la santé respiratoire de l'enfant, sur la base d'un corpus de taille réduite mais présentant un bon niveau de confiance.

➤ **Sels et embruns marins**

En 2013, REVIHAAP rapportait des associations mitigées entre les sels et embruns marins et la santé et suggérait même une absence d'effet sanitaire. Les indications accumulées depuis REVIHAAP ne permettent pas de conclure à un effet sanitaire des sels et embruns marins, ce qui soutiendrait l'indication d'absence d'effet sur la santé, sur la base d'un corpus large d'études humaines.

3.1.2. Conclusions relatives à l'impact sur la pollution atmosphérique des technologies et de la composition du parc de véhicules automobiles circulant en France à l'horizon 2025

Avertissement : Toute comparaison de ces travaux avec des études d'impacts de politiques publiques (mise en place de zones de circulation restreinte¹⁷, annonce de restriction ou interdiction des véhicules thermiques, etc.) est à éviter. En effet, les scénarios simulés dans la présente expertise comparent différentes hypothèses technologiques (voire de réduction du trafic) dans l'hypothèse où les autres variables du contexte sont constantes. Ils n'intègrent pas d'évolution démographique, ni d'évolution des comportements en matière de mobilité, ni d'évolution des émissions en dehors de celles du trafic automobile ou d'évolution du contexte économique. Ils permettent une étude de sensibilité de la pollution de l'air à différentes évolutions technologiques du parc automobile roulant, et ne sont pas une étude prospective de la pollution de l'air en lien avec des politiques publiques.

En réponse à ce second volet de la saisine relatif aux émissions de la source « trafic routier », les impacts des scénarios prospectifs variant en composition technologique du parc automobile roulant (motorisations, systèmes de dépollution) sont illustrés de manière synthétique sous forme de tableaux en Annexe 6 (impact sur les émissions en T/an) et en Annexe 7 (impact sur les concentrations atmosphériques en $\mu\text{g}/\text{m}^3$), pour les principaux polluants particuliers et gazeux.

Les conclusions sont présentées ci-après en distinguant :

- d'une part, ce qui relève des résultats strictement issus des simulations et de leur analyse ;
- et d'autre part, ce qui relève d'une mise en perspective de ces résultats dans un contexte plus général où les évolutions et les enjeux ne se limitent pas à l'impact des technologies automobiles sur la pollution de l'air (*texte décalé en italique*) ; ces éléments de conclusions ou de recommandations associés sont donc basés sur une élicitation des dires d'experts par auto-analyse à la lumière des scénarios étudiés et de la connaissance de leurs limites.

➤ **Importance relative du trafic et des différentes catégories de véhicules sur l'émission de polluants dans l'air ambiant**

Le trafic routier est le principal émetteur dans l'air ambiant de certains polluants comme le carbone suie (BC), la matière organique (OM) et les oxydes d'azote (NOx) en zone urbaine. Il produit également une part importante des PM_{2,5} et PM₁₀ et de leurs précurseurs gazeux et contribue de ce fait assez fortement à la pollution urbaine. Au sein du trafic routier, les voitures particulières sont globalement prédominantes, mais chacune des autres catégories de véhicules peut s'avérer importante en regard de certains polluants.

➤ **Baisse des émissions simulées dans les différents scénarios**

La simulation des émissions et concentrations de polluants dans l'air ambiant en Île-de-France et la France, à l'horizon 2025 et selon le scénario « quasi au fil de l'eau » (scénario S1), montre que les émissions du trafic décroissent fortement (-30% à -60%), du fait de l'évolution de la réglementation des émissions applicables aux véhicules (normes Euro), de l'amélioration des technologies de dépollution – notamment la quasi-généralisation du filtre à particules sur les véhicules Diesel – et du renouvellement progressif du parc.

Le scénario S2 de promotion des motorisations essence (56% du trafic des véhicules légers contre 27% dans la situation de référence et le scénario FAP (S1)) se traduirait par un renouvellement accéléré du parc automobile et des réductions supplémentaires d'émission de particules et de NOx, mais aussi par une réduction moindre des rejets de COV et NH₃.

¹⁷ Les termes « Zones à Faibles Émissions » sont à présent utilisés, y compris dans le cadre de la future loi d'orientation des mobilités.

➤ **Baisse des concentrations simulées dans les différents scénarios**

À contexte constant (démographie, trafic routier, émissions des autres secteurs que le transport), les réductions d'émissions du trafic simulées par les scénarios d'évolution technologiques se traduisent par :

- une baisse des concentrations moyennes annuelles (importante pour BC et NO₂) ;
- une diminution des nombres d'épisodes de concentrations élevées (sauf pour l'ozone O₃ en milieu urbain), sans toutefois permettre d'atteindre le respect des valeurs guides annuelles de l'OMS pour les PM_{2,5} ;
- une augmentation possible mais limitée d'O₃ en zones urbaines.

Dans une perspective d'évolution réaliste (incluant des variations probables d'autres paramètres), cette amélioration de la qualité de l'air serait cependant atténuée par l'augmentation du trafic et d'autres activités polluantes en zone urbaine ou périurbaine, en lien avec l'urbanisation, si de nouveaux types de mobilité ne sont pas favorisés (autopartage, covoiturage, modes actifs...) en complément du renforcement des réseaux de transport en commun. À l'inverse, elle pourrait être amplifiée par une baisse des émissions des autres secteurs d'activités (chauffage, industrie, etc.) qui font également l'objet d'améliorations techniques et par différentes mesures ou politiques locales en faveur de la qualité de l'air, ainsi que par la diminution des imports de pollution dès lors que le contexte global est favorable à la réduction des émissions anthropiques. Ces différents aspects ainsi que l'évolution du climat et de la démographie n'ont pas été pris en compte dans ce cadre et doivent être considérés.

L'évolution technologique sans modification du trafic, risque donc d'être insuffisante pour améliorer durablement la qualité de l'air dans les agglomérations.

Il est à noter que les améliorations, plus limitées, observées pour les concentrations de PM_{2,5} et PM₁₀ sont liées :

- à la contribution élevée d'autres secteurs (combustion liée au chauffage et agriculture en Île-de-France). Des politiques coordonnées en faveur d'une amélioration de la qualité de l'air doivent donc être privilégiées ;
- au maintien des émissions du trafic par abrasion (pneus, freins, chaussée). Ces dernières pourraient diminuer grâce à l'amélioration des systèmes de freinage et à l'évolution réglementaire ;
- à l'augmentation des concentrations d'oxydants en zone urbaine qui favorisent la formation de particules secondaires.

➤ **Scénarios technologiques et autres leviers de réduction de la pollution du trafic**

Entre l'évolution « au fil de l'eau » avec généralisation du filtre à particules (scénario S1) et le scénario intégrant un recul des véhicules légers Diesel au profit des véhicules essence (scénario S2), les écarts seraient finalement assez limités au regard de ceux observés entre 2014 et 2025.

Un avantage faible (et de ce fait incertain) serait observé avec le scénario Essence (S2) en ce qui concerne la pollution particulaire et les concentrations de NO₂ et ce pour différentes raisons :

- d'une part, pour les particules, cet avantage est en partie dû à une plus forte baisse des précurseurs gazeux dont le NO₂, et cela malgré une augmentation des concentrations d'O₃ en urbain ;

- d'autre part, une partie des bénéfices du scénario Essence (S2) en comparaison du scénario FAP (S1) est liée au renouvellement accéléré du parc (qui se traduit par une proportion plus faible de véhicules légers Diesel sans FAP et une proportion plus forte de véhicules récents Euro 5 et 6), en raison de l'évolution forte de la répartition essence – Diesel sur une période relativement courte.

Indépendamment des options technologiques, le renouvellement « accéléré » du parc (par différentes incitations, mesures de restriction, etc.) apparaît donc comme un levier potentiel d'amélioration de la qualité de l'air en complément de l'amélioration technologique des véhicules et de l'évolution réglementaire. Les effets secondaires du renouvellement doivent cependant être considérés (surcoûts économiques et environnementaux de la construction et destruction de véhicules, utilisation accrue des véhicules récents, iniquités éventuelles des mesures incitatives et raréfaction des véhicules d'occasion, etc.).

Mais les simulations des émissions avec les scénarios « Technologies Alternatives » et « Ambition Air » révèlent surtout le potentiel de la promotion de motorisations non polluantes à l'échappement (électriques) et plus encore d'une diminution ambitieuse du trafic en zones denses, contribuant d'une part à une réduction supplémentaire des émissions et anticipant d'autre part une réduction de l'exposition des personnes et de la pollution de proximité.

Les options technologiques, de même que le renouvellement accéléré du parc, doivent ainsi être mises en regard avec d'autres mesures comme la maîtrise du trafic (zones à faibles émissions, péages urbains, etc.), la promotion des transports en commun, de l'intermodalité, des modes actifs, de l'autopartage, du covoiturage et des logistiques marchandises (e-commerce, livraison du dernier kilomètre, plates-formes logistiques urbaines), porteuses de bénéfices pour la qualité de l'air par la réduction éventuelle de la contribution du trafic routier. L'efficacité réelle de ces différentes mesures reste cependant à évaluer.

Les orientations et mesures visant à améliorer la qualité de l'air en France dans les domaines du transport routier et de la mobilité (plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques, Assises nationales de la mobilité) et les lignes directrices pour le développement de « systèmes de transports durables » (travaux internationaux OCDE, CEE-ONU, OMS-Europe) peuvent constituer un cadre intéressant d'analyse.

Les mesures d'amélioration de la qualité de l'air peuvent être sources de co-bénéfices tels que la réduction des nuisances sonores ou de la durée des trajets domicile-travail. Plus généralement, les mesures spécifiques aux mobilités doivent s'inscrire dans une gouvernance plus large de la ville, intégrant l'urbanisme, les transports, la santé et la qualité de l'air, de l'environnement et du cadre de vie.

L'évaluation objective de l'efficacité des mesures reste cependant très complexe, à ce jour insuffisamment documentée, et nécessite de dépasser le cadre strict de la pollution atmosphérique. Ainsi, les motorisations électriques, l'hydrogène, etc., qui peuvent être des solutions efficaces pour réduire la pollution locale et les émissions de gaz à effet de serre sous certaines conditions, doivent être évaluées en tenant compte d'implications multiples (disponibilité et sources de l'énergie, matériaux, impacts environnementaux induits, etc.). Le transport « tout-électrique » à l'horizon 2025 ou même 2040 apparaîtrait alors sans doute assez peu réaliste.

➤ Évolutions des enjeux

Les travaux ont montré la contribution déterminante du trafic routier dans la pollution de l'air ambiant en milieu urbain. Plusieurs évolutions peuvent être anticipées et sont discutées ci-après.

L'urbanisation et le développement des zones péri-urbaines (même sans extension urbaine) contribuent à l'augmentation des besoins de mobilité et à la dépendance automobile. La maîtrise du trafic, la promotion des transports en commun et des modes actifs et le co-voiturage domicile-travail semblent indispensables pour contenir les augmentations d'émissions qui pourraient en résulter.

Le développement d'une logistique urbaine reposant sur les véhicules utilitaires légers (au détriment des véhicules lourds) pourrait accroître considérablement le trafic et les émissions de polluants. Leur contribution déjà forte aux émissions de polluants devrait cependant s'atténuer par le rattrapage réglementaire (exigences plus proches de celles des voitures) et par le renouvellement assez rapide du parc de véhicules professionnels. Une moindre diésélisation et une évolution vers le gaz naturel pour véhicules sont également attendues. Finalement, en raison du transfert important de véhicules utilitaires légers d'occasion vers le parc des voitures, les politiques incitatives sur les véhicules utilitaires légers peuvent s'avérer stratégiques quant à l'évolution globale du parc.

Le trafic des deux-roues motorisés augmente déjà considérablement dans certaines agglomérations congestionnées. Leur contribution élevée aux émissions de COV devrait décroître avec l'évolution réglementaire et la promotion de deux-roues électriques.

La baisse des émissions réelles du trafic routier est généralement plus faible que celle attendue avec l'évolution réglementaire, réduisant ainsi l'amélioration de la qualité de l'air. L'attention au respect des procédures d'homologation et de contrôle, suscitée par les scandales récents, semble devoir limiter ce risque pour l'avenir. Le démontage ou la désactivation des systèmes dépolluants, ou encore leur dysfonctionnement et la dégradation des émissions avec l'âge du véhicule, devraient également décroître par la sophistication des technologies de dépollution des véhicules et le renforcement du volet pollution du contrôle technique. De nouvelles techniques de mesure des émissions (systèmes portatifs embarqués PEMS, mesures in situ), d'identification des véhicules et d'encouragement à l'éco-conduite (vignettes Crit'Air, vignettes connectées) devraient contribuer également à améliorer la connaissance et la maîtrise des émissions du trafic.

De nouvelles formes de mobilité (autopartage, co-voiturage, véhicules autonomes) et de logistiques marchandises (e-commerce, livraison du dernier kilomètre, plates-formes logistiques urbaines) devraient impacter le trafic, les parcs automobiles et les émissions de polluants, sans qu'il soit possible à ce jour d'en évaluer l'ampleur.

Concernant les émissions particulières à l'échappement des dernières technologies automobiles mises sur le marché, l'écart est à présent faible entre les quantités de carbone suie émises par un véhicule Diesel et celles émises par un véhicule essence. Néanmoins, la question de la différence en émissions de gaz précurseurs d'aérosols secondaires organiques (COSV) et inorganiques (NO₂, NH₃, etc.) est encore ouverte.

Concernant les émissions particulières hors échappement des technologies automobiles, ces dernières pourraient diminuer grâce à l'amélioration des technologies et à l'évolution réglementaire, mais elles restent essentiellement liées aux volumes de trafic et non aux technologies. La substitution de véhicules à moteurs thermiques par des véhicules équivalents à motorisation électrique ou hybride plus lourds ne garantirait pas une diminution des émissions hors échappement de PM_{2,5} et PM₁₀ car leur poids plus élevé accentuerait les émissions de particules liées au contact pneu – chaussée et à la remise en suspension (Victor et al, 2016).

➤ **Incertitudes et limites**

Les travaux de simulation selon les différents scénarios présentés sont affectés d'incertitudes (émissions, technologies de dépollution récentes, précurseurs des particules secondaires, distribution spatio-temporelle du trafic et des autres sources polluantes, etc.). Les évolutions prospectives sont par nature incertaines, en raison de la fragilité de certaines hypothèses des scénarios, et ne tiennent pas compte de nombreux aspects (évolution de la population, des comportements et modes de vie, etc.). Les résultats ne présagent pas de l'importance de sources de pollution locales de l'air ambiant. Ils offrent toutefois un cadre d'analyse de l'évolution de la qualité de l'air permettant d'identifier des enjeux et de comparer différents scénarios par l'explicitation des mécanismes de la pollution.

La disponibilité de données et d'observations de grande qualité (mobilités, trafic, connaissance des émissions, etc.) est fondamentale dans ce processus.

3.2. Recommandations du GT et du CES

Les recommandations qui suivent concernent respectivement les deux volets de la saisine et sont proposées selon deux champs :

- Le champ des politiques publiques ;
- Et celui des travaux de recherche et d'évaluation pour l'aide à la décision.

3.2.1. Recommandations relatives aux effets sanitaires des particules de l'air ambiant extérieur selon les composés, les sources et la granulométrie

1/ En matière de politiques publiques :

- i) Concernant les composés des particules de l'air ambiant extérieur :

Au regard des indications d'effets néfastes sur la santé mises en évidence pour les composés particulaires mentionnés ci-dessous, le GT et le CES recommandent, dans le cadre des politiques de surveillance de la qualité de l'air ambiant et de réduction des émissions de polluants atmosphériques, de les considérer prioritairement :

- les particules ultrafines (< 100 nm, concentration en nombre),
- le carbone suie,
- et le carbone organique.

Les particules grossières (PM_{2,5-10}), pour lesquelles il existe des indications d'effets sur la santé, sont déjà indirectement prises en compte dans la mesure déjà réglementée des PM₁₀ et des PM_{2,5}. Ces recommandations ne remettent pas en cause la pertinence de la mesure des PM_{2,5} et des PM₁₀ dans les dispositifs actuels.

Ces recommandations sur les particules ultrafines et le carbone suie renforcent celles émises sur la nécessité de compléter et de pérenniser l'acquisition de données relatives à ces deux indicateurs, dans le cadre des travaux de l'agence sur les polluants émergents dans l'air ambiant (Anses, 2018).

ii) Concernant les sources des particules de l'air ambiant extérieur :

Au regard des indications d'effets néfastes sur la santé mises en évidence pour les sources mentionnées ci-dessous, le GT et le CES recommandent de poursuivre les efforts nationaux et internationaux de réduction de la pollution de l'air ambiant extérieur et/ou de l'exposition des populations en lien avec celles-ci :

- le trafic routier (incluant les émissions à l'échappement et les émissions hors échappement),
- la combustion de charbon,
- la combustion de produits pétroliers,
- la combustion de biomasse,
- et les poussières de désert.

Concernant la pollution particulaire issue du trafic routier, le GT et le CES soulignent l'intérêt de poursuivre les efforts de réduction de l'exposition des populations au carbone suie, à la matière organique et aux particules ultrafines émis dans l'air ambiant, considérant :

- d'une part, les résultats de l'expertise collective mettant en évidence des indications fortes d'effets néfastes sur la santé liée à l'exposition au carbone suie des particules issues du trafic routier, au carbone organique et aux particules ultrafines,
- et d'autre part, les résultats de l'expertise collective mettant en évidence des diminutions des émissions et concentrations atmosphériques de carbone suie, de matière organique et de particules ultrafines issues du trafic routier, obtenues par l'évolution de la réglementation en émissions (normes Euro), par l'amélioration des technologies de dépollution – notamment la quasi-généralisation du filtre à particules sur les véhicules Diesel – et par le renouvellement progressif du parc, sur la base des scénarios simulés de 2014 à l'horizon 2025.

Concernant la pollution particulaire par l'industrie en général, il n'a pas été possible de conclure sur les effets sanitaires pour cette catégorie de sources en raison de l'hétérogénéité des sources d'émission ou de la qualité insuffisante du corpus d'études analysées. Néanmoins, le GT et le CES soulignent que ce résultat de cotation du niveau d'indication d'effets sanitaires dans le cadre d'une expertise sur la qualité de l'air ambiant ne remet pas en cause les preuves accumulées à partir d'autres corpus de la littérature sur les effets néfastes pour la santé humaine de contaminations environnementales par des sites industriels (ex : OMS Europe, 2014), de même qu'elle ne remet pas en cause la surveillance et le contrôle des émissions de sources industrielles.

Enfin, en raison d'un manque de données, d'autres sources n'ont pu être évaluées dans le cadre de la présente revue de la littérature scientifique : agriculture, transport maritime, pollution aéroportuaire, sources naturelles telles que pollens et débris végétaux, érosion éolienne, éruptions volcaniques et émissions de composés organiques volatils biogéniques par les végétations (précurseurs d'aérosols organiques secondaires).

2/ En matière de travaux d'évaluation pour l'aide à la décision et de travaux de recherche

Afin de permettre d'éventuelles évaluations des risques sanitaires ou évaluations d'impact sanitaire de la pollution de l'air ambiant extérieur, le GT et le CES recommandent de dériver, ou produire au besoin, des fonctions exposition-risque pour les polluants particuliers suivants afin d'inclure ces polluants dans les évaluations :

- les particules ultrafines (< 100 nm, concentration en nombre),
- le carbone suie,
- et le carbone organique.

En termes d'amélioration des connaissances, le GT et le CES recommandent de poursuivre les efforts de la recherche sur :

- les effets sur la santé de l'exposition aux particules de l'air ambiant extérieur en incluant des « métriques » d'exposition autres que la masse des PM₁₀ et PM_{2,5}, en vue d'élaborer d'autres indicateurs de référence (fonctions exposition-risque, normes de qualité de l'air ambiant, etc.) pour la pollution particulaire,
- une définition métrologique des aérosols organiques secondaires en vue, si possible, d'une harmonisation et d'une standardisation de cette métrique d'exposition,
- le caractère prédictif du potentiel oxydant des particules de l'air ambiant extérieur en termes d'effets sur la santé, ainsi que sur la définition de cet indicateur actuellement mesuré par différents tests en condition acellulaire, en vue, si possible, d'une harmonisation et d'une standardisation de cette métrique d'exposition,
- les effets sur la santé des endotoxines de l'air ambiant extérieur,
- les effets sur la santé de la pollution de l'air ambiant extérieur par certaines sources anthropiques encore peu documentées telles que l'agriculture, le transport maritime et la pollution aéroportuaire.

3.2.2.Recommandations relatives à l'impact sur la pollution atmosphérique des technologies et de la composition du parc de véhicules automobiles circulant en France

1/ En matière de politiques publiques

Le GT et le CES rappellent que plusieurs documents précisent les orientations et les mesures nationales visant à améliorer la qualité de l'air dans les domaines du transport routier et de la mobilité, tels que l'arrêté du 10 mai 2017 établissant le plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques (PREPA), ainsi que la synthèse de l'atelier thématique « Mobilités plus propres » des Assises nationales de la mobilité en décembre 2017.

Cependant, le GT et le CES notent que l'évaluation objective de l'efficacité de ces mesures reste très complexe et insuffisamment documentée et nécessite la définition de méthodes d'évaluation incluant la définition de scénarios prospectifs. Par ailleurs, la mise en application de plusieurs de ces mesures par les collectivités locales implique la mise en œuvre et la pérennisation des appels à projet (par exemples, les appels à projets « transports collectifs en site propre » et « transports collectifs et mobilité durable »).

En regard de l'analyse circonscrite menée dans le cadre de ces travaux d'expertise d'une part, et de l'insuffisance actuelle d'informations et de méthodes qui permettraient d'évaluer l'efficacité réelle des différentes mesures d'amélioration de la qualité de l'air d'autre part, le GT et le CES soulignent la nécessité :

- d'accentuer la coordination intersectorielle des politiques en faveur de la qualité de l'air compte tenu des contributions des différents secteurs d'activité¹⁸ à la pollution de l'air ambiant, notamment à la pollution particulaire ;

¹⁸ Selon les territoires, les contributions à la pollution particulaire des secteurs résidentiel et tertiaire, industrie, transport routier et agriculture, peuvent être prépondérantes.

- de considérer globalement la problématique de la pollution de l'air par le trafic routier plutôt que de raisonner en options technologiques et leur impact sur les seules émissions de polluants ;
- de prendre en compte conjointement la pollution locale et les gaz à effet de serre ;
- de considérer conjointement l'évolution technologique et réglementaire, la promotion des technologies alternatives (électromobilité), le renouvellement du parc roulant (toutes catégories de véhicules incluant les deux-roues et les véhicules utilitaires légers), mais aussi et surtout la réduction du trafic compensée par le renforcement des transports en communs et modes actifs dans les zones densément peuplées, comme leviers potentiels de réduction de la pollution atmosphérique, de la pollution de proximité et de l'exposition des populations ;
- de prendre en compte globalement les polluants contribuant à la pollution particulaire, pour l'élaboration de politiques publiques en faveur de la qualité de l'air, compte tenu de la forte dépendance des concentrations de particules aux précurseurs gazeux (NO₂ et composés organiques) ;
- de retenir les concentrations de carbone suie, de dioxyde d'azote (NO₂) et du nombre de particules (PNC) comme indicateurs d'exposition dans les études d'impacts et de surveillance de la pollution de l'air générée par le trafic routier.

2/ En matière de travaux d'évaluation pour l'aide à la décision et de travaux de recherche

En termes de simulation et de méthodes d'évaluation, le GT et le CES recommandent :

- d'étendre les travaux de simulation à d'autres composés des particules (hydrocarbures aromatiques polycycliques, métaux), à des scénarios plus radicaux (100% essence, réductions ciblées du trafic par exemple) ou additionnels permettant d'observer la sensibilité de certains résultats (influence sur l'ozone et les aérosols secondaires), et ce en complément de diverses améliorations ponctuelles d'hypothèses ou de données d'entrée des simulations (ANSES, 2019b) ;
- de développer et mettre en œuvre les outils devant permettre – en articulation avec les différentes plates-formes de simulation de la pollution de l'air existantes – des analyses plus locales et l'étude spécifique à des résolutions spatiales plus fines de la pollution de proximité induite par les sources d'émission ;
- de développer des méthodes permettant l'analyse comparative des différentes mesures d'amélioration de la qualité de l'air – notamment celles portant sur le trafic routier – ainsi que l'évaluation prédictive de l'impact des politiques publiques ; ces méthodes doivent inclure les autres secteurs d'activité, le trafic routier et les mobilités, et tenir compte de l'évolution du contexte (ex : climat, démographie, énergies, technologies et services émergents, comportements, etc.), sous la forme de scénarios prospectifs – même simplifiés – à élaborer ;
- d'élargir les problématiques d'évaluation de la pollution de l'air et d'évaluation des mesures et politiques de réduction, en intégrant les modèles et indicateurs les plus robustes sur l'exposition des populations, l'exposition à la pollution de proximité, et sur les effets sanitaires.

En termes d'acquisition de connaissances, le GT et le CES recommandent :

- de caractériser expérimentalement les facteurs d'émission des polluants non réglementés, des précurseurs des polluants secondaires et des composés organiques semi-volatils, pour les différentes technologies de véhicules, et d'investiguer plus spécifiquement les émissions par abrasion (freins, pneus, chaussée) et la remise en suspension de particules ;
- de déployer des campagnes d'observations (trafic) et des enquêtes (mobilités) permettant de disposer de statistiques fiables comme données d'entrée des simulations (composition du parc, vitesses, données de trafic et profils d'activités des différents secteurs émetteurs de polluants, etc.) et de mieux appréhender les évolutions des comportements.

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE

L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail endosse les conclusions et recommandations du GT « Particules » et du CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » présentées ci-dessus.

L'expertise s'est attachée, dans son premier volet, à caractériser les niveaux de preuves associant différents effets sanitaires à l'exposition aux particules de l'air ambiant selon leurs composés, sources et granulométrie, dans l'objectif de lever plusieurs interrogations qui persistent sur les effets sanitaires des particules en fonction de leur composition et de leurs sources. Elle s'est appuyée pour cela sur une méthodologie d'évaluation des niveaux de preuve appliquée aux publications scientifiques prises en compte, suivant en cela les préconisations de l'avis « Illustrations et actualisation des recommandations pour l'évaluation du poids des preuves et l'analyse d'incertitude à l'Anses » (Anses, 2017b) porté par son Conseil scientifique.

L'Anses souligne que ces travaux constituent une actualisation des connaissances relatives aux effets des composés des particules, fondée sur une revue standardisée de la littérature et une analyse du poids des preuves, dans la lignée de la revue REVIHAAP (Review of evidence on health aspects of air pollution) réalisée en 2013 par le Bureau régional de l'Organisation mondiale de la santé pour l'Europe.

Au vu des indications d'effets néfastes sur la santé mises en évidence, et des tendances observées dans la littérature scientifique récente, l'agence recommande, dans le cadre des politiques publiques visant à améliorer la qualité de l'air, de cibler en priorité trois indicateurs particuliers actuellement non réglementés : il s'agit des particules ultrafines (< 100 nm, concentration en nombre), du carbone suie et du carbone organique¹⁹. Pour réduire l'exposition de la population à ces polluants dans l'air ambiant, l'Anses insiste sur la nécessité d'agir sur les principales sources maîtrisables d'émission qui incluent : le trafic routier, la combustion de charbon, celle de produits pétroliers et de biomasse. L'Anses souligne également le manque de données disponibles sur les effets sur la santé de la pollution de l'air ambiant extérieur issue de certaines sources anthropiques telles que l'agriculture, le transport maritime et la pollution aéroportuaire.

L'expertise a étudié, dans un second volet, des scénarios d'évolutions possibles des émissions et concentrations de particules et de gaz dans l'air ambiant à partir du trafic routier en France métropolitaine et en Ile de France à l'horizon 2025, dont la variable principale étudiée est l'évolution de la composition technologique du parc automobile roulant, à volume de trafic constant (sauf un scénario). Cette étude originale s'est appuyée sur des calculs de simulation d'émissions et de concentrations de polluants dans l'air ambiant, avec l'année 2014 comme année de référence. Toute comparaison directe de ces travaux avec des études d'impacts de politiques publiques (mise en place de zones de circulation restreinte, annonce de restriction ou interdiction des véhicules thermiques, etc.) est à éviter étant donné qu'il s'agit d'une étude de sensibilité de la pollution de l'air à différentes évolutions technologiques du parc automobile roulant, et non d'une étude prospective de la pollution de l'air en lien avec les politiques publiques. Ces travaux ont été complétés par une analyse documentaire de l'évolution rétrospective des émissions et concentrations de polluants en France métropolitaine et en Ile de France.

Au vu de ces travaux de simulation conduits, relatifs aux émissions de la source « trafic routier », l'Anses note une évolution favorable de la qualité de l'air ambiant, et ce quels que soient les scénarios prospectifs impliquant des évolutions de technologies et de la composition du parc de véhicules automobiles circulant en France (motorisations, systèmes de dépollution). Néanmoins, l'Agence souligne que ces évolutions sont insuffisantes pour améliorer à elles seules la qualité de

¹⁹ Ces recommandations confortent notamment celles établies dans le cadre des travaux de l'Anses publiés en 2018 sur les polluants dits « émergents » dans l'air ambiant. L'Agence précise que ces recommandations ne remettent pas en cause la pertinence de la mesure des PM_{2,5} et des PM₁₀ dans les dispositifs actuels, en particulier du point de vue de l'intérêt d'un suivi historique de la pollution particulaire.

l'air dans les agglomérations car elles ne permettent pas d'éviter les dépassements des valeurs guides de l'OMS. Ainsi, l'Agence insiste sur la nécessité de considérer conjointement l'évolution technologique et réglementaire, la promotion des technologies alternatives (réduisant drastiquement l'émission de polluants, dont l'électromobilité), le renouvellement du parc roulant (toutes catégories de véhicules incluant les deux-roues et les véhicules utilitaires légers), mais aussi et surtout la réduction du trafic compensée par le renforcement des transports en communs, de l'intermodalité²⁰ et de modes actifs²¹ dans les zones densément peuplées.

L'Agence précise qu'une analyse complémentaire des impacts environnementaux des scénarios technologiques, autres que la pollution de l'air induite par le trafic routier, ainsi qu'une analyse des impacts sanitaires, sont susceptibles de compléter les résultats obtenus.

Par ailleurs, l'Agence note que le projet de loi d'orientation des mobilités (LOM) comporte des nouvelles mesures concernant la qualité de l'air et la mobilité.

La nature du travail effectué par l'Anses dans le cadre de la présente expertise en fait une contribution à base scientifique, destinée aux pouvoirs publics et, plus largement à l'ensemble des parties prenantes. Compte tenu du très haut niveau d'imbrication entre les aspects techniques, environnementaux, sanitaires et sociétaux, l'agence considère qu'il est important que différentes instances puissent se saisir de ces travaux, pour en compléter l'analyse et en débattre, comme par exemple le Conseil National de l'Air au niveau français.

Au-delà, ces travaux pourront appuyer les pouvoirs publics dans le cadre de la réflexion en cours au niveau de la Commission Européenne sur l'évaluation des deux directives européennes sur la qualité de l'air ambiant (directives 2008/50/CE et 2004/107/CE). Ces deux directives établissent en effet des normes et des exigences en matière de qualité de l'air afin de garantir que les États membres surveillent et / ou évaluent la qualité de l'air sur leur territoire, de manière harmonisée et comparable.

L'Agence prévoit également de porter ces travaux à la connaissance de l'Organisation mondiale de la santé – Bureau régional pour l'Europe, dans le contexte des objectifs poursuivis par l'OMS Europe de révision des valeurs guides pour l'air ambiant (dont celles relatives aux particules) publiées en 2005.

Dr Roger Genet

²⁰ L'intermodalité consiste à utiliser et combiner différents moyens de transports lors d'un même trajet (automobile, transports en commun, modes de transport actifs, ...).

²¹ Les modes de transport actifs sont mus par l'action physique de leurs usagers (marche à pied, vélo, ...).

MOTS-CLÉS

Volet de la saisine relatif aux effets sanitaires des particules de l'air ambiant :

Pollution air ambiant, Particules, Effets sanitaires, Population générale, Revue, Carbone suie, Carbone organique, Métal, Particules ultrafines, Grosse particule, Aérosol secondaire, Combustion de biomasse, Combustion de charbon, Combustion de produit pétrolier, Poussière de désert, Trafic routier

Outdoor air pollution, Particulate matter, Health effects, General population, Review, Black carbon, Organic carbon, Metal, Ultrafine particles, Coarse particles, Secondary aerosol, Biomass combustion, Coal combustion, Oil combustion, Desert dust, Road traffic

Volet de la saisine relatif à l'impact sur la pollution atmosphérique des technologies et de la composition du parc de véhicules automobiles :

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

BIBLIOGRAPHIE

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 pages https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/sources_particules_fines_2017_rapport.pdf

André M., Carteret M., Pasquier A. (2016) Traffic and vehicle fleet statistics for the calculation of air pollutant emissions from road transports in France; *In: André M. (Ed.) Res. for Innov. Transp. Sets, Vol. 1: Energy and Environment*. ISTE Wiley. 417-433.

ANSES (2019a) Effets sanitaires des particules de l'air ambiant extérieur selon les composés, les sources et la granulométrie. Rapport d'expertise collective de l'Agence nationale de sécurité sanitaire alimentation, environnement, travail : <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2014SA0156Ra-Sante.pdf>

ANSES (2019b) Impact sur la pollution atmosphérique des technologies et de la composition du parc de véhicules automobiles circulant en France. Rapport d'expertise collective de l'Agence nationale de sécurité sanitaire alimentation, environnement, travail : <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2014SA0156Ra-Emission.pdf>

ANSES (2019c) État des connaissances sur les particules de l'air ambiant extérieur. Effets sanitaires selon les composés, les sources et la granulométrie. Impact sur la pollution atmosphérique des technologies et de la composition du parc de véhicules automobiles circulant en France. Rapport de synthèse et recommandations de l'expertise collective.

ANSES (2018) Polluants « émergents » dans l'air ambiant Identification, catégorisation et hiérarchisation de polluants actuellement non réglementés pour la surveillance de la qualité de l'air. Avis et rapport d'expertise collective : <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2015SA0216Ra.pdf>

ANSES (2017a) Note relative aux émissions des véhicules routiers diesel en France considérant la monographie n°105 du CIRC sur la cancérogénicité des émissions d'échappement. Note d'appui scientifique et technique de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.

<https://www.anses.fr/en/system/files/AIR2014SA0156.pdf>

ANSES (2017b) Illustrations et actualisation des recommandations pour l'évaluation du poids des preuves et l'analyse d'incertitude à l'Anses. Avis et rapport d'expertise collective :

<https://www.anses.fr/fr/system/files/AUTRE2015SA0090Ra-2.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>

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 (2013) Cancérogénicité des Echappements des Moteurs Diesel et Essence et de Certains Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques Nitrés. *Programme des Monographies du CIRC : Présentation powerpoint par Tallaa, L aux assises de l'air en 2013.*

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>

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>

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

LCSQA/Ineris/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/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>

NTP OHAT (2015) Handbook for Conducting a Literature-Based Health - Assessment Using OHAT Approach for Systematic Review and Evidence Integration. National Institute of Environmental Health Sciences, National Toxicology Program, Office of Health Assessment and Translation (OHAT). 1-98.

OMS Europe (2014). Human Health in Areas with Industrial Contamination. Rapport de l'Organisation Mondiale de la Santé Europe :

http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0006/264813/Human-Health-in-Areas-with-Industrial-Contamination-Eng.pdf?ua=1

OMS Europe (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

OMS Europe (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

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 régional de santé d'Ile-de-France :

https://www.ors-idf.org/fileadmin/DataStorageKit/ORS/Etudes/Etude_1578/Synthese_erpurs_EIS_trafic_1_.pdf

Pascal M., de Crouy Chanel P., Wagner V., Corso M., Tillier C., Bentayeb M., Blanchard M., Cochet A., Pascal L., Host S., Gorla S., Le Tertre A., Chatignoux E., Ung A., Beaudeau P., et Medina S. (2016) The mortality impacts of fine particles in France. *Sci Total Environ* 571:416-25. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.06.213.

US EPA (2009) Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter. Rapport final de l'United States Environmental Protection Agency :

<https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=216546>

ANNEXE 1 - GLOSSAIRE

Niveau d'indication sanitaire :

Les termes « niveau d'indication sanitaire » (« fort », « modéré », « faible », « inadéquat », « indication d'absence d'effet sanitaire ») sont définis par la démarche d'évaluation du poids des preuves du groupe de travail adaptée de l'OHAT (Rooney et al, 2014), sur la base des études réalisées chez l'Homme d'une part, et chez l'animal d'expérimentation d'autre part, et publiées depuis 2013 jusqu'en février 2016. Cette terminologie est dérivée de celle utilisée (en langue française) par le CIRC pour le classement de la cancérogénicité d'un agent, qui définit des « degrés d'indications de cancérogénicité » sur la base des études réalisées chez l'Homme d'une part, et chez l'animal d'expérimentation d'autre part (CIRC, 2013 ; <https://www.cancer-environnement.fr/478-Classification-des-substances-cancerogenes.ce.aspx>).

Les niveaux d'indications sanitaires s'inscrivent dans l'étape d'identification du danger de la démarche globale d'évaluation du risque (National Research Council Committee 2009). En effet, les indications sanitaires représentent l'existence plus ou moins avérée d'une association (ou absence d'association) entre l'exposition aux particules de l'air ambiant (selon les composés et sources) et des événements sanitaires. Ces indications permettent ainsi d'établir si l'hypothèse d'un lien de causalité est plus ou moins plausible sur la base des publications, évaluées dans leur ensemble en prenant en compte certains critères de causalité introduits par Bradford Hill : amplitude de l'association, cohérence des observations dans différentes populations, temporalité de l'association, relation dose-effet, plausibilité biologique, existence de preuves expérimentales et spécificité (Bradford Hill 1965).

Les niveaux d'indications sanitaires définis ne traduisent pas la force de l'association, ni l'amplitude du risque. Ils ne traduisent pas non plus la toxicité relative entre composés et entre sources des particules de l'air ambiant.

Exposition d'intérêt :

Les termes « exposition d'intérêt » renvoient à des catégories de composés et de sources des particules de l'air ambiant (voir tableau ci-après) qui sont définies par la démarche du groupe de travail en cohérence avec celles documentées dans la revue de référence REVIHAAP de l'OMS (OMS Europe 2013). Par rapport à REVIHAAP, des catégories ont été ajoutées en fonction des données disponibles dans les études épidémiologiques et toxicologiques sélectionnées par la suite. L'inclusion d'une publication dans une catégorie s'est fondée principalement sur la définition des composés ou sources faite par les auteurs de l'étude.

<u>Composés</u>	<u>Sources</u>
Carbone suie, carbone élémentaire, PM absorbance	Carbone suie issu du trafic
Carbone organique	PM _{2,5} issues du trafic
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	Diesel
Aérosols Organiques Secondaires (AOS)	Nouveau Diesel*
Particules ultrafines (PUF) (<0,1 µm)	Essence
Particules ultrafines (PUF) de carbone (<0,1 µm)	Poussière de freinage
Particules grossières (2,5-10 µm)	Poussière de route ou matière crustale
Particules ambiantes concentrées	Combustion de charbon
NH ₄	Combustion de produits pétroliers
NO ₃ /N	Industries
S/Sulfates	Métallurgie
Aérosols Inorganiques Secondaires (AIS)	Combustion de biomasse
Ni	Poussière de désert
Zn	Sel et embrun marins
Cu	Site de déchet dangereux
V	Agriculture, environnement rural
Si/SiO ₂	
Fe	
Autres éléments chimiques	
Endotoxines	
Potential oxydant	

* Inclut les véhicules diesel équipés de filtres à particules de type « wall-flow ».

Catégorie sanitaire d'intérêt :

Les termes « catégorie sanitaire d'intérêt », comme par exemple la « santé cardiovasculaire », regroupent différents événements de santé (altération du rythme cardiaque, infarctus et événements coronariens, hospitalisation pour cause cardiovasculaire, etc.). Neuf catégories sanitaires d'intérêt (voir tableau ci-après) sont définies par la démarche du groupe de travail en cohérence avec celles documentées dans la revue REVIHAAP de l'OMS (OMS Europe 2013) et à partir des événements sanitaires documentés dans les études épidémiologiques et toxicologiques incluses par la suite dans l'évaluation du groupe de travail.

Mortalité (décès) toutes causes (hors cause traumatique)
Hospitalisations toutes causes (hors cause traumatique)
Santé cardiovasculaire
Santé respiratoire ¹
Cancers bronchopulmonaires
Cancers (autres que bronchopulmonaires)
Santé neurologique
Santé de la reproduction ²
Santé périnatale ³
Diabète/troubles du métabolisme

1 : inclut l'asthme chez l'enfant avec exposition in utero. 2 : chez l'Homme, correspond aux troubles de la préconception jusqu'à 20 semaines de grossesse. 3 : chez l'Homme, correspond aux troubles de 20 semaines de grossesse jusqu'au 1er mois de vie après la naissance.

Evènement sanitaire d'intérêt :

Les neuf catégories sanitaires d'intérêt susmentionnées ont été déclinées en 83 « évènements sanitaires d'intérêt » qui correspondent à des catégories d'indicateurs d'effet sanitaire identifiés dans les études incluses par la suite dans l'évaluation du groupe de travail, soit : 55 évènements sanitaires identifiés dans les études chez l'Homme (voir tableau en annexe 2) et 28 évènements sanitaires identifiés dans les études d'expérimentation animale (voir tableau en annexe 3).

ANNEXE 2 - EVÈNEMENTS SANITAIRES IDENTIFIÉS DANS LES ÉTUDES CHEZ L'HOMME PUBLIÉES APRÈS REVIHAAP

Catégorie	Evènements sanitaires	Sévérité*
Mortalité toutes causes	Mortalité toutes causes, espérance de vie	Oui
Hospitalisation toutes causes	Hospitalisation toute causes	Oui
Santé respiratoire	Mortalité (toute cause respiratoire), hospitalisations (toute cause respiratoire), hospitalisations (toute cause respiratoire) chez l'enfant, asthme (incidence, symptômes, hospitalisations) ou sifflements, asthme (incidence, symptômes, hospitalisations) ou sifflements chez l'enfant, BPCO et bronchite chronique, rhinite, rhinite chez l'enfant, infections respiratoires et ORL, infections respiratoires et ORL chez l'enfant	Oui
	Sensibilisation allergique chez l'enfant, fonction ventilatoire, fonction ventilatoire chez l'enfant, FeNO, FeNO chez l'enfant, marqueurs d'inflammation dans le condensat de l'air exhalé, marqueurs d'inflammation dans le lavage bronchoalvéolaire, CC16	Non
Santé cardiovasculaire	Mortalité (toute cause cardiovasculaire), hospitalisations (toute cause cardiovasculaire), infarctus et évènements coronariens, accident vasculaire cérébral, insuffisance et congestion cardiaque	Oui
	Pression artérielle, pression artérielle de l'enfant, altération du rythme cardiaque, épaisseur de l'intima média carotidienne et, fonction vasculaire, marqueurs d'inflammation systémique, marqueurs de coagulation, marqueurs de stress oxydant systémique, marqueurs d'altération de l'endothélium vasculaire	Non
Santé neurologique	Performances cognitives (mémorisation, apprentissage), performances cognitives (mémorisation, apprentissage) chez l'enfant, dépression, hyperactivité, autisme chez l'enfant	Oui
Santé périnatale	Faible poids de naissance, naissance prématurée, pré-éclampsie, malformations congénitales	Oui
	Circonférence crânienne	Non
Cancer bronchopulmonaire	Cancer broncho-pulmonaire (mortalité, incidence)	Oui
Autres cancers	Cancer colon/rectum, cancer autres digestifs, cancer hématologique, cancer vessie, cancer sein, cancer cerveau, cancer indéterminé, cancer indéterminé enfant	Oui
Diabète et troubles du métabolisme		Oui

* Les évènements sanitaires considérés sévères correspondent aux évènements cliniques considérés dans la pyramide des effets sanitaires associés à la pollution de l'air de l'OMS-Europe ; les effets infracliniques (subtiles) sont considérés non sévères (OMS Europe 2006). Abréviations : BPCO : Broncho Pneumopathie Chronique Obstructive ; ORL : oto-rhino-laryngologique ; FeNO : fraction exhalée du NO ; CC16 : concentration de la protéine Club Cells 16.

ANNEXE 3 - EVÈNEMENTS SANITAIRES IDENTIFIÉS DANS LES ÉTUDES D'EXPÉRIMENTATION ANIMALE PUBLIÉES APRÈS REVIHAAP

Catégorie	Evènements sanitaires	Sévérité / Prédicativité*
Santé respiratoire	Histologie pulmonaire (ex : remodelages, infiltrats inflammatoires), fonction respiratoire, élasticité pulmonaire/thoracique et résistance des voies aériennes, marqueurs d'altération des défenses anti-microbiennes pulmonaires, cellularité du LBA (neutrophiles, macrophages)	Oui
	Protéines du LBA (albumine ; sans autres évènements sévères), enzymes du LBA (LDH, γ -GT, NAG ; sans autres évènements sévères)	Non
Santé cardiovasculaire	Lésions atherosclérotiques, pression artérielle, rythme cardiaque, fonction cardiaque, fonction vasculaire, thrombose veineuse et vasculaire périphérique,	Oui
	Marqueurs inflammation systémique (sans autres évènements sévères), marqueurs coagulation (sans autres évènements sévères), marqueurs de stress oxydant systémique (sans autres évènements sévères), hémocrite/hémoglobine (sans autres évènements sévères)	Non
Santé neurologique	Comportement (sociabilité, exploration, anxiété, locomotion, etc.), performances cognitives (mémorisation, apprentissage, etc.)	Oui
	Marqueurs inflammation neuronal (sans autres évènements sévères), marqueurs de stress oxydant neuronal (sans autres évènements sévères), autres marqueurs neuronaux (facteurs de croissance et récepteurs) (sans autres évènements sévères),	Non
Santé périnatale	Développement du comportement (sociabilité, exploration, anxiété, locomotion, etc. chez la descendance des mères exposées)	Oui
	Développement sur autres marqueurs neuronaux (facteurs de croissance et récepteurs chez la descendance des mères exposées) (sans autres évènements sévères)	Non
Cancer bronchopulmonaire	Histopathologie de cancer broncho-pulmonaire	Oui
Autres cancers	Histopathologie de cancer (autre que broncho-pulmonaire)	Oui
Diabète et troubles du métabolisme	Diabète (avec caractéristiques pathologie humaine diabétique type I)	Oui
	Métabolisme lipidique (sans autres évènements sévères)	Non

* La classification de la sévérité/prédicativité d'effet a été définie par le groupe de travail en distinguant typiquement les marqueurs biologiques peu prédictibles (par exemple : modification de cytokines sans évènements sévères) des marqueurs plus prédictibles (pa exemple : neutrophiles ou macrophages du LBA) ou fonctionnels. Abréviations : LBA : lavage broncho-alvéolaire, LDH : Lactate Deshydrogénase, γ -GT : gamma-glutamyltranspeptidase, NAG : N-acétylglucosamine.

ANNEXE 4 - SYNTHÈSE DES PREUVES ACCUMULÉES ET DES NIVEAUX D'INDICATIONS SANITAIRES DES COMPOSÉS DES PARTICULES DE L'AIR AMBIANT À PARTIR D'ÉTUDES CHEZ L'HOMME DANS REVIHAAP ET DEPUIS REVIHAAP

Composé	Dans REVIHAAP :		Depuis REVIHAAP jusqu'en février 2016 :		Synthèse des preuves accumulées :	
	Niveau de preuve rapporté [§]	Associations rapportées [†]	Niveau d'indication sanitaire [§] le plus élevé (nombre de publications du corpus)		Preuves ou associations rapportées dans REVIHAAP	Indication d'effet sanitaire depuis REVIHAAP
Particules ultrafines (<100 nm)	Preuves encore limitées	Oui	Modéré (14) (+Exp.*)		+ ↗	<p>Dans REVIHAAP : + : effet rapporté ; - : absence d'effet rapportée ; ∅ : non examiné.</p> <p>Depuis REVIHAAP : ↑ : nouvelle indication d'un effet sanitaire ; ↗ : confirmation de l'effet sanitaire ; → : pas de nouvelles preuves d'un effet sanitaire (i.e. une indication d'effet « faible » ou « inadéquate ») ; ∇ : indication d'absence d'effet sanitaire ; ∅ : aucune étude identifiée.</p>
Particules grossières (PM _{2,5-10})	Preuves suggestives	Oui	Modéré (44)		+ ↗	
Matières carbonées	Carbone suie, carbone élémentaire	Preuves suffisantes	Fort (78) (+Exp.*)		+ ↗	
	Carbone organique	Informations croissantes	Fort (37) (+Exp.*)		+ ↗	
	AOS (facteur source [§])	∅	Oui	Inadéquat (7) (+Exp.*)	+ →	
	HAP	∅	∅	Faible (4)	∅ →	
Aérosols inorganiques secondaires	AIS (facteur source [§])	∅	Oui	Faible (6)	+ →	
	Sulfate	∅	Oui	Fort (48)	+ ↗	
	Nitrate	∅	Oui	Fort (25) (+Exp.*)	+ ↗	
	Ammonium	∅	∅	Faible (14)	∅ →	
Métaux de transition	Nickel	∅	Oui [§]	Fort (34) (+Exp.*)	∅ ↑	
	Zinc	∅	Oui [§]	Modéré (31)	∅ ↑	
	Cuivre	∅	Oui [§]	Faible (31)	∅ →	
	Vanadium	∅	Oui [§]	Fort (32)	∅ ↑	
	Fer	∅	∅	Fort (31)	∅ ↑	
Silice	∅	∅	Modéré (30)		∅ ↑	
Endotoxines	∅	∅	Modéré (5)		∅ ↑	
Potentiel oxydant	∅	∅	Faible (6)		∅ →	

[§] La finalité de l'évaluation du niveau d'indication d'effet sanitaire est de pouvoir conclure si l'association observée entre un composé donné des particules de l'air ambiant et une catégorie sanitaire d'intérêt (ex : santé cardiovasculaire) est fortement, ou modérément, ou encore faiblement plausible. Il peut aussi être conclu qu'un composé n'a pas d'effet sur la santé, ou bien encore que les éléments disponibles dans la littérature sont inadéquats pour permettre de conclure. *Abréviations : AIS : Aérosols Inorganiques secondaires ; AOS : Aérosols organiques secondaires ; HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques. * Les conclusions basées sur les études d'expérimentation animale soutiennent ces indications d'effets. † Oui si association rapportée, non si absence d'association rapportée, ∅ si non rapportée. § Les associations rapportées ne concernent pas spécifiquement cet élément et incluent d'autres métaux de transition en mélanges.*

mortalité toutes causes santé respiratoire santé cardiovasculaire hospitalisations toutes causes

ANNEXE 5 - SYNTHÈSE DES PREUVES ACCUMULÉES ET DES NIVEAUX D'INDICATIONS SANITAIRES DES SOURCES DES PARTICULES DE L'AIR AMBIANT À PARTIR D'ÉTUDES CHEZ L'HOMME DANS REVIHAAP ET DEPUIS REVIHAAP

Catégorie de sources	Dans REVIHAAP :		Depuis REVIHAAP jusqu'en février 2016 :		Synthèse des preuves accumulées :		
	Niveau de preuve rapporté [§]	Associations rapportées [†]	Niveau d'indication sanitaire [®] le plus élevé (nombre de publications du corpus)	Preuves ou associations rapportées dans REVIHAAP	Indication d'effet sanitaire depuis REVIHAAP		
Trafic routier	PM _{2,5} liées au trafic	Association probable	Oui	Modéré (16) (+Exp.*)	+	↗	Dans REVIHAAP : + : effet rapporté ; - : absence d'effet rapporté ; ∅ : non examiné. Depuis REVIHAAP : ↑ : nouvelle indication d'un effet sanitaire ; ↗ : confirmation de l'effet sanitaire ; → : pas de nouvelles preuves d'un effet sanitaire (i.e. une indication d'effet « faible » ou « inadéquate ») ; ↘ : indication d'absence d'effet sanitaire ; ∅ : aucune étude identifiée.
	Carbone suie lié au trafic	Preuves suffisantes [‡]	∅	Fort (4)	+	↗	
	Échappements Diesel	∅	Oui	Modéré (3) (+Exp.*)	+	↗	
	Échappements essence	∅	Oui	Modéré (1)	+	↗	
	Poussières de route, matière crustale	Association probable	Oui	Fort (16)	+	↗	
	Poussières de freins	∅	∅	Faible (1) [#]	∅	→	
Combustion	Combustion charbon	Preuves solides [‡]	Oui	Fort (7) (+Exp.*)	+	↗	
	Combustion produits pétroliers	Influence sur la santé	Oui et non	Modéré (10)	+	↗	
Industrie	Industrie	∅	Oui	Faible (5)	+	→	
	Métallurgie	∅	Oui	Inadéquat (10) [#]	+	→	
Combustion de biomasse	Association probable	Oui [§]	Inadéquat (4) [#]	+	→		
Poussières de désert	∅	Oui	Modéré (3)	+	↗		
Sels et embruns marins	Suggestion d'absence d'effet	Oui et non	Faible (9)	-	→		
Site de déchets dangereux	∅	Non	Inadéquat (1)	-	→		
Environnement rural et agriculture	∅	∅	∅	∅	∅		

[®] La finalité de l'évaluation du niveau d'indication d'effet sanitaire est de pouvoir conclure si l'association observée entre une source donnée des particules de l'air ambiant et une catégorie sanitaire d'intérêt (ex : santé cardiovasculaire) est fortement, ou modérément, ou encore faiblement plausible. Il peut aussi être conclu qu'une source n'a pas d'effet sur la santé, ou bien encore que les éléments disponibles dans la littérature sont inadéquats pour permettre de conclure. * Les conclusions basées sur les études d'expérimentation animale soutiennent ces indications d'effets. † Oui si association rapportée, non si absence d'association rapportée, ∅ si non rapporté. ‡ Ce niveau de preuve se base sur les preuves accumulées pour le carbone suie. ‡ Ce niveau de preuve se base sur les preuves accumulées pour des particules enrichies en sulfate (traceur chimique de la combustion de charbon). § Notamment, associations entre les feux de forêts et des événements sanitaires. # Ne considère pas les indications d'effets sanitaires ayant pu être observées pour des composés ou traceurs chimiques liés à cette source.

mortalité toutes causes santé respiratoire santé cardiovasculaire santé neurologique santé périnatale

ANNEXE 6 - 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.

ANNEXE 7 - 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.

ANNEXE 8 – SUIVI DES ACTUALISATIONS DE L'AVIS

Date	Version	Page	Description de la modification
Juin 2019	01		Première version signée de l'avis de l'Anses
Juillet 2019	02	12 19 28 29 29	Précisions apportées sur : - les termes « carbone suie » - les termes « zones de circulation restreinte » - le manque de données pour certaines sources de particules - l'existence du projet de loi d'orientation des mobilités Ajustement d'une formulation relative à la communication des travaux au niveau européen

État des connaissances sur les particules de l'air ambiant extérieur

Effets sanitaires selon les composés, les sources et la granulométrie

**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 DE SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS de l'expertise collective

**Comité d'Experts Spécialisé « évaluation des risques liés aux milieux aériens »
Groupe de travail « Particules »**

Janvier 2019

Table des matières

1	CONTEXTE ET OBJET DE LA SAISINE	5
1.1	Contexte.....	5
1.2	Objet de la saisine	7
1.2.1	Demande relative aux effets sanitaires des particules de l'air ambiant	7
1.2.2	Demande relative aux émissions du trafic routier.....	7
2	EFFETS SANITAIRES DES PARTICULES DE L'AIR AMBIANT – MÉTHODE ET SYNTHÈSE DES TRAVAUX DU GT	8
2.1	MÉTHODE	8
2.2	SYNTHÈSE DES TRAVAUX DU GT	12
2.2.1	Effets sanitaires selon la composition des particules	13
2.2.2	Effets sanitaires selon la source des particules.....	20
2.2.3	Discussion, limites et incertitudes.....	29
3	EFFETS SANITAIRES DES PARTICULES DE L'AIR AMBIANT – CONCLUSIONS DU CES « AIR » et du GT « Particules »	35
3.1	Conclusions par composés des particules de l'air ambiant extérieur	36
3.2	Conclusions par sources des particules de l'air ambiant extérieur	39
4	ÉMISSIONS DU TRAFIC ROUTIER – MÉTHODE ET SYNTHÈSE DES TRAVAUX DU GT	42
4.1	MÉTHODE	42
4.2	SYNTHÈSE DES TRAVAUX DU GT	46
5	ÉMISSIONS DU TRAFIC ROUTIER - CONCLUSIONS DU CES « AIR » et du GT « Particules ».....	59
6	RECOMMANDATIONS DU CES « AIR » et du GT « Particules »	64
6.1	Recommandations relatives aux effets sanitaires des particules de l'air ambiant extérieur selon les composés, les sources et la granulométrie	64
6.2	Recommandations relatives à l'impact sur la pollution atmosphérique des technologies et de la composition du parc de véhicules automobiles circulant en France.....	67
7	BIBLIOGRAPHIE	69

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Synthèse des preuves accumulées et des niveaux d'indications sanitaires des composés des particules de l'air ambiant à partir d'études chez l'Homme dans REVIHAAP et depuis REVIHAAP.....	27
Tableau 2 : Synthèse des preuves accumulées et des niveaux d'indications sanitaires des sources des particules de l'air ambiant à partir d'études chez l'Homme dans REVIHAAP et depuis REVIHAAP.....	28
Tableau 3 : Scénarios de composition du parc et leurs hypothèses	44
Tableau 4 : Synthèse de l'impact des scénarios sur les émissions des polluants particulaires et gazeux du trafic routier.....	57
Tableau 5 : Synthèse de l'impact des scénarios sur les concentrations des polluants particulaires et gazeux	58

Liste des figures :

Figure 1 : Processus de l'approche adaptée de l'OHAT par le groupe de travail	11
Figure 2 : Schéma de simulation des émissions et concentrations de polluants pour la France (en haut) et pour l'Île-de-France (en bas).....	42
Figure 3 : 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)	45
Figure 4 : Répartition selon les catégories de véhicules, du trafic (% des véhicules x km annuels) et de ses émissions de polluants (% des quantités massiques annuelles) – Scénario de référence, Ile-de-France.....	47
Figure 5 : Émissions annuelles du trafic (t/an) de PM ₁₀ , PM _{2,5} , BC, COVNM, NO _x et trafic (véhicules.km) : Différences relatives (en %) entre les scénarios prospectifs et le scénario de référence (axe horizontal), Ile-de-France	48
Figure 6 : Comparaison des émissions annuelles totales tous secteurs d'activité de PM _{2,5-10} , PM _{2,5} , BC, OM, COV, COSV et NO _x en Ile-de-France : Différences relatives (en %) entre les scénarios prospectifs et le scénario de référence.....	48
Figure 7 : Comparaison du trafic et de ses émissions annuelles de PM ₁₀ , PM _{2,5} , BC, COVNM, NO _x : 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).....	49
Figure 8 : Comparaison des concentrations moyennes annuelles (µg/m ³) de 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, France (en haut) et Ile-de-France (en bas)	51
Figure 9 : Concentrations d'ozone O ₃ en France :	52
Figure 10 : Concentrations de BC en Île-de-France.....	53
Figure 11 : Concentrations de la fraction organique particulaire en Île-de-France :	54
Figure 12 : Émissions de PM ₁₀ et kilomètres parcourus selon les normes Euro pour les véhicules particuliers Diesel (estimation du parc national 2013 du CITEPA ; CITEPA-OMINEA 2016).....	55
Figure 13 : Évolution des émissions annuelles (t/an) de particules PM ₁₀ du trafic routier – Scénarios prospectifs vs émissions 2000-2012, Ile-de-France.....	56

1 CONTEXTE ET OBJET DE LA SAISINE

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 ambiant est prégnante dans plusieurs zones du territoire national qui présentent de manière récurrente des niveaux de concentration élevés de particules par rapport aux normes et objectifs de qualité de l'air pour la protection de la santé humaine. Cette situation est à l'origine de plusieurs avertissements de la Commission européenne depuis 2009 (mise en demeure, avis motivé, saisine de la Cour de justice de l'Union européenne) pour le non-respect des normes réglementaires de qualité de l'air pour la protection de la santé humaine fixées pour les PM₁₀. Au-delà, les particules de l'air ambiant représentent un enjeu de santé publique. L'impact de l'exposition à la pollution atmosphérique par les particules fines PM_{2,5} en lien avec l'activité humaine a été estimé à 48 000 décès prématurés par an en France 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 de l'exposition aux 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)¹. Les concentrations² de particules dans l'air ambiant ont diminué au cours des années mais restent supérieures aux valeurs guides annuelles recommandées par l'Organisation mondiale de la santé pour les PM_{2,5} (OMS Europe, 2006).

Les effets sanitaires des particules de l'air ambiant extérieur sont déjà bien documentés. Des effets cardiovasculaires et respiratoires sont mis en évidence pour des expositions à la pollution particulaire à court et à long termes depuis plusieurs décennies. Des effets ont été plus récemment mis en évidence concernant d'autres organes cibles comme par exemple le cerveau et certaines fonctions comme la reproduction. En octobre 2013, le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) a classé la pollution de l'air ambiant extérieur dans son ensemble et les particules en suspension composant cette pollution atmosphérique comme cancérogènes pour l'Homme (groupe 1) (CIRC, 2016).

Des interrogations subsistent qui concernent les effets sanitaires associés aux particules en fonction de leur composition dont l'évolution depuis ces vingt dernières années est vraisemblable. L'US EPA a conclu en 2009 qu'« *il existe plusieurs composés*

¹ Comprend le coût sanitaire tangible « [...] qui se mesure principalement à travers les dépenses de santé remboursées par l'assurance maladie afin de prendre en charge les pathologies imputables à la pollution de l'air, qu'il s'agisse des hospitalisations, des soins de villes ou du versement d'indemnités journalières et de pensions d'invalidité », le coût sanitaire intangible « [...] dit coût social ou socio-économique, associé à la mortalité et à la morbidité imputables à la pollution de l'air [...] Ce coût, associé à une perte de bien-être, n'a pas d'impact direct sur le solde des finances publiques [...] » et le coût non sanitaire, soit [...] les impacts négatifs en termes de baisse de rendements agricoles, de perte de biodiversité ou de dégradation et d'érosion des bâtiments, ainsi que les coûts associés à la lutte contre la pollution de l'air, à l'instar des dépenses liées aux activités de prévention et de recherche menées par l'administration ou par les agences sanitaires (Commission d'enquête du Sénat, 2015).

² 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).

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 » (US EPA, 2009). Cette conclusion était partagée et maintenue par l'OMS en 2013 dans son rapport « Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP » (OMS Europe, 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 et de processus de transformation dans l'atmosphère. Les émissions résultent de phénomènes naturels (sable de désert, sels marins, éruptions volcaniques, feux de forêts, etc.) et d'activités humaines (industries, transports, agriculture, chauffage, etc.).

Le transport routier et le chauffage résidentiel et tertiaire sont particulièrement responsables de fortes concentrations d'aérosols organiques dans l'atmosphère, par la combustion d'énergie fossile et de biomasse. Outre les particules, le transport routier est aussi une source majeure d'oxydes d'azote (NOx) et plus particulièrement de dioxyde d'azote (NO₂).

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 routier. Certaines émissions (hors échappement, démarrage à froid, deux-roues, etc.) sont cependant encore insuffisamment connues. De même, la formation des aérosols secondaires à partir des émissions du trafic et leur contribution à la pollution particulaire sont relativement incertaines, et sont de plus en plus étudiées.

Le trafic routier est la source de pollution de l'air par les particules la plus documentée, tant pour ses émissions que pour ses effets. Les effets sanitaires mis en évidence incluent des effets cardiovasculaires et respiratoires en lien avec 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.

Plusieurs études mettent en évidence le fait que les populations résidant à proximité des voies à fort trafic routier ont une santé dégradée (HEI, 2010 ; ORS IdF, 2012). A titre d'exemple, le projet Apekom dans 10 villes européennes a estimé que le fait d'habiter à proximité de grands axes de circulation induisait environ 15 à 30 % des nouveaux cas d'asthme de l'enfant et des proportions similaires ou plus élevées de bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO) et de maladies coronariennes chez les adultes âgés de 65 ans et plus (InVS, 2012).

Le souhait de diminuer les émissions des moteurs des véhicules et leur impact sur la qualité de l'air a suscité depuis au moins une vingtaine d'années en France et en Europe un processus continu d'évolution de la réglementation, d'amélioration de la composition des carburants et des groupes motopropulseurs, ainsi que le développement de nouvelles technologies de dépollution. L'efficacité réelle et comparée de ces différentes technologies reste cependant difficile à établir car elle peut varier selon de nombreux aspects (conditions de circulation, utilisation des véhicules, conditions topographiques et climatiques locales, etc.). **Dans ce contexte, des interrogations se posent sur l'impact environnemental et sanitaire potentiel des futurs choix technologiques pour le parc roulant français.**

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 pour répondre notamment aux demandes suivantes :

1.2.1 Demande relative aux effets sanitaires des particules de l'air ambiant

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 ?

1.2.2 Demande relative aux émissions du trafic routier

Concernant la source « trafic routier », 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 routier ».

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

Le présent rapport constitue une synthèse des travaux du groupe de travail « Particules » détaillés dans deux rapports socles associés qui répondent respectivement aux deux demandes susmentionnées :

- ANSES (2019a) Effets sanitaires des particules de l'air ambiant extérieur selon les composés, les sources et la granulométrie. Rapport d'expertise collective de l'Agence nationale de sécurité sanitaire alimentation, environnement, travail : <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2014SA0156Ra-Sante.pdf>
- ANSES (2019b) Impact sur la pollution atmosphérique des technologies et de la composition du parc de véhicules automobiles circulant en France. Rapport d'expertise collective de l'Agence nationale de sécurité sanitaire alimentation, environnement, travail : <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2014SA0156Ra-Emission.pdf>

2 EFFETS SANITAIRES DES PARTICULES DE L'AIR AMBIANT – MÉTHODE ET SYNTHÈSE DES TRAVAUX DU GT

2.1 MÉTHODE

Pour répondre à la question posée, une démarche d'évaluation du poids des preuves contenues dans la littérature a été développée et mise en œuvre dans le but d'obtenir un niveau d'indication d'effet sanitaire pour plusieurs composés et sources des particules de l'air ambiant. Ce niveau d'indication d'effet traduit la confiance portée dans une association (ou absence d'association) entre une exposition d'intérêt et un événement sanitaire d'intérêt d'après un ensemble de publication (corpus). Pour l'évaluer, le groupe de travail a adapté la méthode précédemment proposée par l'*Office of Health Assessment and Translation* dans le cadre du *National Toxicology Program* (OHAT NTP, 2015). Le processus d'évaluation se décline en 7 étapes (Figure 1).

Étape 1 : Formulation du périmètre du problème

La question à investiguer est formulée par le groupe de travail « Particules » de la manière suivante :

- Quels sont les effets sur la santé humaine des particules de l'air ambiant extérieur selon leurs composés, sources et granulométrie ?

Après une première recherche bibliographique, et en raison de la quantité de littérature existante, les experts du groupe de travail ont retenu la revue de consensus REVIHAAP de l'OMS Europe, publiée en 2013, comme point de départ pour la structure des travaux. Ainsi, seules les études épidémiologiques (chez l'Homme) et expérimentales (chez l'animal) publiées après REVIHAAP ont été incluses dans le processus d'évaluation du poids des preuves. Les critères d'éligibilité de ces publications ont été définis en termes de PECOTS déterminant le périmètre de l'évaluation en termes de Populations, d'Expositions, de Comparateurs, d'Outcomes (événements sanitaires), Timings (durées d'exposition) et Setting (localisations d'intérêt). La population ciblée est la population générale incluant les sous-populations plus vulnérables et sensibles à la pollution de l'air. Les expositions ciblées sont les concentrations de particules de l'air ambiant extérieur catégorisées par composé, par taille et par source de particules. Ces catégories ont été définies en cohérence avec celles documentées dans la revue de référence REVIHAAP ; certaines catégories ont été ajoutées en fonction des nouvelles données disponibles dans les études épidémiologiques et toxicologiques sélectionnées par la suite. Les publications qui considéraient les PM₁₀ et PM_{2,5} sans spéciation chimique ou affectation de source n'ont pas été considérées. Les comparateurs ciblés sont une absence d'exposition ou des niveaux d'exposition plus faibles. Les Outcomes ciblés sont les événements néfastes pour la santé (cliniques et infracliniques), rassemblés en 9 grandes catégories : santé respiratoire, santé cardiovasculaire, mortalité toutes causes, hospitalisations toutes causes, santé neurologique, santé périnatale, santé de la reproduction, cancers broncho-pulmonaires, autres cancers, et diabète (incluant des troubles du métabolisme). Les durées d'exposition étudiées (Timings) sont les expositions à court terme (un à plusieurs jours chez l'Homme) et long terme (une à plusieurs années chez l'Homme). La localisation d'intérêt (Setting) est la France, mais les études ont été incluses quelle que soit leur localisation géographique.

Etape 2 : Recherche et sélection des publications

Une recherche bibliographique sur les moteurs de recherche Pubmed et Scopus, ainsi que la littérature connue des experts, ont permis d'identifier 4 677 références publiées après REVIHAAP et jusqu'en février 2016. Après un premier tri (titres et résumés, double lecture par les coordinateurs du groupe de travail), 244 références ont été retenues comme éligibles. Après évaluation du texte intégral (double lecture par les membres du groupe de travail), 160 publications ont finalement été retenues : 127 études chez l'Homme (observationnelle, clinique, ou semi-expérimentale) et 33 études d'expérimentation animale (d'exposition unique, (sub)aigue, ou (sub)chronique).

Etape 3 : Extraction des données descriptives des études

Toutes les publications ont été lues par un ou deux membres du groupe de travail (deux membres sur le volet épidémiologique, un membre sur le volet toxicologique) afin d'en collecter les données (qualitatives) descriptives. Ces descriptions individuelles suivent un format de grille proposé par l'OHAT et synthétisent des informations concernant : les sujets (humains, animaux), les méthodes utilisées (durée de suivi, design d'étude, événements et catégories d'effets, mesure ou estimation de l'exposition...), et les résultats présentés.

Etape 4 : Evaluation de la qualité des études individuelles

Le risque de biais a été évalué dans chacune des 160 études en utilisant une adaptation de l'outil de cotation proposé par l'OHAT qui s'applique à la fois aux études humaines et d'expérimentation animale. L'outil développé inclut 14 questions liées à de potentielles sources de biais, réparties en plusieurs grandes catégories (sélection, attrition, interprétation, confusion, détection, autres). Les quatre options de réponse représentent un gradient de plausibilité du risque de biais : ++ si risque faible, + si risque probablement faible, – si risque probablement fort, – – si risque fort. Une cinquième option (NR : non renseignable) s'applique lorsque le risque de biais ne peut être renseigné à partir des données de la publication et est assimilé à un risque probablement fort de biais (même code couleur). La dernière option (NA : non applicable) s'applique lorsque la question n'est pas applicable au design de l'étude considérée. Le risque de biais dans chaque étude a été évalué, de manière indépendante, puis discuté par deux membres du groupe de travail afin d'obtenir une cote finale. Toute divergence dans les cotations faisait l'objet de discussions pouvant inclure l'ensemble des membres du groupe de travail afin d'aboutir à un consensus. Comme le préconise l'OHAT, plusieurs questions ont été considérées comme des questions-clés pouvant avoir un impact important sur la qualité globale de l'étude. Les quatre questions-clés pour les études chez l'Homme portent sur la confusion, l'ajustement sur d'autres expositions (ex : modèle multi-polluant prenant en compte la masse totale des PM_{2,5}), la caractérisation de l'exposition, et l'évaluation des effets. Pour les études expérimentales sur l'animal, les deux questions clés portent sur la caractérisation de l'exposition et l'évaluation des effets. Finalement, un niveau de confiance initial a été calculé pour chaque étude en sommant les réponses à 4 questions (1 si oui, 0 si non) définissant des caractéristiques importantes liées au design de l'étude : l'exposition est-elle contrôlée ? L'exposition précède-t-elle l'effet ? Les données de l'effet sont-elles individuelles ? Existe-t-il un groupe de comparaison ?

Etape 5 : Cote du niveau de confiance des corpus

Les publications ont été regroupées en corpus d'études dans un ensemble de lignes de preuves, selon les composés/sources, durées d'exposition, catégories d'effet et événements sanitaires examinés dans chacune. Une ligne de preuve rassemble ainsi des informations intégrées, de même nature. Au total, 724 lignes de preuves ont été obtenues d'après les 127 publications d'études chez l'Homme et 314 lignes de preuves ont été obtenues d'après les 33 publications d'études expérimentales chez l'animal. La qualité des corpus dans chacune des

lignes de preuve a été évaluée sur la base de 10 facteurs proposés par l'OHAT : 5 d'entre eux augmentent la confiance que l'on porte aux résultats du corpus et 5 autres diminuent la confiance que l'on porte aux résultats du corpus. Le niveau de confiance final du corpus correspond au niveau de confiance initial (de 1 à 4) moins les facteurs de diminution (de 0 à 5) plus les facteurs d'augmentation (de 0 à 5). L'intitulé des facteurs et le principe de calcul sont donnés dans la Figure 1, Etape 5. Chaque ligne de preuve a été évaluée, de manière indépendante, par un membre du groupe de travail puis discutée par le groupe au complet. Les décisions (d'augmentation et diminution du niveau de confiance) étaient actées après consensus.

Pour finir, dans chaque ligne de preuve, une décision de direction d'effet sur la santé a été prise par le groupe de travail sur la base des données fournies par le corpus. Cette direction d'effet correspond à la présence ou non d'un effet du composé/source d'intérêt pour une durée d'intérêt sur un évènement sanitaire.

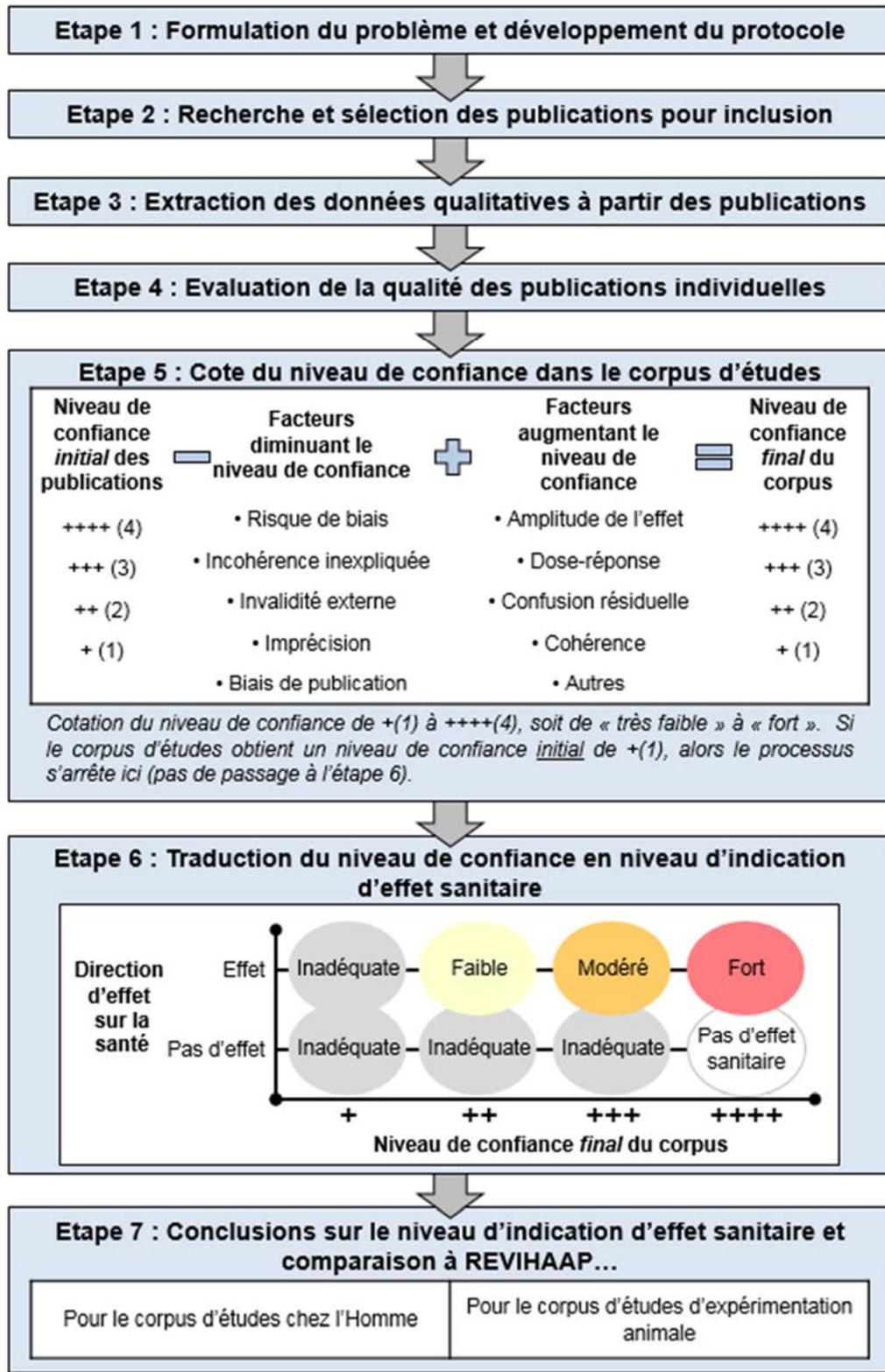


Figure 1 : Processus de l'approche adaptée de l'OHAT par le groupe de travail

Etape 6 : traduction en niveau d'indication d'effet sanitaire

Le niveau de confiance final du corpus et la direction d'effet sur la santé ont ensuite été combinés pour obtenir un niveau d'indication d'effet sanitaire d'un composé/source d'intérêt sur un événement sanitaire, pour une durée déterminée, selon le principe présenté dans la Figure 1, Etape 6. Par exemple, une indication « forte » d'effet traduit une confiance « forte » dans le corpus (*i.e.* niveau de confiance final à 4) à l'égard de l'effet d'une exposition sur un événement sanitaire d'intérêt ; une indication « inadéquate » d'effet traduit une confiance « très faible » dans le corpus à l'égard de l'effet d'une exposition sur un événement sanitaire d'intérêt OU une confiance « très faible, faible, modérée » dans un corpus ne soutenant pas l'effet de l'exposition sur l'évènement sanitaire.

Les niveaux d'indication d'effet définis pour chacun des composés/sources, durées (ex : court terme), et événements sanitaires (ex : mortalité cardiovasculaire, hospitalisations pour causes cardiovasculaires, et pression artérielle) ont été regroupés pour permettre de conclure à une indication d'effet sur la catégorie sanitaire correspondante (ex : santé cardiovasculaire). Les mêmes libellés sont considérés : « fort », « modéré », « faible », « inadéquat », et « pas d'effet sanitaire ». Pour les études chez l'Homme, le groupe de travail a mis en place un arbre de décision permettant de standardiser au mieux la définition du niveau d'indication d'effet pour chacun des composés/sources, durées, et catégories sanitaires. Cet arbre intègre les niveaux d'indication d'effet sur les événements sanitaires (précédemment obtenus), la sévérité de ces événements (clinique ou infraclinique), le nombre de publications des corpus, et les éventuels risques de biais ou d'invalidité externe identifiés dans les lignes de preuves à l'étape 5. Pour les études d'expérimentation animale, un arbre décisionnel identique a été suivi mais sans faire de distinction entre les durées d'exposition (sub)aiguës et (sub)chroniques. Lorsque le corpus incluait seulement des études d'exposition unique (études mécanistiques), le niveau d'indication d'effet retenu était systématiquement « inadéquat ».

Etape 7 : conclusion sur le niveau d'indication d'effet sanitaire

Les indications d'effets sanitaires obtenues sur la base des études publiées après REVIHAAP jusqu'en février 2016 (objets de la présente démarche d'évaluation du poids de la preuve) ont été synthétisées, afin d'être comparées au socle de connaissances apporté par la revue REVIHAAP. Ces deux apports ont été mis en perspectives afin de conclure sur le poids des preuves des effets sur la santé d'après les études chez l'Homme et d'expérimentation animale, en mettant en évidence certaines tendances telles que la confirmation d'effets sur la santé déjà rapportés ou l'apport de nouvelles indications d'effets sanitaires.

2.2 SYNTHÈSE DES TRAVAUX DU GT

Les résultats présentés ici représentent une version synthétique des résultats par composés et sources obtenus par le groupe de travail. Les niveaux d'indication sanitaire obtenus pour les composés/sources, durées, et événements sanitaires ne sont pas détaillés, tout comme le processus de création de l'indication d'effet par catégorie sanitaire. Pour éviter les longueurs, les conclusions d'indications « inadéquates » d'effet sanitaire ne sont pas rapportées ici. De même, les catégories d'effets pour lesquelles aucune publication n'a été recensée ne sont pas évoquées. Les détails sont disponibles dans le rapport socle (Anses, 2019a).

Par soucis de clarté, les résultats suivent une trame prédéfinie. Tout d'abord, une synthèse des niveaux de preuves ou associations rapportées en 2013 dans REVIHAAP est présentée. Ensuite, les indications d'effets obtenues d'après les études chez l'Homme publiées après

REVIHAAP et jusqu'en février 2016 sont décrites et mises en perspective avec les conclusions de REVIHAAP. Finalement, la même démarche est appliquée pour les études toxicologiques chez l'animal publiées après REVIHAAP et jusqu'en février 2016. Un tableau de synthèse rassemblant les principaux résultats est disponible (Tableau 1 et Tableau 2 pour les composés et les sources, respectivement).

2.2.1 Effets sanitaires selon la composition des particules

1. MATIÈRES CARBONÉES

1.1. Carbone suie, carbone élémentaire

REVIHAAP concluait à des preuves suffisantes d'une association entre le carbone suie des particules de l'air ambiant et la santé cardiovasculaire et la mortalité anticipée, tant pour les expositions à court terme qu'à long terme. Chez l'Homme, la revue concluait à des preuves suffisantes d'une association avec les admissions hospitalières de cause cardiopulmonaire pour les expositions à court terme et avec la mortalité cardiopulmonaire pour les expositions à long terme. Concernant les études toxicologiques, REVIHAAP rapportait une association entre une exposition (24 heures) aux particules ultrafines de carbone et des altérations du rythme cardiaque et de la pression artérielle.

Les études chez l'Homme publiées après REVIHAAP jusqu'en février 2016 confirment les conclusions de REVIHAAP quant aux effets sur la santé (respiratoire, et cardiovasculaire) du carbone suie, en fournissant une indication « forte » pour les expositions à court terme et une indication « modérée » pour les expositions à long terme. Les données confirment également les conclusions de REVIHAAP quant aux effets sur la mortalité anticipée, avec des indications « modérée » et « forte » pour des expositions à court et long terme, respectivement. Les données **apportent également de nouvelles informations** quant aux effets du carbone suie ou du carbone élémentaire sur des événements non évoqués dans REVIHAAP, grâce à une indication « forte » d'effet sur les hospitalisations toutes causes, une indication « faible » d'altération de la santé neurologique (performances cognitives de l'enfant) et une indication « faible » d'altération de la santé périnatale (faible poids de naissance).

Les études toxicologiques publiées après REVIHAAP jusqu'en février 2016 confirment les conclusions de REVIHAAP, en fournissant une indication « modérée » d'altération de la santé cardiovasculaire (lésions athérosclérotiques, rythme cardiaque, pression artérielle) par le carbone suie. Ces données **apportent également de nouvelles informations**, grâce à une indication « modérée » d'effet sur la santé respiratoire (inflammation pulmonaire).

1.2. Carbone organique

REVIHAAP concluait à l'existence d'informations croissantes sur les associations entre le carbone organique et la santé (respiratoire et cardiovasculaire). La revue notait qu'il était difficile de distinguer les effets spécifiques des composants du carbone organique (mélange complexe d'aérosols organiques primaires et secondaires), chacun pouvant avoir d'importants effets sur la santé. Chez l'Homme, REVIHAAP rapportait des associations entre l'exposition à court et long terme au carbone organique contenu dans les particules de l'air ambiant et la santé (respiratoire et cardiovasculaire).

Les **études chez l'Homme publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 **confirment les associations** rapportées dans REVIHAAP en fournissant des indications « fortes » d'altération de la santé respiratoire et de la santé cardiovasculaire par l'exposition à court terme au carbone organique, ainsi que des indications « modérées » d'altération de la santé respiratoire et de la santé cardiovasculaire sur le long terme. Ces données **apportent également de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP** quant aux effets à court terme de l'exposition au carbone organique sur les hospitalisations toutes causes (indication « forte » d'effet) et sur la mortalité toutes causes (indication « modérée » d'effet).

Les **études toxicologiques publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 **apportent de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP**, en fournissant une indication « modérée » d'effet sur la santé cardiovasculaire (stress oxydant systémique et variabilité du rythme cardiaque) et une indication « faible » d'effet sur la santé respiratoire (baisse de la phosphatase alcaline broncho alvéolaire).

1.3. Aérosols organiques secondaires

REVIHAAP concluait que les preuves étaient insuffisantes pour distinguer la toxicité des aérosols organiques primaires de celle des aérosols organiques secondaires. Chez l'Homme, REVIHAAP rapportait des associations entre l'exposition à court terme aux aérosols organiques secondaires et la santé (respiratoire et cardiovasculaire).

Les **études chez l'Homme publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 fournissent des indications « inadéquates » d'effets sur la santé pour les aérosols organiques secondaires définis par une méthode statistique de répartition des sources, n'apportant aucune nouvelle information par rapport à REVIHAAP.

Les **études toxicologiques publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 **apportent de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP**, en fournissant une indication « modérée » d'effet sur la santé respiratoire (inflammation et atteinte de la fonction respiratoire).

1.4. Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

REVIHAAP n'examinait pas les effets à court ou long terme des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) des particules de l'air ambiant sur la santé.

Les **études chez l'Homme publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 **apportent de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP**, en fournissant une indication « faible » d'altération de la santé respiratoire par l'exposition à court terme aux HAP des particules de l'air ambiant.

Les **études toxicologiques publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 **apportent de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP** en fournissant une indication « faible » d'effet sur la santé cardiovasculaire (rythme cardiaque, athérosclérose, et augmentation du niveau d'hémoglobine).

2. PARTICULES ULTRAFINES

REVIHAAP concluait à des preuves encore limitées quant aux effets sur la santé des particules ultrafines (en général, <0,1 µm de diamètre), bien que le potentiel de tels effets ait été jugé important. Chez l'Homme, REVIHAAP rapportait des associations entre l'exposition à court terme aux particules ultrafines et la santé cardiovasculaire et la mortalité toutes causes, mais des associations mitigées avec la santé respiratoire. Concernant les études toxicologiques, REVIHAAP rapportait une association entre l'exposition aigue aux particules ultrafines chez le rat et la santé cardiovasculaire (altération du rythme cardiaque et de la pression artérielle).

Les **études chez l'Homme publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 **confirment les associations rapportées dans REVIHAAP**, grâce à une indication « modérée » d'altération de la santé cardiovasculaire par l'exposition à court terme aux particules ultrafines. Ces données **apportent également de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP** avec une indication « faible » d'altération de la santé respiratoire sur le court terme, une indication « faible » d'altération de la santé cardiovasculaire sur le long terme, et une indication « faible » d'altération de la santé neurologique sur le long terme (performances cognitives de l'enfant).

Les **études toxicologiques publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 **confirment les associations rapportées dans REVIHAAP** en fournissant une indication « modérée » d'effet sur la santé cardiovasculaire (rythme cardiaque, athérosclérose). Ces données **apportent également de nouvelles informations**, grâce à une indication « modérée » d'effet sur la santé respiratoire (altération de l'inflammation pulmonaire).

3. PARTICULES GROSSIÈRES (PM_{2,5-10})

REVIHAAP concluait à des preuves suggestives d'un effet de l'exposition à court terme aux particules grossières (PM_{2,5-10}) sur la santé, mais rapportait des preuves insuffisantes pour conclure à un effet sur le long terme. Chez l'Homme, REVIHAAP rapportait des associations entre l'exposition à court terme aux particules grossières et la santé (respiratoire, cardiovasculaire, et mortalité toutes causes) ainsi qu'une association suggérée entre l'exposition à long terme et les accidents vasculaires cérébraux ischémiques. Concernant les études toxicologiques, REVIHAAP rapportait l'absence d'association entre l'exposition à court terme aux particules grossières et l'inflammation pulmonaire et la cytotoxicité.

Les **études chez l'Homme publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 **confirment les associations rapportées dans REVIHAAP** sur les effets à court terme des particules grossières sur la santé, en fournissant une indication « modérée » d'altération de la santé respiratoire et une indication « faible » d'altération de la santé cardiovasculaire. Ces données **apportent également de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP** quant aux effets à long terme des particules grossières sur la santé, grâce à une indication « faible » d'altération de la santé respiratoire (de l'enfant) et une indication « modérée » d'effet sur la mortalité anticipée.

Les **études toxicologiques publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 ne fournissent qu'une indication « inadéquate » d'effets des particules grossières sur la santé, n'apportant aucune information nouvelle par rapport à REVIHAAP.

4. AÉROSOLS INORGANIQUES SECONDAIRES

A propos des aérosols inorganiques secondaires des particules de l'air ambiant, REVIHAAP concluait que les données toxicologiques ne fournissaient que peu de preuve d'un effet délétère aux niveaux ambiants actuels (incluant ammonium, sulfate, et nitrate). Cependant, REVIHAAP évoquait plusieurs études épidémiologiques rapportant des associations entre la santé humaine, notamment cardiovasculaire, et le sulfate et le nitrate. Elle n'excluait pas que ces composés inorganiques secondaires aient une influence sur la biodisponibilité d'autres composés tels que les métaux de transition. Elle n'excluait pas que les cations associés aux sulfates et nitrates (ex : métaux de transition, acidité marquée par des cations hydrogènes) et les composants absorbés (telles que les particules organiques) puissent être la cause sous-jacente aux fortes associations observées entre le sulfate et les effets sur la santé.

4.1. « Aérosols inorganiques secondaires » en tant que facteur source

Chez l'Homme, REVIHAAP rapportait des associations entre l'exposition à court terme aux facteurs « sulfate secondaire » et « nitrate secondaire » (d'après analyse factorielle) et la mortalité. Concernant les études toxicologiques, REVIHAAP ne rapportait aucune association spécifique.

Les études chez l'Homme publiées après REVIHAAP jusqu'en février 2016 **apportent de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP** quant aux effets à court terme des aérosols inorganiques secondaires (facteur source) sur la santé respiratoire (chez l'enfant), grâce à une indication « faible » d'effet.

Aucune étude toxicologique publiée après REVIHAAP jusqu'en février 2016 n'a été recensée quant aux effets des aérosols inorganiques secondaires (facteur source) du sulfate sur la santé.

4.2. Sulfates

Chez l'Homme, REVIHAAP rapportait des associations entre l'exposition à court terme au sulfate des particules de l'air ambiant, ainsi qu'au sulfate secondaire, et la santé (respiratoire et cardiovasculaire). La revue rapportait des associations entre l'exposition à long terme au sulfate et la mortalité. Concernant les études toxicologiques, REVIHAAP ne rapportait aucune association spécifique.

Les études chez l'Homme publiées après REVIHAAP jusqu'en février 2016 **confirment les associations rapportées dans REVIHAAP** quant aux effets du sulfate des particules de l'air ambiant, en fournissant une indication « faible » d'altération de la santé respiratoire à court terme, une indication « modérée » d'altération de la santé cardiovasculaire à court terme et une indication « modérée » d'effet sur la mortalité toutes causes à long terme. Les données **apportent également de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP** sur les effets d'une exposition à long terme au sulfate contenu dans les particules de l'air ambiant, grâce à une indication « faible » d'altération de la santé respiratoire (de l'enfant), une indication « modérée » d'altération de la santé cardiovasculaire, une indication « modérée » d'altération de la santé périnatale (faible poids de naissance) et une indication « faible » d'effet sur les cancers broncho-pulmonaires.

Les études toxicologiques publiées après REVIHAAP jusqu'en février 2016 **apportent de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP** quant aux effets du sulfate sur la santé cardiovasculaire, en fournissant une indication « faible » d'effet (stress oxydant systémique et apparition de lésions athérosclérotiques).

4.3. Nitrates et dérivés azotés

Chez l'Homme, REVIHAAP rapportait des associations entre l'exposition à court terme au nitrate et les hospitalisations pour causes cardio-respiratoires, mais aucune association pour la mortalité respiratoire. La revue rapportait une association entre l'exposition à long terme au nitrate et la mortalité. Concernant les études toxicologiques, REVIHAAP ne rapportait aucune association spécifique.

Les études chez l'Homme publiées après REVIHAAP jusqu'en février 2016 **confirment les associations rapportées dans REVIHAAP** sur les effets à court et long terme du nitrate des particules de l'air ambiant sur la santé, en fournissant une indication « faible » d'altération de la santé respiratoire, une indication « forte » d'altération de la santé cardiovasculaire et une indication « modérée » d'effet sur la mortalité toutes causes. Ces données **apportent également de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP** quant aux effets du nitrate

sur les hospitalisations toutes causes (indication « modérée » d'effet à court terme) et la santé périnatale (indication « modérée » d'effet à long terme).

Les **études toxicologiques publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 **apportent de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP** en fournissant une indication « faible » d'effet du nitrate des particules de l'air ambiant sur la santé cardiovasculaire (numération formule sanguine et apparition de lésions athérosclérotiques).

4.4. Ammonium

Chez l'Homme, REVIHAAP rapportait une association entre l'exposition à court terme à un mélange de nitrate et d'ammonium et la santé cardiovasculaire. Concernant les études toxicologiques, REVIHAAP ne rapportait aucune association spécifique.

Les **études chez l'Homme publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 **apportent de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP** quant aux effets de l'ammonium des particules de l'air ambiant sur la santé, en fournissant des indications « faibles » d'altération de la santé respiratoire sur le court terme, d'altération de la santé cardiovasculaire sur le court terme, et d'effet sur la mortalité toutes causes à court et long terme.

Les **études toxicologiques publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 ne fournissent qu'une indication « inadéquate » d'effets de l'ammonium sur la santé, n'apportant aucune information nouvelle par rapport à REVIHAAP.

5. MÉTAUX DE TRANSITION ET AUTRES ELEMENTS CHIMIQUES

De manière générale, REVIHAAP notait qu'une comparaison de la nocivité relative des différents métaux n'était pas possible car la plupart des études n'incluaient que certains métaux (surtout zinc et nickel), souvent en mélange, et que les résultats disponibles étaient très hétérogènes et peu concluants.

5.1. Nickel

REVIHAAP rapportait des associations entre le nickel contenu dans les particules de l'air ambiant et la santé cardiovasculaire, à la fois dans des études chez l'homme et des études d'expérimentation animale.

Les **études chez l'Homme publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 **confirment les associations rapportées dans REVIHAAP** quant aux effets à court terme du nickel sur la santé cardiovasculaire (indication « modérée » d'effet). Ces données **apportent également de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP** en fournissant une indication « forte » d'altération de la santé respiratoire à court terme et une indication « faible » d'altération de la santé périnatale à long terme.

Les **études toxicologiques publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 **confirment l'association rapportée dans REVIHAAP** en fournissant une indication « modérée » d'effet du nickel sur la santé cardiovasculaire (modification de la fonction vasculaire liée à la contraction aortique).

5.2. Zinc

Chez l'Homme, REVIHAAP rapportait une association entre l'exposition à court terme à un mélange de particules riche en zinc, cuivre, et vanadium et la santé cardiovasculaire. Dans les études toxicologiques, REVIHAAP rapportait une association entre l'exposition à des poussières riches en zinc et en cuivre hydrosoluble et la santé cardiovasculaire (stress oxydant cardiaque chez les rats).

Les **études chez l'Homme publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 **apportent de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP** quant aux effets à court terme du zinc sur la santé respiratoire (indication « faible » d'effets à court terme et à long terme) et sur la santé cardiovasculaire (indication « modérée » d'effet à court terme).

Les **études toxicologiques publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 ne fournissent qu'une indication « inadéquate » d'effets du zinc sur la santé, n'apportant aucune information nouvelle par rapport à REVIHAAP.

5.3. Cuivre

Chez l'Homme, REVIHAAP rapportait une association entre l'exposition à court terme à un mélange de particules riche en cuivre, zinc, et vanadium et la santé cardiovasculaire. Concernant les études toxicologiques, REVIHAAP rapportait une association entre l'exposition intratrachéale à des poussières de pneus riches en cuivre hydrosolubles et en zinc et la santé cardiovasculaire (stress oxydant cardiaque chez les rats).

Les **études chez l'Homme publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 **apportent une information nouvelle par rapport à REVIHAAP** en fournissant une indication « faible » d'altération de la santé cardiovasculaire pour une exposition à long terme au cuivre des particules de l'air ambiant.

Les **études toxicologiques publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 ne fournissent qu'une indication « inadéquate » d'effets du cuivre sur la santé, n'apportant aucune information nouvelle par rapport à REVIHAAP.

5.4. Vanadium

Chez l'Homme, REVIHAAP rapportait une association entre l'exposition à court terme à un mélange de particules riche en vanadium, zinc, et cuivre et la santé cardiovasculaire. Une association entre le vanadium (utilisé comme indicateur des émissions de la combustion de produits pétroliers) et la santé cardiovasculaire était également rapportée. Concernant les études toxicologiques, REVIHAAP ne rapportait aucune association spécifique.

Les **études chez l'Homme publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 **confirment certaines associations rapportées dans REVIHAAP** quant aux effets du vanadium des particules de l'air ambiant sur la santé cardiovasculaire, avec une indication « forte » d'effet à court terme et indication « faible » d'effet à long terme. Ces données **apportent également de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP** quant aux effets du vanadium sur la santé respiratoire, en fournissant une indication « modérée » d'effet pour une exposition à court terme et une indication « faible » d'effet pour une exposition à long terme (chez l'enfant).

Les **études toxicologiques publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 ne fournissent qu'une indication « inadéquate » d'effets du vanadium sur la santé, n'apportant aucune information nouvelle par rapport à REVIHAAP.

5.5. Fer

REVIHAAP n'évoquait pas les effets du fer contenu dans les particules de l'air ambiant sur la santé, que ce soit dans des études chez l'Homme ou d'expérimentation animale.

Les **études chez l'Homme publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 **apportent de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP** quant aux effets du fer des particules de l'air ambiant sur la santé cardiovasculaire (indication « forte » d'effet sur le court terme et indication « modérée » d'effet sur le long terme) et la mortalité toutes causes (indication « modérée » d'effet sur le court terme).

Les **études toxicologiques publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 ne fournissent qu'une indication « inadéquate » d'effets du fer sur la santé, n'apportant aucune information nouvelle par rapport à REVIHAAP.

5.6. Autres éléments

REVIHAAP n'évoquait pas d'éventuels effets d'autres éléments contenus dans les particules de l'air ambiant sur la santé, que ce soit dans des études chez l'Homme ou d'expérimentation chez l'animal.

Aucune démarche d'évaluation du poids de la preuve, basée sur les études publiées depuis REVIHAAP, n'a été mise en place pour ces autres composés (métalliques, inorganiques, ou minéraux)³. Il a cependant été rapporté, à titre indicatif, le nombre de publications observant des associations statistiquement significatives en fonction des catégories d'effets et événements sanitaires.

Dans les études chez l'Homme publiées depuis REVIHAAP jusqu'en février 2016, les éléments pour lesquels le plus grand nombre d'études observe des associations significatives sont : le calcium, le potassium, le manganèse, et le plomb (pour la santé respiratoire) ; le cadmium, le manganèse, le potassium, le calcium, l'arsenic, et le plomb (pour la santé cardiovasculaire) ; et le potassium, le manganèse, et le titane (pour la mortalité toutes causes).

Les études toxicologiques publiées depuis REVIHAAP jusqu'en février 2016 ne rapportaient pas d'association entre des expositions (sub) aiguës ou (sub)chroniques aux autres éléments contenus dans les particules de l'air ambiant et des altérations de la santé.

6. SILICE

REVIHAAP n'évoquait pas les effets de la silice contenue dans les particules de l'air ambiant sur la santé, que ce soit dans des études chez l'Homme ou d'expérimentation chez l'animal.

Les **études chez l'Homme publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 **apportent de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP** quant aux effets de la silice sur la santé respiratoire (indication « modérée » d'effet à court terme et indication « faible » d'effet à long terme), sur la santé cardiovasculaire (indication « faible » d'effet à court terme), et sur la mortalité toutes causes (indication « modérée » d'effet à court terme et indication « faible » d'effet à long terme).

Les **études toxicologiques publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 ne fournissent qu'une indication « inadéquate » d'effets de la silice dans les particules de l'air ambiant sur la santé, n'apportant aucune information nouvelle par rapport à REVIHAAP.

7. ENDOTOXINES

REVIHAAP n'évoquait pas les effets des endotoxines contenues dans les particules de l'air ambiant sur la santé, que ce soit dans des études chez l'Homme ou d'expérimentation chez l'animal.

Les **études chez l'Homme publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 **apportent de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP** quant aux effets des endotoxines des

³ Compte tenu du nombre important d'éléments chimiques documentés, incluant des métaux, et afin de rationaliser la méthode de revue de la littérature, seuls ceux pour lesquels des associations avec des événements sanitaires sont souvent observées dans les études épidémiologiques ont été déclinés (Eeftens et al. 2014).

particules de l'air ambiant sur la santé cardiovasculaire, en fournissant une indication « modérée » d'effet à court terme et une indication « faible » d'effet à long terme.

Les **études toxicologiques publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 ne fournissent qu'une indication « inadéquate » d'effets des endotoxines dans les particules de l'air ambiant sur la santé, n'apportant aucune information nouvelle par rapport à REVIHAAP.

8. POTENTIEL OXYDANT

REVIHAAP mentionnait le rôle du stress oxydant dans le mécanisme d'action des particules de l'air ambiant sur la santé mais ne rapportait pas des associations spécifiques, que ce soit dans des études chez l'Homme ou d'expérimentation animale.

Les **études chez l'Homme publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 **apportent de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP** quant aux effets d'une exposition aux particules de l'air ambiant avec un potentiel oxydant élevé sur la santé respiratoire (indications « faibles » d'effet à court et long terme) et sur la santé cardiovasculaire (indication « faible » d'effet à court terme).

Les **études toxicologiques publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 **apportent de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP** en fournissant une indication « faible » d'effet du stress oxydant des particules de l'air ambiant sur la santé respiratoire et la santé cardiovasculaire.

2.2.2 Effets sanitaires selon la source des particules

1. TRAFIC ROUTIER

De manière générale, REVIHAAP alertait sur la grande hétérogénéité de la source « trafic routier », qui inclut des particules de combustion et des poussières (issues de l'usure des routes, des freins, et des pneus). Ces émissions simultanées, combinées à la génération de polluants gazeux et de bruit, rendent difficile l'estimation d'effets sanitaires spécifiques. REVIHAAP concluait que la plupart des preuves accumulées portaient sur les effets nocifs des matières carbonées (incluant certains composés évoqués précédemment) issues du trafic routier sur la santé.

1.1. PM_{2,5} liées au trafic routier

REVIHAAP concluait que les particules fines liées aux sources de combustion, incluant le trafic routier, étaient probablement associées à la santé cardiovasculaire. Chez l'Homme, REVIHAAP rapportait des associations entre l'exposition aux PM_{2,5} issues du trafic routier et la santé respiratoire et cardiovasculaire, la mortalité toutes causes, et la santé périnatale. Concernant les études toxicologiques, REVIHAAP ne rapportait pas d'association spécifique.

Les **études chez l'Homme publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 **confirment les associations rapportées par REVIHAAP** quant aux effets de l'exposition aux PM_{2,5} issues du trafic routier, définie par une méthode de répartition des sources, en fournissant une indication « faible » d'altération de la santé respiratoire sur le court terme, une indication « modérée » d'altération de la santé cardiovasculaire sur le court terme, et une indication « modérée » d'altération de la santé périnatale sur le long terme. Les données **apportent également de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP** sur les effets d'une exposition à long terme aux PM_{2,5} issues du trafic routier, grâce à une indication « faible » d'altération de la santé cardiovasculaire et une indication « modérée » d'altération de la santé neurologique (performances cognitives).

Les **études toxicologiques publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 **apportent de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP** en fournissant une indication « modérée » d'effets des PM_{2,5} issues du trafic routier sur la santé respiratoire (fonction respiratoire et inflammation pulmonaire) et une indication « faible » d'effet sur la santé cardiovasculaire (fonction vasculaire non associée à une inflammation systémique ou à du stress oxydant).

1.2. Carbone suie lié au trafic routier

REVIHAAP n'évoquait pas d'association spécifique entre le carbone suie lié au trafic et la santé, que ce soit d'après des études chez l'Homme ou d'expérimentation animale. REVIHAAP concluait néanmoins à la nocivité du carbone suie issu des gaz d'échappement des véhicules Diesel en raison des preuves accumulées sur les effets nocifs du carbone suie sur la santé.

Les **études chez l'Homme publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 **apportent de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP** sur les effets à court terme de l'exposition au carbone suie issu du trafic routier, définie par une méthode de répartition des sources, en fournissant une indication « forte » d'altération de la santé respiratoire, une indication « forte » d'altération de la santé cardiovasculaire, et une indication « forte » d'effet sur la mortalité toutes causes. Ces données **apportent également de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP** sur les effets à long terme du carbone suie issu du trafic routier, en fournissant une indication « modérée » d'altération de la santé respiratoire, une indication « faible » d'altération de la santé cardiovasculaire, et une indication « modérée » d'effet sur la mortalité toutes causes.

Les **études toxicologiques publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 ne fournissent qu'une indication « inadéquate » d'effets de cette catégorie de source sur la santé (respiratoire et cardiovasculaire), n'apportant aucune information nouvelle par rapport à REVIHAAP.

1.3. Particules d'échappement Diesel (incluant nouvelles technologies)

Chez l'Homme, REVIHAAP rapportait des associations entre l'exposition à court terme à des émissions Diesel et la santé (respiratoire et cardiovasculaire). La revue évoquait une association entre l'exposition gestationnelle et le faible poids de naissance. Concernant les études toxicologiques, REVIHAAP rapportait une association entre l'exposition subchronique à des particules d'émissions diluées d'échappement Diesel et le développement de plaques athérosclérotiques. REVIHAAP n'évoquait pas d'association entre les échappements des nouveaux moteurs Diesel et la santé, que ce soit d'après des études humaines ou d'expérimentations animales.

Les **études chez l'Homme publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 **apportent de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP** quant aux effets de l'exposition à court terme aux particules d'échappement Diesel, définie par une méthode de répartition des sources, en fournissant une indication « modérée » d'altération de la santé respiratoire (chez l'enfant).

Les **études toxicologiques publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 **confirment les effets évoqués par REVIHAAP** des particules liées aux échappements Diesel sur la santé cardiovasculaire, en fournissant une indication « modérée » d'effet (athérosclérose, coagulation). Les données **apportent également une information nouvelle par rapport à REVIHAAP**, en fournissant une indication « modérée » d'effet des particules d'échappement Diesel sur la santé respiratoire (inflammation pulmonaire, remodelage pulmonaire).

Les **études toxicologiques publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 **apportent de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP** sur les effets à long terme des échappements des nouveaux moteurs Diesel, en fournissant une indication « faible » d'altération de la santé respiratoire (atteinte des fonctions respiratoires).

1.4. Particules d'échappement essence

Chez l'Homme, REVIHAAP rapportait une association entre l'exposition gestationnelle à des particules issues de combustion essence et le faible poids de naissance. Dans la même population d'étude, des associations étaient également rapportées avec des particules issues de la combustion Diesel et des particules géologiques.

Les **études chez l'Homme publiées depuis REVIHAAP** jusque février 2016 **apportent de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP** quant aux effets sur la santé des particules liées aux échappements essence, en fournissant une indication « modérée » d'altération de la santé respiratoire (de l'enfant) pour une exposition à court terme.

Les **études toxicologiques publiées depuis REVIHAAP** jusque février 2016 **apportent de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP**, en fournissant une indication « faible » d'effet des échappements des moteurs essence sur la santé cardiovasculaire (numération-formule sanguine) et une indication « faible » d'effet sur la santé respiratoire (défenses antimicrobiennes pulmonaires).

1.5. Poussières de routes (incluant matière crustale)

REVIHAAP concluait que les particules liées aux sources crustales (incluant le trafic routier) étaient probablement associées à la santé cardiovasculaire. Chez l'Homme, REVIHAAP rapportait des associations entre l'exposition à court terme aux poussières de route et la santé (respiratoire, cardiovasculaire, et mortalité). La revue rapportait des associations entre l'exposition gestationnelle et la santé périnatale. Concernant les études toxicologiques, REVIHAAP rapportait une association entre les poussières de route et la santé respiratoire sur le court terme, mais pas avec la santé cardiovasculaire.

Les **études chez l'Homme publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 **confirment les conclusions de REVIHAAP** quant aux effets à court terme de l'exposition aux poussières de route, en fournissant une indication « modérée » d'altération de la santé respiratoire, une indication « faible » d'altération de la santé cardiovasculaire, et une indication « forte » d'effet sur la mortalité toutes causes. Les données **apportent également de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP** quant aux effets à long terme de l'exposition aux poussières de route sur la santé respiratoire, grâce à une indication « modérée » d'effet.

Les **études toxicologiques publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 ne fournissent qu'une indication « inadéquate » d'effets de cette catégorie de source sur la santé, n'apportant aucune information nouvelle par rapport à REVIHAAP.

1.6. Poussières de freinage

REVIHAAP n'évoquait pas spécifiquement l'association entre l'exposition aux poussières de freins et la santé, que ce soit d'après des études chez l'homme ou d'expérimentation animale.

Les **études chez l'Homme publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 **apportent de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP** en fournissant une indication « faible » d'altération de la santé périnatale après une exposition à long terme aux particules issues de l'usure des freins, définie par une méthode de répartition des sources.

Il n'a été recensé aucune étude toxicologique publiée après REVIHAAP jusqu'en février 2016 examinant la relation entre cette catégorie de source et la santé.

2. COMBUSTION DE CHARBON ET DE PRODUITS PÉTROLIERS

NB : Le sulfate est considéré comme un bon indicateur des composés dangereux contenus dans les particules de l'air ambiant issues de la combustion de charbon. Le nickel et le vanadium sont des traceurs de la combustion de fioul lourd, souvent associés au sulfate secondaire. Ces composés ont fait l'objet d'une évaluation du poids de la preuve dans le présent travail.

2.1. Combustion de charbon

REVIHAAP concluait à des preuves d'effets néfastes pour la santé des particules enrichies en sulfate, dont la combustion de charbon est émettrice. Chez l'Homme, REVIHAAP rapportait des associations entre l'exposition à des particules issues de la combustion du charbon et au sélénium (indicateur d'émission) et la santé. Concernant les études toxicologiques, REVIHAAP rapportait une association entre l'inhalation de particules d'émission simulée de combustion de charbon et la réponse allergique.

Les études chez l'Homme publiées après REVIHAAP jusqu'en février 2016 **confirment les associations rapportées par REVIHAAP** quant aux effets à court et long terme des particules issues de la combustion de charbon sur la santé. Elles fournissent une indication « faible » d'altération de la santé cardiovasculaire sur le court terme, une indication « modérée » d'altération de la santé cardiovasculaire sur le long terme, une indication « faible » d'effet sur la mortalité toutes causes à court terme, et une indication « forte » d'effet sur la mortalité toutes causes à long terme. Les données **apportent également de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP** quant aux effets à long terme sur la santé respiratoire (indication « faible » d'effet) et la mortalité par cancers broncho-pulmonaires (indication « modérée » d'effet).

Les études toxicologiques publiées après REVIHAAP jusqu'en février 2016 **apportent de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP**, grâce à une indication « modérée » d'effet des particules issues de la combustion du charbon sur la **santé respiratoire** (inflammation pulmonaire).

2.2. Combustion de produits pétroliers

REVIHAAP évoquait l'impact de la combustion de produits pétroliers sur la santé au travers de certaines sources spécifiques telles que la production d'énergie et le transport maritime. Chez l'Homme, REVIHAAP notait que les études traitant de la combustion de produits pétroliers rapportaient des résultats contradictoires, mais mentionnait néanmoins une association entre l'exposition à court terme aux particules issues de la combustion du fioul et la santé (cardiovasculaire et mortalité toutes causes).

Les études chez l'Homme publiées après REVIHAAP jusqu'en février 2016 **confirment les associations rapportées par REVIHAAP** en fournissant une indication « faible » d'altération de la santé cardiovasculaire après une exposition à court terme à la combustion de produits pétroliers, définie par une méthode de répartition des sources. Les données **apportent également de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP** quant aux effets d'une exposition à long terme, en fournissant une indication « faible » d'effet sur la mortalité toutes causes et une indication « modérée » d'altération de la santé neurologique (performances cognitives de l'enfant).

Il n'a été recensé aucune étude toxicologique publiée après REVIHAAP jusqu'en février 2016 examinant la relation entre cette catégorie de source et la santé.

3. INDUSTRIES, MÉTALLURGIE

De manière générale, REVIHAAP attirait l'attention sur la complexité du facteur source « industrie », qui peut faire référence à des groupes très hétérogènes dans les publications.

3.1. Industries

Chez l'Homme, REVIHAAP rapportait des associations entre les particules issues d'une source « industrie » et la santé respiratoire de l'enfant ; la revue précisait qu'aucune conclusion ne pouvait encore être tirée sur les effets à long terme. Concernant les études toxicologiques, REVIHAAP rapportait une association entre l'exposition intranasale à des particules issues de « combustion industrielle ou incinérateurs » et les allergies respiratoires.

Les études chez l'Homme publiées après REVIHAAP jusqu'en février 2016 **confirment les associations rapportées dans REVIHAAP** en fournissant une indication « faible » d'altération de la santé respiratoire pour une exposition à court terme aux particules issues de l'industrie. Les données **apportent également de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP** quant aux effets à court terme des particules issues de l'industrie sur la santé cardiovasculaire (indication « faible » d'effet).

Il n'a été recensé aucune étude toxicologique publiée après REVIHAAP jusqu'en février 2016 examinant la relation entre cette catégorie de source et la santé.

3.2. Métallurgie

Chez l'Homme, REVIHAAP rapportait des associations entre l'exposition à court terme aux particules issues d'une source « métallurgie » et la santé (respiratoire, cardiovasculaire, et mortalité). Sur le long terme, REVIHAAP rapportait une association entre la proximité résidentielle d'une fonderie (nickel et cuivre) et la mortalité cardiovasculaire. Concernant les études toxicologiques, REVIHAAP rapportait qu'aucune information n'avait été identifiée pour soutenir l'importance des particules issues de la source industrielle autres que celles issues du processus de combustion.

Les études chez l'Homme publiées après REVIHAAP jusque février 2016 ne fournissent qu'une indication « inadéquate » d'effets de cette catégorie de source sur la santé, n'apportant aucune information nouvelle par rapport à REVIHAAP.

Il n'a été recensé aucune étude toxicologique publiée après REVIHAAP jusqu'en février 2016 examinant la relation entre cette catégorie de source et la santé.

4. COMBUSTION DE BIOMASSE

NB : Le potassium est souvent considéré comme un bon marqueur de la combustion de biomasse. Le potassium a été examiné dans le présent travail mais n'a pas spécifiquement fait l'objet d'une évaluation du poids de la preuve.

REVIHAAP concluait que l'exposition aux particules issues de la combustion de biomasse, notamment combustion de bois résidentiel, avait probablement des effets sur la santé respiratoire et cardiovasculaire. Chez l'Homme, REVIHAAP rapportait des associations entre l'exposition à court et long terme aux particules issues de la combustion de biomasse et la santé (respiratoire, cardiovasculaire, périnatale). Concernant les études toxicologiques, REVIHAAP rapportait une toxicité plus forte des particules prélevées durant des feux de forêts en comparaison de particules prélevées hors feux de forêts.

Les études chez l'Homme publiées après REVIHAAP jusqu'en février 2016 ne fournissent qu'une indication « inadéquate » d'effets de cette catégorie de source sur la santé, n'apportant aucune information nouvelle par rapport à REVIHAAP.

Les **études toxicologiques publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 **apportent de nouvelles informations par rapport à REVIHAAP**, en fournissant une indication « faible » d'effet des particules issues de la combustion de biomasse sur la santé cardiovasculaire (numération formule sanguine et coagulation).

5. POUSSIÈRES DE DÉSERT

REVIHAAP concluait à un lien entre les poussières de désert et la santé cardiovasculaire, sans pouvoir conclure sur le composant (crystal, anthropique, biologique) responsable de ces effets. Chez l'Homme, REVIHAAP rapportait des associations entre l'exposition à court terme aux particules durant des épisodes de poussières désertiques et la santé (respiratoire et cardiovasculaire). Concernant les études toxicologiques, REVIHAAP rapportait une association d'amplitude faible entre l'instillation intratrachéale de poussières de désert et l'inflammation pulmonaire.

Les **études chez l'Homme publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 **confirment les conclusions rapportées par REVIHAAP** en fournissant une indication « modérée » d'altération de la santé respiratoire (de l'enfant) en lien avec une exposition à court terme.

Il n'a été recensé aucune étude toxicologique publiée après REVIHAAP jusqu'en février 2016 examinant la relation entre cette catégorie de source et la santé.

6. SEL ET EMBRUNS MARINS

REVIHAAP suggérait l'absence d'effet des sels et embruns marins sur la santé aux concentrations actuelles. Chez l'Homme, REVIHAAP rapportait néanmoins des associations entre l'exposition à court terme à des particules liées au sel de mer et au sodium des particules, et la santé.

Les **études chez l'Homme publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 ne fournissent qu'une indication « faible » d'effet de l'exposition à court terme au sel ou aux embruns marins sur la santé respiratoire, ce qui confirme certaines associations rapportées dans REVIHAAP.

Il n'a été recensé aucune étude toxicologique publiée après REVIHAAP jusqu'en février 2016 examinant la relation entre cette catégorie de source et la santé.

7. SITES DE DÉCHETS DANGEREUX

Chez l'Homme, REVIHAAP rapportait des preuves limitées d'une association entre l'exposition à des particules issues de sites de déchets dangereux et la santé périnatale.

Les **études chez l'Homme publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 ne fournissent qu'une indication « inadéquate » d'effets de cette catégorie de source sur la santé, n'apportant aucune information nouvelle par rapport à REVIHAAP.

Les **études toxicologiques publiées après REVIHAAP** jusqu'en février 2016 ne fournissent qu'une indication « inadéquate » d'effets de cette catégorie de source sur la santé, n'apportant aucune information nouvelle par rapport à REVIHAAP.

8. AGRICULTURE ET ENVIRONNEMENT RURAL

8.1. Environnement rural

REVIHAAP n'évoquait pas les éventuels effets des particules de l'air ambiant rural sur la santé, que ce soit dans des études chez l'Homme ou chez l'animal d'expérimentation.

Il n'a été recensé aucune étude épidémiologique publiée après REVIHAAP jusqu'en février 2016 examinant la relation entre cette catégorie de source et la santé.

Les **études toxicologiques publiées depuis REVIHAAP** jusqu'en février 2016 ne fournissent qu'une indication « inadéquate » d'effets de cette catégorie de source sur la santé (respiratoire et cardiovasculaire), n'apportant aucune information nouvelle par rapport à REVIHAAP.

8.2. Agriculture

NB : L'agriculture est une source majeure d'émission de particules de nitrate d'ammonium dans l'air ambiant. L'ammonium a fait l'objet d'une évaluation du poids de la preuve dans le présent rapport.

REVIHAAP n'évoquait pas les éventuels effets des particules de l'air ambiant issues de l'agriculture sur la santé, que ce soit dans des études chez l'Homme ou chez l'animal d'expérimentation.

Il n'a été recensé aucune étude (épidémiologique ou toxicologique) publiée après REVIHAAP jusqu'en février 2016 examinant la relation entre cette catégorie de source et la santé.

1
2

Tableau 1 : Synthèse des preuves accumulées et des niveaux d'indications sanitaires des composés des particules de l'air ambiant à partir d'études chez l'Homme dans REVIHAAP et depuis REVIHAAP

Composé	Dans REVIHAAP :		Depuis REVIHAAP jusqu'en février 2016 :		Synthèse des preuves accumulées :		
	Niveau de preuve rapporté	Associations rapportées [†]	Niveau d'indication sanitaire ^θ le plus élevé (nombre de publications du corpus)		Preuves ou associations rapportées dans REVIHAAP Indication d'effet sanitaire depuis REVIHAAP		
Particules ultrafines (<100 nm)	Preuves encore limitées	Oui		Modéré (14) (+Exp.*)	+ ↗	Dans REVIHAAP : + : effet rapporté ; - : absence d'effet rapportée ; ∅ : non examiné. Depuis REVIHAAP : ↑ : nouvelle indication d'un effet sanitaire ; ↗ : confirmation de l'effet sanitaire ; → : pas de nouvelles preuves d'un effet sanitaire (i.e. une indication d'effet « faible » ou « inadéquate ») ; ∩ : indication d'absence d'effet sanitaire ; ∅ : aucune étude identifiée.	
Particules grossières (PM_{2,5-10})	Preuves suggestives	Oui		Modéré (44)	+ ↗		
Matières carbonées	Carbone suie, carbone élémentaire	Preuves suffisantes	Oui		Fort (78) (+Exp.*)		+ ↗
	Carbone organique	Informations croissantes	Oui		Fort (37) (+Exp.*)		+ ↗
	AOS (facteur source [€])	∅	Oui		Inadéquat (7) (+Exp.*)		+ →
	HAP	∅	∅		Faible (4)		∅ →
Aérosols inorganiques secondaires	AIS (facteur source [€])	∅	Oui		Faible (6)		+ →
	Sulfate	∅	Oui		Fort (48)		+ ↗
	Nitrate	∅	Oui		Fort (25) (+Exp.*)		+ ↗
	Ammonium	∅	∅		Faible (14)		∅ →
Métaux de transition	Nickel	∅	Oui [§]		Fort (34) (+Exp.*)		∅ ↑
	Zinc	∅	Oui [§]		Modéré (31)		∅ ↑
	Cuivre	∅	Oui [§]		Faible (31)		∅ →
	Vanadium	∅	Oui [§]		Fort (32)		∅ ↑
	Fer	∅	∅		Fort (31)	∅ ↑	
Silice	∅	∅		Modéré (30)	∅ ↑		
Endotoxines	∅	∅		Modéré (5)	∅ ↑		
Potentiel oxydant	∅	∅		Faible (6)	∅ →		

3
4
5
6
7
8

mortalité toutes causes santé respiratoire santé cardiovasculaire hospitalisations toutes causes. ^θ La finalité de l'évaluation du niveau d'indication d'effet sanitaire est de pouvoir conclure si l'association observée entre un composé donné des particules de l'air ambiant et une catégorie sanitaire d'intérêt (ex : santé cardiovasculaire) est fortement, ou modérément, ou encore faiblement plausible. Il peut aussi être conclu qu'un composé n'a pas d'effet sur la santé, ou bien encore que les éléments disponibles dans la littérature sont inadéquats pour permettre de conclure. *Abréviations :* AIS : Aérosols Inorganiques secondaires ; AOS : Aérosols organiques secondaires ; HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques. * Les conclusions basées sur les études d'expérimentation animale soutiennent ces indications d'effets. [†] Oui si association rapportée, non si absence d'association rapportée, ∅ si non rapportée. [§] Les associations rapportées ne concernent pas spécifiquement cet élément et incluent d'autres métaux de transition en mélanges. [€] Défini selon une méthode statistique de répartition des composés en catégories ou sources (par exemple, factorisation de matrice positive).

Tableau 2 : Synthèse des preuves accumulées et des niveaux d'indications sanitaires des sources des particules de l'air ambiant à partir d'études chez l'Homme dans REVIHAAP et depuis REVIHAAP

Catégorie de sources	Dans REVIHAAP :		Depuis REVIHAAP jusqu'en février 2016 :		Preuves accumulées :		
	Niveau de preuve rapporté	Associations rapportées [†]	Niveau d'indication sanitaire ^θ le plus élevé (nombre de publications du corpus)	Preuves ou associations rapportées dans REVIHAAP	Indication d'effet sanitaire	Preuves accumulées depuis REVIHAAP	
Trafic routier	PM _{2,5} liées au trafic	Association probable	Oui	Modéré (16) (+Exp.*)	+	↗	Dans REVIHAAP : + : effet rapporté ; - : absence d'effet rapportée ; Ø : non examiné. Depuis REVIHAAP : ↑ : nouvelle indication d'un effet sanitaire ; ↗ : confirmation de l'effet sanitaire ; → : pas de nouvelles preuves d'un effet sanitaire (<i>i.e.</i> une indication d'effet « faible » ou « inadéquate ») ; ↘ : indication d'absence d'effet sanitaire ; Ø : non examiné.
	Carbone suie lié au trafic	Preuves suffisantes [‡]	Ø	Fort (4)	+	↗	
	Échappements Diesel	Ø	Oui	Modéré (3) (+Exp.*)	+	↗	
	Échappements essence	Ø	Oui	Modéré (1)	+	↗	
	Poussières de route, matière crustale	Association probable	Oui	Fort (16)	+	↗	
	Poussières de freins	Ø	Ø	Faible (1) [#]	Ø	→	
Combustion	Combustion charbon	Preuves solides [‡]	Oui	Fort (7) (+Exp.*)	+	↗	
	Combustion produits pétroliers	Influence sur la santé	Oui et non	Modéré (10)	+	↗	
Industrie	Industrie	Ø	Oui	Faible (5)	+	→	
	Métallurgie	Ø	Oui	Inadéquat (10) [#]	+	→	
Combustion de biomasse	Association probable	Oui [§]	Inadéquat (4) [#]	+	→		
Poussières de désert	Ø	Oui	Modéré (3)	+	↗		
Sels et embruns marins	Suggestion d'absence d'effet	Oui et non	Faible (9)	-	→		
Site de déchets dangereux	Ø	Non	Inadéquat (1)	-	→		
Environnement rural et agriculture	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø		

mortalité toutes causes santé respiratoire santé cardiovasculaire santé neurologique. ^θ La finalité de l'évaluation du niveau d'indication d'effet sanitaire est de pouvoir conclure si l'association observée entre une source donnée des particules de l'air ambiant et une catégorie sanitaire d'intérêt (ex : santé cardiovasculaire) est fortement, ou modérément, ou encore faiblement plausible. Il peut aussi être conclu qu'une source n'a pas d'effet sur la santé, ou bien encore que les éléments disponibles dans la littérature sont inadéquats pour permettre de conclure. * Les conclusions basées sur les études d'expérimentation animale soutiennent ces indications d'effets. † Oui si association rapportée, non si absence d'association rapportée, Ø si non rapporté. ‡ Ce niveau de preuve se base sur les preuves accumulées pour le carbone suie. ‡ Ce niveau de preuve se base sur les preuves accumulées pour des particules enrichies en sulfate (traceur chimique de la combustion de charbon). § Notamment, associations entre les feux de forêts et des événements sanitaires. # Ne considère pas les indications d'effets sanitaires ayant pu être observées pour des composés ou traceurs chimiques liés à cette source.

2.2.3 Discussion, limites et incertitudes

Évaluation du poids de la preuve à partir des études publiées après REVIHAAP

Définition des niveaux d'indication d'effet sanitaire

Les niveaux d'indications sanitaires (« fort », « modéré », « faible », ou « inadéquat ») définis par la démarche du groupe de travail sur la base des études publiées depuis REVIHAAP jusqu'en février 2016 s'inscrivent dans l'étape d'identification du danger de la démarche globale d'évaluation du risque. En effet, les niveaux d'indications sanitaires des composés et sources ne traduisent pas la force de l'association, ni la toxicité relative entre composés et entre sources. Elles ne traduisent pas non plus la probabilité de survenue dans la population, ni l'amplitude du risque. Les indications sanitaires représentent l'existence plus ou moins avérée d'une association (ou absence d'association) entre l'exposition aux particules de l'air ambiant (selon les composés et sources des particules) et des événements sanitaires. Ces indications permettent ainsi d'établir si l'hypothèse d'un lien de causalité est plus ou moins plausible sur la base des publications, évaluées dans leur ensemble en prenant en compte certains critères de causalité introduits par Bradford Hill : amplitude de l'association, cohérence des observations dans différentes populations, temporalité de l'association, relation dose-effet, plausibilité biologique, existence de preuves expérimentales et spécificité.

Interprétation des niveaux d'indication d'effet sanitaire

Il existe un ensemble de causes génératrices d'hétérogénéité et de variabilité entre les résultats et conclusions par composés et catégories de sources, en lien avec la mesure et l'estimation de l'exposition dans les études. Cette variabilité intrinsèque invite à la prudence lors de la formulation et l'interprétation des conclusions de l'expertise, en particulier pour les catégories de composés et de sources peu documentées.

Corrélation entre composés et sources

Il ne peut être exclu que les niveaux d'indication d'effet sanitaire obtenus pour un composé ou une source soient le reflet d'autres composés émis ou formés avec lui, notamment dans le cadre des études observationnelles (dont l'exposition n'est pas contrôlée). Ainsi, le niveau d'indication d'effet obtenu pour un composé d'intérêt, considéré individuellement dans l'approche, pourrait tout à fait témoigner de l'effet sur la santé d'une source émettrice ou d'un mélange de composés fortement corrélés – plutôt que de la toxicité intrinsèque du composé. Par exemple, les niveaux d'indications d'effet sanitaire des sulfate et nitrate des particules de l'air ambiant pourraient refléter la capacité de ces composés à moduler la toxicité des particules dans leur ensemble, ou refléter l'effet sanitaire d'une source, telle que la combustion de charbon (émettrice de sulfate). De même, les effets individuels des métaux de transition sont difficilement identifiables en raison de la forte corrélation de leurs concentrations, liée à leurs sources communes, par exemple : l'usure des freins et des pneus (fer, zinc et cuivre) et l'industrie ou la combustion de produits pétroliers (nickel, vanadium et fer). Pour limiter l'impact que cela aurait pu avoir sur les conclusions, le groupe de travail a systématiquement pris en compte le risque de biais correspondant dans les lignes de preuves, en lien avec l'absence de modèle multi-polluant ou à la perte d'association après ajustement sur d'autres composés.

Certaines publications ont utilisé des analyses plus sophistiquées que le simple ajustement pour étudier les risques sanitaires associés aux composés des particules, indépendamment d'autres composés ou de la masse totale des particules, comme par exemple la méthode des résidus (qui consiste à régresser le composé d'intérêt sur la masse totale afin d'obtenir un indicateur d'exposition indépendant de cette masse totale – les résidus du modèle). Bien que les résultats

issus de ces différentes méthodes, sophistiquées ou non, nécessitent des interprétations propres, il a été montré qu'ils étaient généralement homogènes, ne modifiant pas les conclusions d'effet sur la santé. Ainsi, les différentes méthodes utilisées entre les études n'ont pas été discriminées lors de l'évaluation des lignes de preuves par les membres du groupe de travail.

La concentration de NO₂ est un facteur important pouvant modifier les effets sanitaires associés aux particules de l'air ambiant. C'est également un indicateur clé de la pollution issue du trafic. Il a notamment été montré que des concentrations élevées en NO₂ (en termes absolus ou relatifs aux PM₁₀) étaient associées à des effets plus forts des PM₁₀ (pour un incrément de 10 µg/m³) sur la mortalité à court terme (Katsouyanni et al., 2001). Cependant, peu d'études publiées après REVIHAAP jusqu'en février 2016 ont pris en compte les niveaux de NO₂ dans leurs analyses des effets sur la santé des composés ou sources particulières, en particulier sur le long terme. Ainsi, étant donné l'importance du NO₂ en tant qu'indicateur clé de la pollution issue du trafic routier, les niveaux d'indication sanitaire de certains composés ou sources (eux-mêmes liés au trafic routier) doivent être interprétés avec prudence.

Variabilité métrologique

L'interprétation des conclusions du groupe de travail nécessite une certaine prudence compte tenu du manque de standardisation dans les protocoles de mesure et d'analyse de certains composés ou fraction granulométrique entre les études. La définition d'une même source peut aussi varier d'une étude à l'autre. Cette hétérogénéité limite la comparabilité des résultats de l'expertise associés aux différents composés, mais peut également limiter la comparabilité et l'interprétation des conclusions d'un même composé, d'une même fraction granulométrique ou d'une même source. Par exemple, certains composés ou fractions granulométriques peuvent présenter une variabilité physico-chimique importante d'une zone géographique à l'autre (notamment, les aérosols organiques secondaires, le carbone organique et les particules grossières). Ou encore, certains composés (ions nitrates, ammonium, sulfates et métaux de transition) sont relativement faciles à analyser, tandis que d'autres nécessitent des prélèvements, analyses et extractions plus délicats (par exemple, les hydrocarbures aromatiques polycycliques). Ces considérations peuvent ainsi favoriser la mesure et l'investigation de composés tels que les ions et les métaux de transition et donc, la survenue d'associations fortuites (faux positifs). Les hydrocarbures aromatiques polycycliques incluent un large nombre d'espèces dont la toxicité peut être variable ; cette complexité pourrait introduire une variabilité artificielle dans les résultats des études et limiter leur comparabilité ainsi que l'interprétation des conclusions de l'expertise pour ce composé. Le comptage des particules ultrafines (<100 nm) peut inclure différentes fractions (par exemple, de 3 ou 10 nm) selon l'instrument utilisé (SMPS, nanoSMPS, DMPS, etc.), ce qui constitue une source de variabilité potentiellement importante entre les études sur le nombre mesuré de particules, leur composition chimique, ou leur état (par exemple, particules <10 nm possiblement gazeuses dans les voies respiratoires). Le regroupement du carbone suie, du carbone élémentaire et du PMabsorbance dans une même catégorie constitue également une source d'hétérogénéité pouvant limiter l'interprétation des conclusions. Ce regroupement est cependant soutenu par la volonté internationale de standardisation des mesures et les corrélations connues entre les niveaux ambiants de ces trois composés.

Méthodes statistiques de répartition des sources

Les sources ou facteurs pour lesquels les concentrations de particules ont été affectées par des méthodes statistiques de répartition des sources (principalement, *Positive Matrix Factorisation* – PMF) présentent des différences intrinsèques d'une étude à l'autre, de par la méthode utilisée (définition basée sur les données mesurées) et la zone géographique (différents composés et niveaux). Certaines sources font référence à un groupe complexe de catégories d'émission, de

nature différente dans chacune des publications (notamment, la source industrielle et la combustion de produits pétroliers). Ainsi, les associations rapportées dans les publications peuvent être difficilement comparables et les niveaux d'indication sanitaire correspondants peuvent en être limités (dans leur définition et interprétation). Par ailleurs, certaines sources peuvent être très intriquées et difficilement séparables (notamment, les multiples sources particulières liées au trafic routier), ce qui rend difficile d'exclure la contribution de ces sources dans les niveaux d'indications sanitaires obtenus pour l'une d'entre elle. De manière générale, il faut noter que la méthode PMF capture généralement bien les sources primaires de particules dans l'air ambiant (ce qui n'est pas forcément le cas pour les particules ou aérosols secondaires). De plus, les résultats obtenus par la méthode PMF sont fortement influencés par les paramètres entrés par l'utilisateur (sources d'incertitude) ainsi que par le choix d'interprétation des auteurs. Certaines sources ont ainsi pu être classées dans une certaine catégorie (par exemple, sels et embruns marins) bien qu'elles aient été définies de manière incertaine (par exemple, inclusion potentielles de sels de voiries).

Limites de l'approche

Le groupe de travail a exclu l'utilisation de méthodes quantitatives telles que l'inférence bayésienne et la méta-analyse. En effet, les études évaluées ont été publiées sur une période de temps tronquée, non représentative de la littérature dans son ensemble (depuis REVIHAAP et jusqu'en février 2016), et présentent des protocoles hétérogènes, qui peuvent être difficilement combinables. Par ailleurs, le groupe ne disposait pas des ressources nécessaires au traitement statistique du nombre important de triplets (composés ou sources, durées et événements sanitaires). Cependant, l'approche qualitative utilisée sur le modèle proposé par l'OHAT permet d'inclure ces différentes études et protocoles par un système standardisé de cotation des risques de biais et des niveaux de confiance sur la base de critères prédéfinis. De plus, l'approche utilisée permet d'évaluer les études chez l'Homme et les études d'expérimentation animale de manière similaire, afin d'obtenir des indications sanitaires cohérentes et parallèles pour chacun des deux corpus.

Recherche et sélection des études

La stratégie de recherche adoptée ciblait les études ayant examiné différentes compositions, sources ou tailles (ultrafine ou grossière) des particules de l'air ambiant extérieur auxquelles la population générale est exposée. Cette démarche a permis de gagner en comparabilité et en cohérence entre les composés et les sources pour répondre à la question posée, mais a eu pour conséquence de laisser certains champs de littérature de côté (notamment, les études en milieu professionnel). Le groupe de travail estime que les composés et les sources principalement concernés par des réserves non explorées de la littérature scientifique sont les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les endotoxines, les particules issues d'échappement des moteurs Diesel, les particules issues d'échappement des moteurs à essence, et les particules issues de sources industrielles.

La recherche et l'analyse des publications a été arrêtée en février 2016, en raison du nombre déjà important d'études sur cette période et du temps nécessaire à l'intégration dans les lignes de preuves au regard du calendrier de travail. Les études mécanistiques publiées après REVIHAAP jusqu'en février 2016 sur des essais strictement *in vitro* ou *in silico* n'ont pas été incluses compte tenu des ressources insuffisantes au sein du groupe de travail et du caractère peu directif et inadapté de l'outil OHAT pour ces types d'études. Les résultats des essais *in vitro* en support de ceux obtenus *in vivo* n'ont cependant pas été exclus. A titre indicatif, les études publiées après février 2016 jusqu'au 21 août 2018 correspondant à nos critères de recherche ont été recensées (n=80 études chez l'Homme retenues à partir du texte intégral, n=39 études d'expérimentation animale retenues à partir du titre et résumé) afin de donner un aperçu des composés, sources et événements de santé plus récemment documentés.

La constitution des corpus s'est basée sur des requêtes réalisées sur les moteurs de recherche Pubmed et Scopus, complété par des études connues des membres du groupe de travail ou citées dans les publications identifiées. D'autres bases de données potentiellement pertinentes n'ont pas été consultées, telles qu'Embase, Toxline ou Web of Science, et la littérature grise (en marge des dispositifs de contrôle bibliographique) n'a pas été recherchée. Aussi, les termes et équations de recherche utilisés se basent sur des concepts plutôt larges (le concept de particules, croisé à celui de composition, source et granulométrie) et ne ciblent pas les études examinant des composés, sources ou fractions granulométriques (autres que les particules ultrafines et les particules grossières) en particulier, ni les études examinant la toxicité des substances à l'état pur. Néanmoins, la démarche suivie respecte les principes partagés par la Collaboration Cochrane (Higgins et Green, 2011), l'*European Food Safety Authority* (EFSA, 2010), l'*Office of Health Assessment and Translation* dans le cadre du *National Toxicology Program* (OHAT NTP, 2015) et l'ANSES (ANSES, 2017) d'utiliser au moins deux bases de données. La stratégie de recherche a enfin permis d'inclure une large gamme de composés et de sources tout en rationalisant la méthode de « requête » et sélection, pour éviter la déclinaison de l'ensemble des composés et sources de particules dans les équations de recherche et diminuer le bruit de fond que cela peut générer dans les références obtenues.

Evaluation de la qualité des études individuelles

Afin d'évaluer la qualité individuelle des études, sur la base de l'outil proposé par l'OHAT, deux membres du groupe de travail ont coté les risques de biais présents dans les publications en suivant des lignes directrices qu'il a prédéfinies, témoignant d'un effort de standardisation. Toutefois, le groupe de travail n'a pas élaboré de protocole plus détaillé étant donnée la lourdeur attendue de ce processus, en lien avec l'hétérogénéité des protocoles d'études, des indicateurs d'exposition, des indicateurs d'effet et des méthodes statistiques. Toute divergence dans les cotations entre les deux évaluateurs a été résolue par le biais de discussions incluant l'ensemble des membres du groupe de travail afin d'atteindre un consensus. Ce principe de double lecture indépendante par deux évaluateurs formés, respecte les recommandations du groupe de travail « Méthodologie de l'Évaluation des Risques » de l'Anses.

La qualité des études individuelles semble relativement satisfaisante dans les études chez l'Homme où les risques de biais les plus fréquemment cotés forts concernaient moins de 25 % des études. Ils portaient sur les risques de biais liés à la caractérisation de l'exposition, à des questions autres (par exemple : méthodes statistiques), aux facteurs de confusion ou variables modifiantes et à l'ajustement ou au contrôle sur d'autres expositions (par exemple : modèles ajustés sur la masse totale des $PM_{2,5}$). Le constat est plus nuancé pour les études expérimentales chez l'animal où certains risques de biais étaient la plupart du temps non évaluables à partir des données de la publication (60-90 % des études) : randomisation de la dose administrée, dissimulation de l'allocation des groupes d'étude, maintien en aveugle des groupes d'études pour les personnels de recherche durant l'étude et évaluation en aveugle de l'effet. Pour les études chez l'animal, les risques de biais les plus fréquemment cotés forts étaient ceux liés aux facteurs de confusion ou variables modifiantes et à l'attrition ou l'exclusion de données de l'analyse. Cette qualité individuelle des études chez l'animal, qui semble globalement moins satisfaisante que celle des études chez l'Homme, pourrait être expliquée par les équations de recherche bibliographique, probablement moins performantes pour les études chez l'animal, et par des critères d'inclusion peu restrictifs permettant l'inclusion d'études de faible qualité.

Evaluation des niveaux d'indication d'effets sanitaires

L'évaluation du niveau d'indication d'effet pour chacun des composés/sources, durées, et événements sanitaires contenus dans des lignes de preuve consiste à coter ou décoter (augmenter ou diminuer respectivement) la confiance portée dans chaque corpus (selon des facteurs prédéfinis) puis à déterminer la présence ou non d'un effet sur la santé, ce qui implique de devoir apprécier l'importance relative des études composant le corpus. Afin d'harmoniser ces prises de décisions, et de rendre le processus le plus transparent possible, le groupe de travail a identifié des lignes de conduite générales, dont quelques exemples sont présentés ici. Les décisions étaient actées après consensus au sein des membres du groupe de travail et ont été documentées dans les suppléments d'informations associés au rapport socle (ANSES, 2019a).

La décision de la présence ou non d'un effet sur la santé s'est largement basée sur la règle du plus grand nombre (c'est-à-dire, qu'une majorité de publications du corpus montrant un effet amenait à conclure à la présence d'un effet, et *vice versa*), bien que la qualité des publications ait également été prise en compte (notamment, risques de biais et taille de l'échantillon). Suivant un certain principe de précaution, les membres du groupe de travail ont toujours favorisé la décision « d'effet sur la santé » dans les cas où les effets rapportés (bien que minoritaires) étaient issus de publications de bonne qualité ou quand la précédente règle était difficilement applicable (≤ 3 publications).

La décote du niveau de confiance du corpus était principalement liée au risque de biais, considéré fort ou probablement fort, dans les études présentant des effets sur la santé, en lien avec : l'absence de modèles bi- ou multi-polluant, une association devenant nulle après ajustement sur la masse totale ou sur un autre composé ou des limitations dans la mesure ou l'estimation de l'exposition. La surcote du niveau de confiance liée à l'amplitude large de l'effet était basée sur la comparaison de l'effet d'intérêt à l'effet associé à la masse totale des particules ou d'autres composés. Dans les lignes de preuves des études humaines, la surcote du niveau de confiance liée à la présence de facteurs de confusion résiduels (c'est-à-dire des facteurs de confusion susceptibles, s'ils avaient été considérés, de renforcer les résultats déjà observés) était appliquée de manière systématique en lien avec la mesure ou l'estimation de l'exposition. Cette décision se base sur l'hypothèse que les erreurs de classification liées à la mesure ou l'estimation de l'exposition sont généralement considérées comme non différentielles (bien que la nature exacte du biais soit inconnue dans chaque étude), biaisant les résultats vers le nul. Ainsi, des associations déjà observées malgré la présence de ce biais ne pourraient être que renforcées après prise en compte du facteur de confusion résiduel (c'est-à-dire, une *meilleure* estimation ou mesure de l'exposition, plus proche de l'exposition supposée réelle des individus), augmentant donc le niveau de confiance du corpus (Sheppard et al. (2005) citée dans EPA (2009)).

Evaluation des conclusions de REVIHAAP

La revue de la littérature REVIHAAP, qui a été retenue par le groupe de travail comme socle de connaissances, dresse un état de l'art relatif aux effets sanitaires de différents fractions, métriques, composés chimiques et types de source des particules de l'air ambiant extérieur (OMS Europe, 2013). Cette revue n'est pas systématique et ne peut donc prétendre à fournir une information la plus exhaustive. Certains composés et sources n'ont pas été évalués spécifiquement comme les HAP, la silice, les endotoxines, le potentiel oxydant, les métaux de transition (individuels), les poussières de freins, les particules issues d'échappement des moteurs Diesel, les particules issues d'échappement des moteurs essence et les particules de l'air ambiant en environnement rural. Néanmoins, les conclusions apportées par cette revue ont

été jugées robustes par le groupe de travail car il s'agit d'une revue de consensus associant un grand nombre d'auteurs de premier plan, examinant les études chez l'Homme et d'expérimentation animale, et couvrant à la fois les aspects de composition, de taille et de sources des particules de l'air ambiant.

D'autres sources n'ont pas été évaluées spécifiquement, que ce soit dans la revue REVIHAAP ou dans le présent travail, notamment : les zones aéroportuaires, les sources naturelles telles que les pollens et débris végétaux, l'érosion éolienne, les éruptions volcaniques et les émissions de composés organiques volatiles biogéniques par les végétations.

Mise en perspectives des preuves accumulées (dans REVIHAAP et depuis REVIHAAP)

La mise en perspectives des indications sanitaires obtenues sur la base des études publiées depuis 2013 jusqu'en février 2016 avec les informations apportées par REVIHAAP s'écarte du caractère systématique de la démarche d'évaluation du poids de la preuve. Le format hétérogène des conclusions formulées dans la revue REVIHAAP ne permet pas de combiner systématiquement ces conclusions avec celles des études publiées ensuite. Des efforts de mise en cohérence ont cependant été déployés en utilisant la même catégorisation des indicateurs d'exposition et des indicateurs d'effet, ainsi qu'une trame standardisée de rédaction des résultats et conclusions du rapport.

3 EFFETS SANITAIRES DES PARTICULES DE L'AIR AMBIANT – CONCLUSIONS DU CES « AIR » et du GT « Particules »

Préambule

Les conclusions générales présentées ici résultent d'une mise en perspectives des conclusions de la revue REVIHAAP de l'OMS Europe (publiée en 2013) avec les indications sanitaires obtenues sur la base des études publiées depuis REVIHAAP jusqu'en février 2016 (études humaines et études d'expérimentation animale). Les indications accumulées depuis REVIHAAP font référence aux niveaux d'indication d'effet sanitaire obtenus sur la base des études publiées depuis REVIHAAP jusqu'en février 2016 :

- Ces indications, si elles sont modérées ou fortes, viennent confirmer l'effet sanitaire d'un composé ou d'une source lorsque REVIHAAP évoquait déjà, en 2013, l'effet spécifique de ce composé ou de cette source.
- Ces indications sont considérées nouvelles et viennent étayer l'effet sanitaire d'un composé ou d'une source lorsque REVIHAAP n'évoquait pas d'effet spécifique.
- Ces indications, si elles sont inadéquates ou faibles, ne permettent pas de conclure à un effet sanitaire ou ne font que suggérer cet effet ; elles sont le reflet d'une littérature émergente ne mettant pas en évidence d'associations, ou d'une littérature présentant un niveau de confiance⁴ insuffisant pour conclure malgré des associations observées.
- Des indications inexistantes font référence à l'absence d'études publiées depuis REVIHAAP parmi celles sélectionnées et évaluées dans le cadre des présents travaux.
- Une indication d'absence d'effet sanitaire correspond à une littérature présentant un niveau de confiance élevé et ne mettant pas en évidence d'association entre un composé ou une source et une catégorie d'effets sanitaires.

Les conclusions portent spécifiquement sur les effets sanitaires des composés et sources des particules de l'air ambiant extérieur. Ces conclusions ne remettent pas en cause les preuves apportées par la littérature issue d'autres corpus sur la nocivité des substances ou sur les effets sur la santé des particules (notamment pour la silice, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les particules d'échappement des moteurs Diesel, les particules d'échappement des moteurs essence, les particules issues de sources industrielles spécifiques et les particules issues de la combustion de biomasse). Enfin, ces conclusions ne remettent pas en cause les preuves apportées par la littérature sur les effets sanitaires des PM_{2,5} et des PM₁₀ sans spéciation chimique ou répartition en sources.

⁴ Niveau de confiance du corpus défini à partir de l'outil de cotation proposé par l'OHAT, Étape 6 Figure 1.

3.1 Conclusions par composés des particules de l'air ambiant extérieur

Particules ultrafines (<100 nm) et particules grossières (PM_{2,5-10})

En 2013, REVIHAAP concluait à un effet sanitaire seulement suggestif pour les particules grossières et à des preuves encore limitées pour les particules ultrafines. Les indications accumulées depuis REVIHAAP sont modérées et confirment l'effet sanitaire de ces fractions sur la base de corpus larges d'études humaines, présentant un bon niveau de confiance et examinant de nombreuses catégories d'effets. Pour les particules ultrafines, les indications accumulées depuis REVIHAAP sur la base d'études d'expérimentation animale confortent ce résultat. Les niveaux d'indications sanitaires les plus élevés chez l'Homme sont obtenus pour la santé respiratoire (particules grossières), la santé cardiovasculaire (particules ultrafines), et la mortalité toutes causes (particules grossières). Enfin, les nouvelles indications accumulées depuis REVIHAAP sont faibles et ne font que suggérer un effet à long terme des particules ultrafines sur la santé neurologique (développement des performances cognitives de l'enfant), en raison du corpus limité à une unique publication.

Matières carbonées

En 2013, REVIHAAP concluait à des preuves suffisantes d'un effet sanitaire du carbone suie, et à des preuves croissantes pour le carbone organique. Les indications accumulées depuis REVIHAAP sont fortes et confirment l'effet sanitaire de ces composés sur la base de corpus larges d'études humaines, présentant un bon niveau de confiance et examinant de nombreuses catégories d'effets. Confortant ces résultats, les indications accumulées depuis REVIHAAP sur la base des études d'expérimentation animale sont faibles à modérées. Les niveaux d'indications sanitaires les plus élevés chez l'Homme sont obtenus pour la santé respiratoire, la santé cardiovasculaire, la mortalité toutes causes, et les hospitalisations toutes causes, tant sur le court terme que sur le long terme. Enfin, les nouvelles indications accumulées depuis REVIHAAP sont faibles et suggèrent un effet à long terme du carbone suie des particules de l'air ambiant sur la santé neurologique (développement des performances cognitives de l'enfant) et sur la santé périnatale (faible poids de naissance), deux catégories sanitaires non évoquées dans REVIHAAP.

En 2013, REVIHAAP n'examinait pas les effets sanitaires des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) des particules de l'air ambiant extérieur et des aérosols organiques secondaires (AOS) en tant que facteur source⁵. Dans le cas des AOS (facteur source), les nouvelles indications accumulées depuis REVIHAAP sont inadéquates et ne permettent pas de conclure fermement à un effet sanitaire, en raison d'une littérature émergente, de taille encore réduite, ne mettant pas en évidence d'associations ; de plus, l'hétérogénéité des facteurs définis dans les publications peut rendre difficile l'interprétation et la comparaison des résultats. Dans le cas des HAP, les nouvelles indications accumulées depuis REVIHAAP sont faibles et ne permettent pas de conclure fermement à un effet sanitaire, en raison du niveau de confiance insuffisant placé dans le corpus ; aussi, la grande diversité des HAP contenus dans les particules de l'air ambiant rend difficile la comparaison des résultats. Cependant, les HAP peuvent être associés au carbone suie et sont inclus dans le carbone organique mesurés dans l'air ambiant, pour lesquels les indications accumulées sont fortes. De plus, il existe une large littérature, non prise en compte dans la présente expertise, sur la nocivité de certains HAP (exposition classée cancérigène par le CIRC).

⁵ Facteur (regroupement de composés corrélés) obtenu par une méthode statistique de répartition des composés en catégories, représentant souvent les sources d'émissions ; par exemple, factorisation de matrice positive ou analyse en composante principale.

Aérosols inorganiques secondaires

En 2013, REVIHAAP rapportait des associations entre le sulfate et le nitrate, traceurs des aérosols inorganiques secondaires (AIS) dans l'air ambiant, et des événements néfastes pour la santé, mais ne concluait pas à un niveau de preuve en raison du manque d'indication sur le caractère direct et causal de l'association. Les indications accumulées depuis REVIHAAP sont fortes et confirment les effets sanitaires du sulfate et du nitrate d'après des corpus larges d'études humaines, présentant un bon niveau de confiance et examinant de nombreuses catégories d'effets. En appui à ce résultat, les indications accumulées depuis REVIHAAP, sur la base des études d'expérimentation animale, sont faibles concernant les effets du nitrate présent dans des échappements de moteurs Diesel et essence sur la santé cardiovasculaire – lésions d'athérosclérose et effet sur la numération de la formule sanguine (hématies/hémoglobine). Les niveaux d'indications sanitaires les plus élevés chez l'Homme sont obtenus pour la santé respiratoire, la santé cardiovasculaire, et la mortalité toutes causes. De plus, les nouvelles indications accumulées depuis REVIHAAP sont modérées et suggèrent également un effet à long terme du sulfate et du nitrate des particules de l'air ambiant sur la santé périnatale (faible poids de naissance), une catégorie sanitaire non évoquée dans REVIHAAP. Bien que l'évaluation réalisée dans les présents travaux prenne en compte de nombreux critères de causalité, il ne peut être exclu que les indications sanitaires obtenues reflètent la capacité de ces composés (sulfate et nitrate) à moduler la toxicité des particules dans leur ensemble ou le potentiel effet sanitaire de leurs sources communes (combustions), plutôt que la toxicité intrinsèque de ces composés.

En 2013, REVIHAAP n'évoquait pas les effets d'autres aérosols inorganiques secondaires, tels que l'ammonium, ou des AIS en tant que facteur source. Dans le cas des AIS (facteur source), les nouvelles indications accumulées depuis REVIHAAP sont faibles et ne permettent pas de conclure à un effet sanitaire, en raison d'une littérature émergente, de taille réduite, ne présentant pas un niveau de confiance suffisant ; de plus, l'hétérogénéité des facteurs définis dans les publications rend difficile la comparaison des résultats. Dans le cas de l'ammonium, les nouvelles indications accumulées depuis REVIHAAP sont faibles et ne permettent pas de conclure fermement à un effet sanitaire, car le corpus ne présentait pas un niveau de confiance suffisant. Cependant, les niveaux d'ammonium sont généralement corrélés à ceux du sulfate et du nitrate, pour lesquelles les indications accumulées sont fortes.

Métaux de transition

En 2013, REVIHAAP rapportait des associations entre certains métaux (nickel, zinc, vanadium ; en mélanges) et la santé. Les nouvelles indications accumulées depuis REVIHAAP, de modérées à fortes pour ces composés, viennent étayer les effets sanitaires du nickel, du zinc, du vanadium et du fer sur la base de corpus larges d'études humaines, présentant un bon niveau de confiance et examinant de nombreuses catégories d'effets. Les niveaux d'indications sanitaires les plus élevés sont obtenus pour la santé cardiovasculaire, la santé respiratoire (nickel et vanadium uniquement), et la mortalité toutes causes (fer uniquement). Cependant, il est difficile de distinguer les effets individuels des métaux de transition en raison de la forte corrélation des concentrations mesurées, liée à leurs sources communes : l'usure des freins et des pneus (fer, zinc et cuivre) et l'industrie ou la combustion (nickel, vanadium et fer). Ainsi, les indications sanitaires obtenues pour les métaux, considérés individuellement dans la démarche d'évaluation, peuvent tout à fait témoigner de l'effet sanitaire de leurs sources communes ou des métaux en mélange.

Autres composés chimiques des particules de l'air ambiant

Aucune démarche d'évaluation du poids de la preuve n'a été mise en place pour les autres composés ou éléments (métalliques, inorganiques, ou minéraux) des particules de l'air ambiant historiquement considérés comme moins souvent associés à des effets sur la santé dans les études épidémiologiques. Les études publiées depuis REVIHAAP, sélectionnées et décrites au cours des travaux, rapportent néanmoins des associations entre la santé (respiratoire et cardiovasculaire) et le calcium, le potassium, le magnésium, le manganèse, le plomb, et le chlorure. Certains de ces composés peuvent être associés à des sources (potassium : traceur de la combustion de biomasse), à des phénomènes (calcium : phénomène d'abrasion et envol des poussières liés aux chantiers, aux gravières, et au travail ou à l'érosion des sols), ou à d'autres composés évalués individuellement.

Silice

La revue REVIHAAP n'évoquait pas les effets sur la santé de la silice dans l'air ambiant extérieur. Les nouvelles indications accumulées depuis REVIHAAP sont modérées et viennent étayer les effets sanitaires de la silice contenue dans les particules de l'air ambiant, notamment sur la santé respiratoire et la mortalité toutes causes, sur la base d'un corpus large d'études humaines présentant un bon niveau de confiance et examinant de nombreuses catégories d'effets. Il existe par ailleurs une large littérature, non évaluée ici, sur la nocivité de la silice cristalline (exposition classée cancérigène par le CIRC).

Endotoxines

La revue REVIHAAP n'évoquait pas les effets sur la santé des endotoxines dans l'air ambiant extérieur. Les nouvelles indications accumulées depuis REVIHAAP sont modérées et viennent étayer les effets sanitaires des endotoxines contenues dans les particules de l'air ambiant, notamment sur la santé cardiovasculaire, sur la base d'un corpus de petite taille mais présentant un bon niveau de confiance. Le manque de standardisation dans les protocoles de mesure et d'analyse des endotoxines ainsi que la diversité des composés auxquels elles peuvent s'attacher appellent à la prudence dans l'interprétation de ces conclusions. Cependant, il existe une large littérature, non prise en compte dans la présente expertise, examinant la nocivité de l'exposition à de fortes concentrations d'endotoxines chez des travailleurs manipulant de la matière organique, tels que les égoutiers, ouvriers des usines de tri et de traitement de déchets et les agriculteurs.

Potentiel oxydant des particules

Le potentiel oxydant des particules n'est pas un composé en soi. Il s'agit d'un indicateur mesuré par des tests acellulaires quantifiant la capacité intrinsèque des particules à générer des espèces réactives de l'oxygène (ERO)⁶. Le potentiel oxydant des particules est proposé depuis quelques années comme une « métrique » autre que la masse ou la composition chimique des particules atmosphériques pour évaluer leurs effets sanitaires.

En 2013, REVIHAAP ne faisait qu'évoquer le stress oxydant comme mécanisme potentiel de l'effet des particules sur la santé. Les nouvelles indications accumulées depuis REVIHAAP sont faibles et ne font que suggérer un effet du potentiel oxydant des particules (mesuré en condition acellulaire) sur la santé respiratoire et la santé cardiovasculaire, car la littérature est encore émergente (corpus de taille réduite) et ne présente pas un niveau de confiance suffisant pour

⁶ La capacité des particules à générer des ERO est impliquée, avec d'autres voies moléculaires et cellulaires, dans l'induction de stress oxydant dans les cellules cibles pulmonaires. Le stress oxydant est un mécanisme de la toxicité des particules. La capacité des particules à générer des ERO est également reliée à la composition et à la surface des particules.

permettre de conclure fermement. En appui à ce résultat, les indications accumulées depuis REVIHAAP sur la base des études d'expérimentation animale sont faibles concernant les effets respiratoires et cardiovasculaires (infiltration inflammatoire respiratoire et inflammation systémique) du stress oxydant induit par l'inhalation de particules de l'air ambiant chez des souris. Il est à noter que la mesure du potentiel oxydant des particules est encore récente et plusieurs méthodes de mesure non standardisées existent, chacune sensible à des molécules ou des familles d'espèces chimiques qui peuvent être différentes. Cela peut expliquer en partie les limitations de taille et de confiance dans le corpus.

3.2 Conclusions par sources des particules de l'air ambiant extérieur

Trafic routier

En 2013, la revue REVIHAAP concluait à des preuves suffisantes d'effets sur la santé du carbone suie (émis majoritairement par les véhicules Diesel dans la plupart des environnements urbains) et à des associations probables avec les $PM_{2,5}$ liées au trafic routier et avec les poussières de route (incluant la matière crustale). Les nouvelles indications accumulées depuis REVIHAAP, de fortes à modérées selon la catégorie de source, confirment l'effet sanitaire de la source « trafic routier » dans son ensemble sur la base de corpus d'études humaines présentant un bon niveau de confiance et examinant de nombreuses catégories d'effets. Les corpus pour le carbone suie lié au trafic routier, les particules d'échappement Diesel et les particules d'échappement essence étaient néanmoins de petite taille. Confortant ces résultats, les indications accumulées depuis REVIHAAP sur la base des études d'expérimentation animale sont faibles à modérées concernant les effets respiratoires (lésions ultra structurales, fonction respiratoire, remodelage pulmonaire) et cardiovasculaires (fonction vasculaire, coagulation, lésions d'athérosclérose) des $PM_{2,5}$ liées au trafic routier et des particules d'échappement Diesel. Les niveaux d'indications sanitaires les plus élevés chez l'Homme sont obtenus pour le carbone suie lié au trafic routier (sur la santé respiratoire, la santé cardiovasculaire, et la mortalité toutes causes) et les poussières de routes (sur la santé respiratoire), d'après des corpus larges. Les nouvelles indications accumulées depuis REVIHAAP sont modérées et suggèrent un effet à long terme des $PM_{2,5}$ issues du trafic routier sur la santé neurologique et la santé périnatale, deux catégories sanitaires non évoquées dans REVIHAAP. Les conclusions pour la catégorie de source « trafic routier » sont cohérentes avec les indications obtenues pour certains composés évalués individuellement, tels que le carbone suie, le carbone organique et certains métaux. Indépendamment du corpus d'études analysées sur les effets des particules de l'air ambiant extérieur issues du trafic routier, il existe une large littérature, non évaluée ici, sur la nocivité des effluents d'échappement des moteurs Diesel et des particules Diesel (exposition classée cancérigène par le CIRC) et des effluents d'échappement des moteurs à essence (exposition classée cancérigène probable par le CIRC).

Combustion de charbon et de produits pétroliers

En 2013, REVIHAAP rapportait des preuves solides de l'effet sur la santé de la combustion de charbon, en se basant notamment sur les preuves rapportées d'un effet du sulfate ; seules des associations mitigées étaient rapportées pour la combustion de produits pétroliers. Les indications accumulées depuis REVIHAAP confirment les effets sanitaires des particules de l'air ambiant issues de ces sources d'après des corpus larges d'études humaines, présentant un bon niveau de confiance et examinant plusieurs événements sanitaires. Les indications vont de fortes pour la combustion de charbon à modérées pour la combustion de produits pétroliers. Ces conclusions sont cohérentes avec les indications sanitaires obtenues pour certains

composés évalués individuellement : le sulfate (traceur de la combustion de charbon), le nickel et le vanadium (traceurs de la combustion de produits pétroliers). Par ailleurs, il existe une large littérature, non évaluée ici, sur la nocivité des émissions issues de la combustion de charbon, notamment pour la combustion domestique (cuisine et chauffage) à l'intérieur des habitations dans des pays en voie de développement (exposition classée cancérigène par le CIRC).

Combustion de biomasse

En 2013, REVIHAAP évoquait une association probable entre les émissions particulières de la combustion de biomasse et la santé, en se basant principalement sur des publications s'intéressant aux événements de santé durant des épisodes de feux de forêts. Les indications accumulées depuis REVIHAAP sont inadéquates et ne permettent pas de conclure à un effet sanitaire des particules issues de la combustion de biomasse dans l'air ambiant extérieur, en raison d'un corpus de taille réduite rapportant des résultats peu concluants. Le corpus évalué est restreint vraisemblablement en raison des critères de sélection des études utilisés favorisant l'inclusion des publications utilisant des méthodes statistiques de répartition des sources. Néanmoins, de nombreuses associations entre la santé et le potassium, traceur de la combustion de biomasse, ont été rapportées dans les études publiées depuis REVIHAAP. Par ailleurs, il existe une large littérature, non évaluée ici, sur la nocivité des émissions issues de la combustion de biomasse, notamment pour la combustion domestique (cuisine et chauffage) à l'intérieur des habitations dans des pays en voie de développement (exposition classée cancérigène par le CIRC).

Industrie

En 2013, REVIHAAP rapportait des associations entre la catégorie de sources « industrie » et la santé, mais ne concluait pas à un niveau de preuve en raison de l'hétérogénéité de cette catégorie, pouvant inclure une source dominante, un mélange de sources, ou diverses sources de combustion. Les indications accumulées depuis REVIHAAP, d'inadéquates à faibles selon le type d'industrie, ne permettent pas de conclure fermement à un effet sanitaire des émissions particulières de sources industrielles, en raison de corpus d'études présentant un niveau de confiance insuffisant ou rapportant des résultats peu concluants. De plus, l'hétérogénéité des définitions de la source « industrie » dans les différentes publications évaluées rend difficile l'interprétation et la comparaison des résultats. Néanmoins, les effets sanitaires potentiels de cette catégorie de sources sont cohérents avec les indications obtenues pour la combustion de charbon et de produits pétroliers ainsi que pour certains métaux évalués individuellement (nickel et vanadium). Par ailleurs, il existe une large littérature, non évaluée ici, sur les effets néfastes pour la santé humaine de contaminations environnementales par des sites industriels (ex : OMS Europe, 2014).

Sites de déchets dangereux

En 2013, REVIHAAP évoquait deux publications ne rapportant pas d'association claire entre la proximité résidentielle à des sites de stockage de déchets dangereux et la santé périnatale. Les indications accumulées depuis REVIHAAP sont inadéquates et ne permettent pas de conclure à un effet sanitaire de cette catégorie de source, en raison d'un corpus composé d'une unique publication rapportant de résultats peu concluants pour de nombreux événements de santé. Le corpus évalué est réduit vraisemblablement en raison des critères de sélection des études favorisant les publications utilisant des méthodes statistiques de répartition des sources.

Agriculture

En 2013, REVIHAAP n'évoquait pas les effets sanitaires des particules de l'air ambiant extérieur issues de l'agriculture. Les nouvelles indications accumulées depuis REVIHAAP sont inexistantes (études chez l'Homme) ou inadéquates (études d'expérimentation animale), ce qui

ne permet pas de conclure à un effet sanitaire des particules issues de cette catégorie de source. Le corpus évalué est réduit vraisemblablement en raison des critères de sélection des études favorisant les publications utilisant des méthodes statistiques de répartition des sources (dans ces publications, l'application de ces méthodes n'identifiait pas de source agricole). Par ailleurs, il existe une large littérature, non évaluée ici, examinant les effets sur la santé de l'exposition professionnelle aux pesticides.

Poussières de désert

En 2013, REVIHAAP évoquait une augmentation de la fréquence des événements sanitaires néfastes pendant des épisodes de pollution de l'air ambiant par des poussières en provenance de déserts. Les indications accumulées depuis REVIHAAP sont modérées et confirment l'effet sanitaire des poussières de désert, notamment sur la santé respiratoire de l'enfant, sur la base d'un corpus de taille réduite, mais présentant un bon niveau de confiance.

Sels et embruns marins

En 2013, REVIHAAP rapportait des associations mitigées entre les sels et embruns marins et la santé et suggérait même une absence d'effet sanitaire. Les indications accumulées depuis REVIHAAP ne permettent pas de conclure à un effet sanitaire des sels et embruns marins, ce qui soutiendrait l'indication d'absence d'effet sur la santé, sur la base d'un corpus large d'études humaines.

4 ÉMISSIONS DU TRAFIC ROUTIER – MÉTHODE ET SYNTHÈSE DES TRAVAUX DU GT

4.1 MÉTHODE

Des simulations ont été réalisées afin d'évaluer l'impact de plusieurs scénarios d'évolution technologique du parc automobile, sur les émissions et la qualité de l'air en Île-de-France et plus généralement 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-France⁷ et sur le territoire national (France métropolitaine) a été développée et mise en œuvre en considérant différents scénarios d'évolution de la composition du parc automobile (Figure 2).

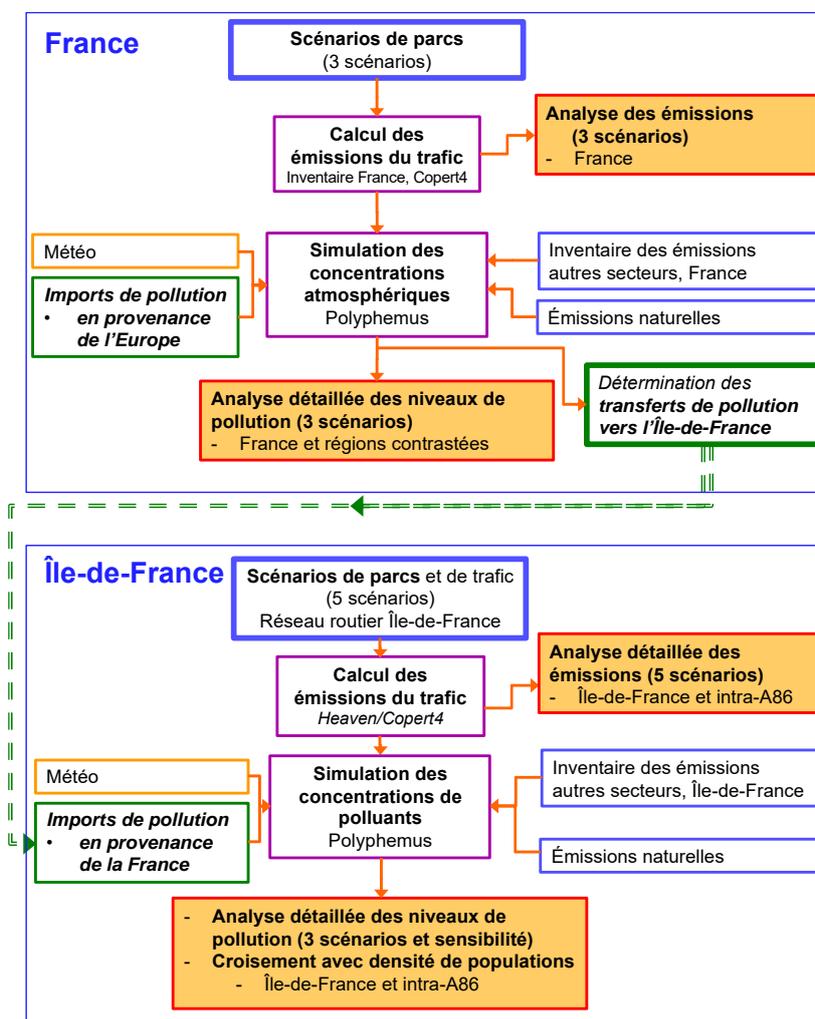


Figure 2 : Schéma de simulation des émissions et concentrations de polluants pour la France (en haut) et pour l'Île-de-France (en bas)

⁷ 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.

Cette approche combine des outils existants : plate-forme Heaven d'Airparif et inventaire national du CITEPA pour le calcul des émissions de polluants du trafic en Île-de-France et en France (méthodologie européenne COPERT4) ; plate-forme Polyphemus de simulation des concentrations atmosphériques pour l'échelle régionale. Elle a également mobilisé de nombreuses données : trafic modélisé sur l'ensemble du territoire Île-de-France, données météorologiques, inventaires Île-de-France, France et Europe des émissions de polluants des différents secteurs d'activités, etc. Globalement, la démarche prend en compte les émissions de polluants anthropiques et naturelles, et les imports d'émissions des échelles supérieures (Europe vers France, France vers Île-de-France, cf. Figure 1). Elle intègre les interactions physicochimiques connues entre les polluants.

Les scénarios d'évolution technologique des compositions du parc automobile ont été élaborés à partir des compositions actuelles du parc (Île-de-France et nationale, situation de référence, année 2014 - pour laquelle des données détaillées de parc, trafic et inventaires d'émission 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 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 les hypothèses de ces scénarios et donne quelques caractéristiques des compositions de parc qui en résultent (véhicules légers en Île-de-France).

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 <hr/> <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

La Figure 3 illustre les compositions moyennes de parc de l'Île-de-France 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.

Plusieurs 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 de trafic (sauf pour le scénario Ambition Air) et les conditions de circulation.

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 des concentrations 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 atmosphérique et des enjeux.

Ces travaux par simulation ont été complétés par l'analyse rétrospective de l'évolution des émissions et concentrations de polluants en France et en Île-de-France, et par la synthèse d'études d'impacts (plan de déplacement urbain et zones de circulation restreinte en Île-de-France).

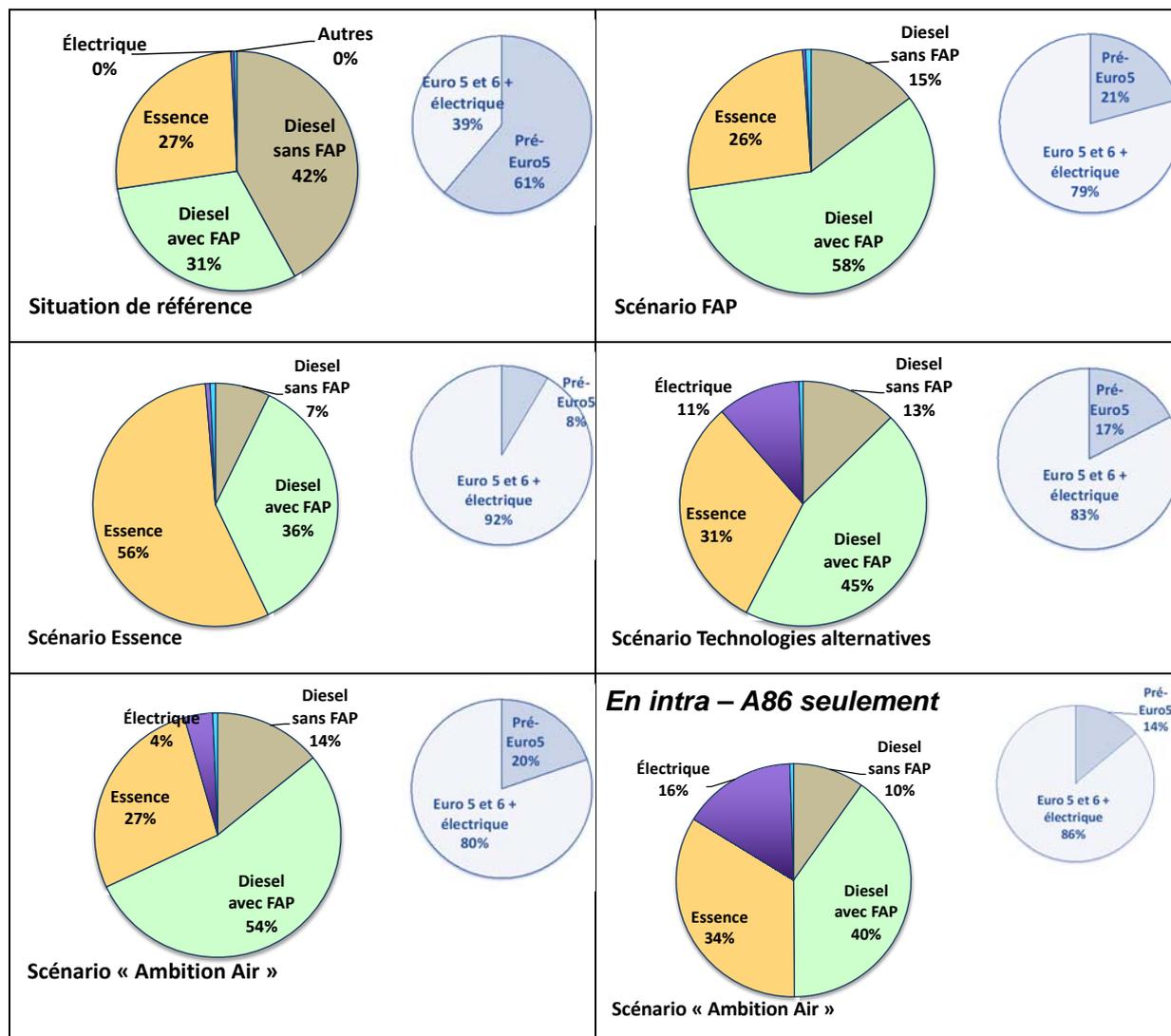


Figure 3 : Comparaisons des compositions du parc roulant en Île-de-France (en % des véhicules x km) selon les scénarios - distribution selon les motorisations et les réglementations en émissions (pré-Euro-5 et véhicules récents ou électriques), pour les véhicules légers (voitures + véhicules utilitaires légers)

Les polluants pris en compte dans les simulations sont :

- à l'émission des sources : les polluants particuliers déclinés en masse et par classes de taille (PM₁₀, PM_{2,5}, PM_{1,0})⁸, en nombre de particules (PN) et selon leur nature (carbone suie ou Black Carbon BC, matière organique OM), les polluants gazeux (oxydes d'azote NO_x et dioxyde d'azote NO₂, ammoniac NH₃, composés organiques volatils COV, monoxyde de carbone CO) qui interviennent dans la formation des aérosols secondaires et de l'ozone O₃, ainsi que le CO₂ en raison de l'enjeu climatique ;

⁸ PM₁₀, PM_{2,5}, PM_{1,0} : masse de particules de diamètre aérodynamique médian inférieur à 10 µm, 2,5 µm et 1 µm respectivement.

- dans l'atmosphère (en concentrations) : les polluants particulaires déclinés en masse et par classes de taille (PM_{2,5}, PM₁₀), en nombre de particules (PN) et selon leur nature (BC, fractions organiques et inorganiques des PM₁₀), ainsi que les polluants gazeux NO₂ et O₃.

Les travaux incluent une analyse critique de l'approche 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 composés organiques semi-volatils (COSV) illustre la sensibilité des simulations.

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.

4.2 SYNTHÈSE DES TRAVAUX DU GT

Avertissement : *Toute comparaison de ces travaux avec des études d'impacts de politiques publiques (zones de circulation restreinte, annonce de restriction ou interdiction des véhicules thermiques, etc.) est à éviter. En effet, les scénarios simulés dans la présente étude comparent 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, d'évolution des émissions en dehors du trafic automobile ou d'évolution du contexte économique. Ils permettent plutôt une étude de sensibilité de la pollution de l'air à différentes évolutions technologiques du parc automobile roulant, et non une étude prospective de la pollution de l'air en lien avec les politiques publiques.*

1. Émissions de polluants (quantités annuelles, t/an)

Le trafic routier représente actuellement un enjeu important en NO_x, BC, OM, PM_{2,5} et PM₁₀ 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 aux émissions de polluants et identifient les principaux enjeux :

- Ainsi, la contribution du trafic routier aux émissions de polluants totales (tous secteurs) en Île-de-France est forte pour les oxydes d'azotes NO_x (58 %), plus modérée pour les particules PM₁₀, PM_{2,5} (20-25 %), mais forte pour le carbone suie ou Black Carbon BC (54 %) et la matière organique OM (37 %) ; elle est relativement limitée pour les composés organiques volatils 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 que 8 % du trafic, sont fortement émetteurs de COV (45 %), avec les voitures essence (41 %) (Figure 4).

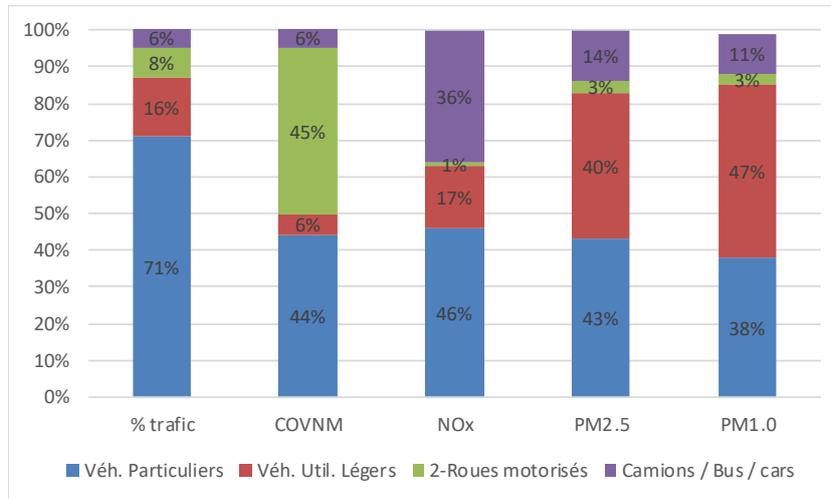


Figure 4 : Répartition selon les catégories de véhicules, du trafic (% des véhicules x km annuels) et de ses émissions de polluants (% des quantités massiques annuelles) – Scénario de référence, Ile-de-France

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 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 deux-roues permettent des réductions encore 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 (Figure 5). Ainsi, en Île-de-France, la généralisation du filtre à particules sur les véhicules Diesel (scénario FAP) diminue les émissions du trafic : de -60 % pour les particules liées à la combustion (PM_{1,0}, BC, PN), de -40 % pour les PM_{2,5} et de -30 % pour les PM₁₀ compte tenu des émissions de l'abrasion (pneus, freins, route) qui ne diminuent pas, tandis que l'évolution réglementaire concomitante contribue à une réduction de -30 % des COV, -50 % pour NOx et NO₂, -36 % de NH₃.

Vis-à-vis du changement climatique, il est noté une baisse de -10 % des émissions de CO₂ du trafic routier 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.

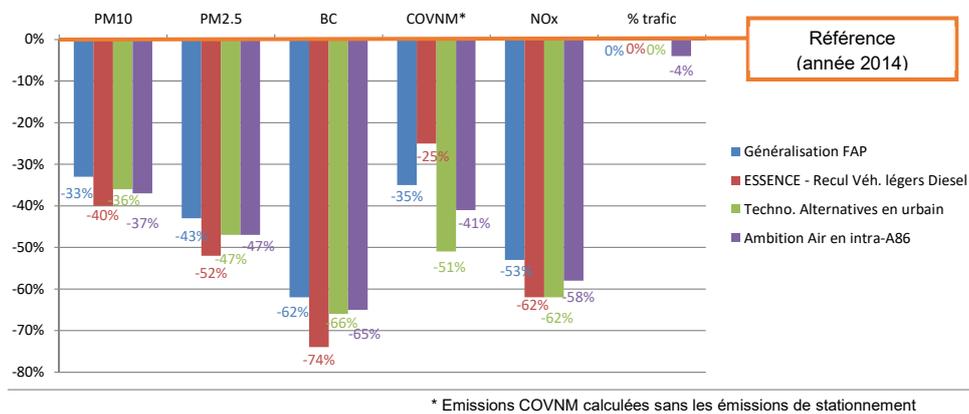


Figure 5 : Émissions annuelles du trafic (t/an) de PM₁₀, PM_{2,5}, BC, COVNM, NOx et trafic (véhicules.km) : Différences relatives (en %) entre les scénarios prospectifs et le scénario de référence (axe horizontal), Ile-de-France

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 (Figure 6). 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 échelle de la région Île-de-France.

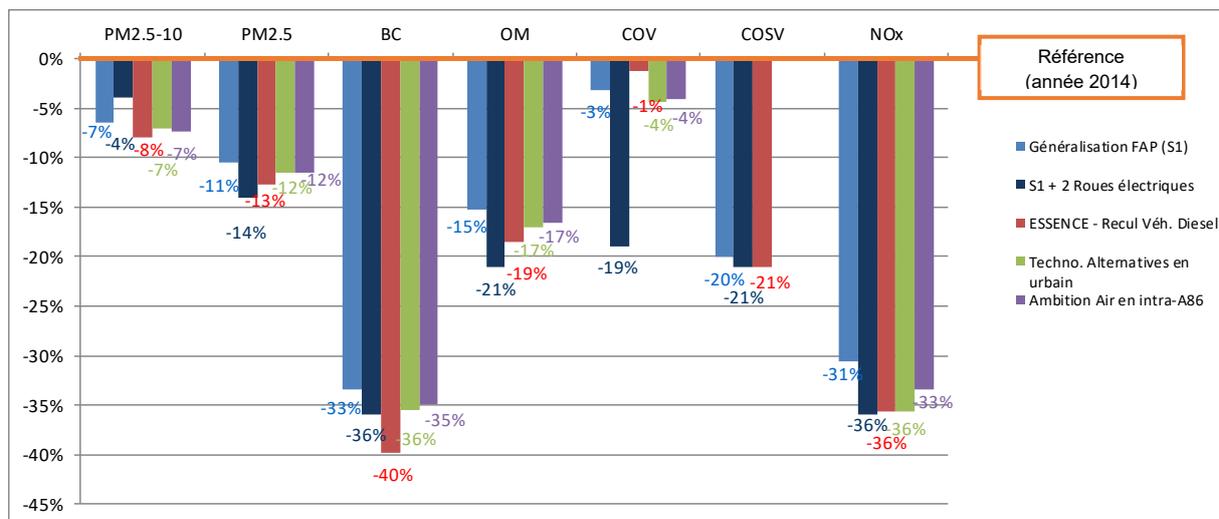


Figure 6 : Comparaison des émissions annuelles totales tous secteurs d'activité de PM_{2,5-10}, PM_{2,5}, BC, OM, COV, COSV et NOx en Ile-de-France : Différences relatives (en %) entre les scénarios prospectifs et le scénario de référence.

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 (Figure 7) :

- 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.

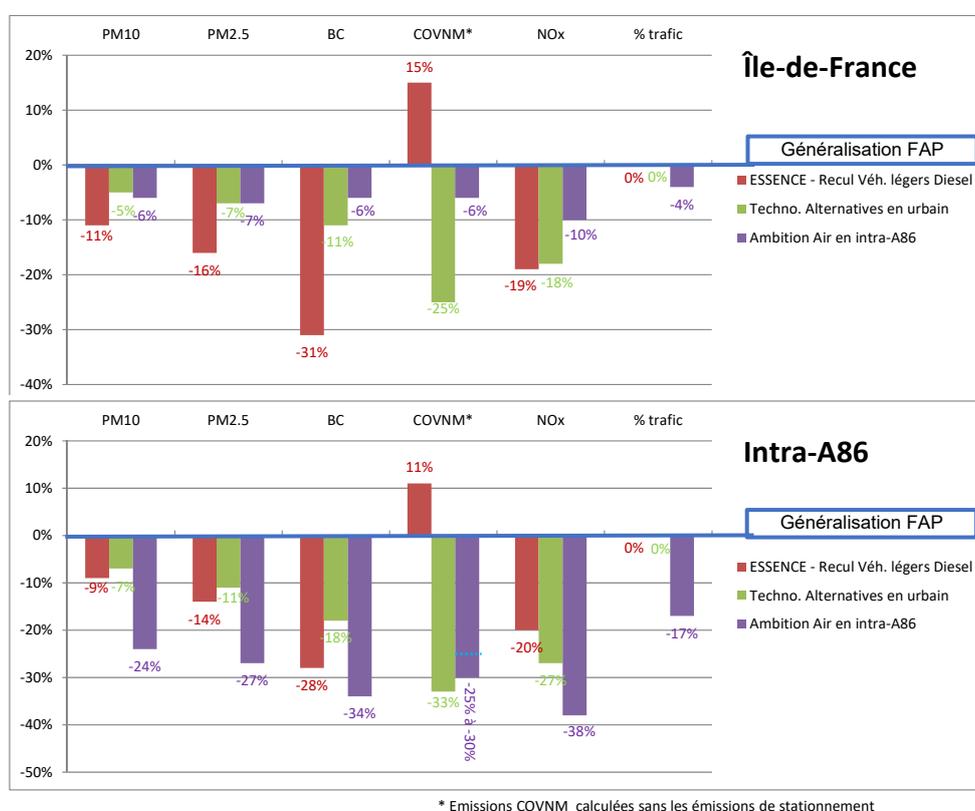


Figure 7 : Comparaison du trafic et de ses émissions annuelles de PM₁₀, PM_{2,5}, BC, COVNM, NOx : Différences relatives (en %) entre les scénarios prospectifs et le scénario au fil de l'eau FAP (S1), Île-de-France (haut) et intra-A86 (bas)

2. 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 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.

Les écarts entre les scénarios prospectifs eux-mêmes sont faibles car les écarts d'émissions entre les technologies sont atténués à l'horizon 2025 :

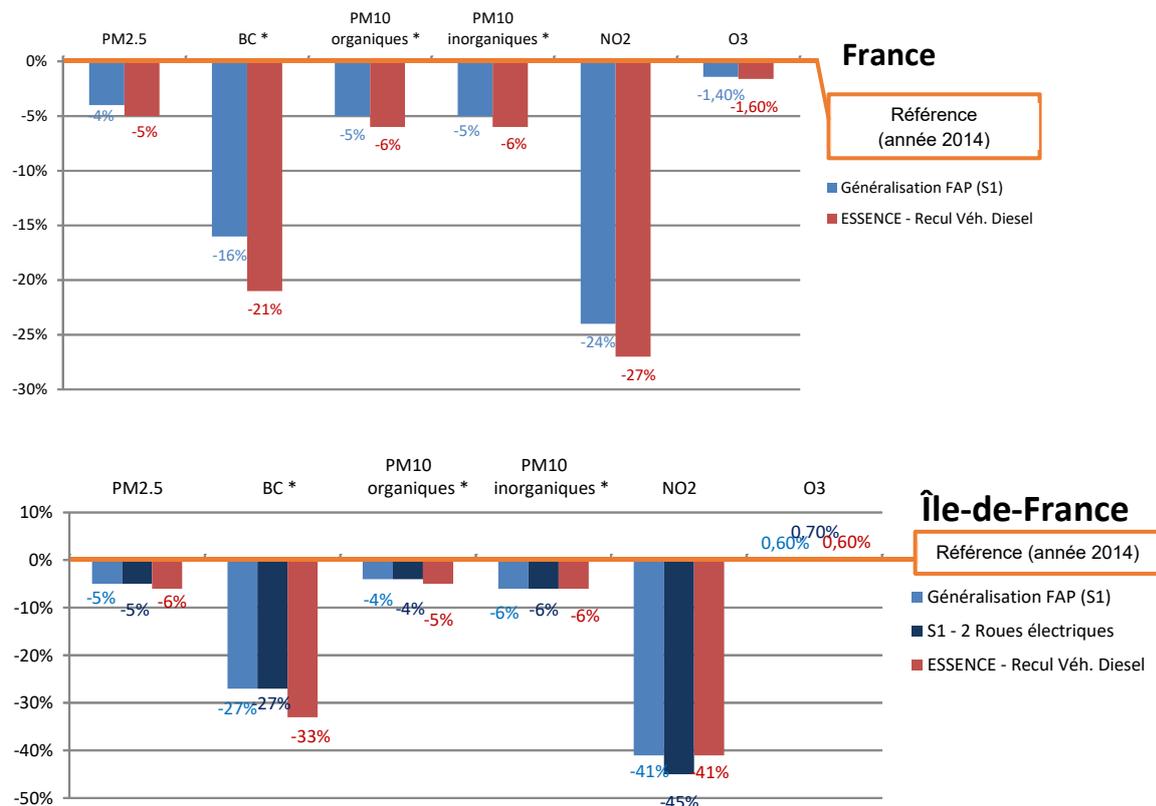
- Ainsi sur l'Île-de-France, la réduction forte des émissions de NO_x (-39 % pour le scénario Essence-S2 et -35 % pour le scénario FAP-S1) et la diminution de COV (-5 %) entraînent une baisse importante des concentrations moyennes annuelles de NO₂ (avec des variations spatiales importantes allant de -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. 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).

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}, la fraction organique et inorganique des particules, les COV et les COSV⁹.
- Les diminutions des concentrations atmosphériques de NO₂ (environ -40 % et -25 % en moyenne annuelle sur l'Île-de-France et la France) et de carbone suie 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). NO₂ et 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.

⁹ 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.

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).



* 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 8 : Comparaison des concentrations moyennes annuelles (µg/m³) de PM_{2,5}, BC, PM₁₀ organiques, PM₁₀ inorganiques, NO₂ et O₃ : Différences relatives (en %) entre les scénarios prospectifs et le scénario de référence, France (en haut) et Ile-de-France (en bas)

Les concentrations de polluants atmosphériques élevées (pics) sont plus fortement réduites que les concentrations moyennes annuelles.

La diminution des fortes concentrations de polluants atmosphériques par les scénarios 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 de réduire 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). Par contre le nombre de dépassements de la valeur guide annuelle 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 secondaires¹⁰ comme l'O₃, et 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 COV¹¹. 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) (Figure 9). 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).

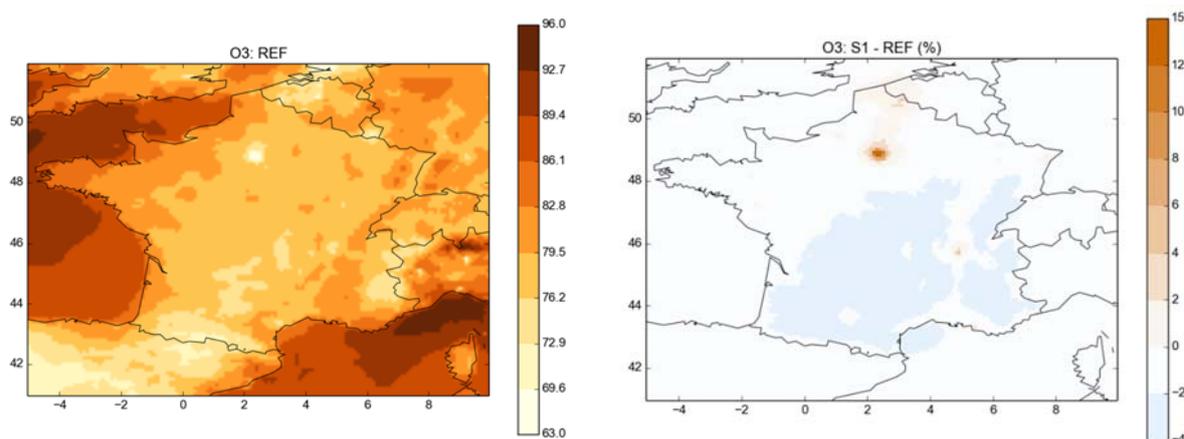


Figure 9 : Concentrations d'ozone O₃ en France :

- Concentrations moyennes annuelles (en µg/m³) en situation de référence (à gauche),
- Différences relatives des concentrations (en %) entre le scénario FAP (S1) et la situation de référence (à droite)

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) (Figure 10). La différence est plus marquée pour les particules primaires du trafic (BC) que

¹⁰ Un polluant secondaire n'est pas émis directement mais se forme lorsque d'autres polluants (polluants primaires) réagissent dans l'atmosphère (http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/opinions_layman/fr/pollution-air-interieur/glossaire/pgrs/polluants-primaires-et-secondaires.htm).

¹¹ 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 particules incluant des composés secondaires ($PM_{2,5}$, fractions organiques et inorganiques). La différence est également marquée pour le NO_2 .

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) (Figure 3 et Tableau 3). Ce renouvellement accéléré du parc contribue ainsi au bénéfice du scénario Essence (S2) bien que minoritairement (20 % et 40 % de la réduction d'émission en $PM_{2,5}$ et BC respectivement).

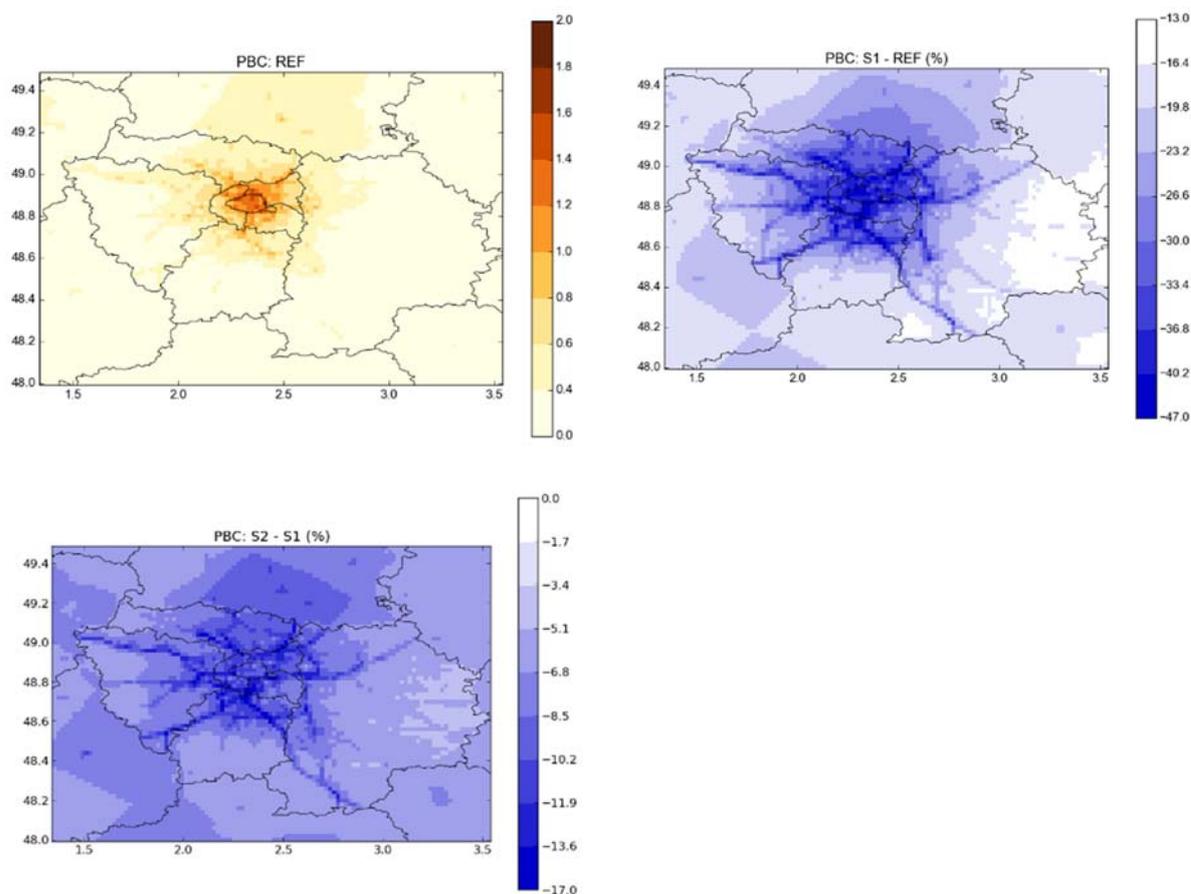


Figure 10 : Concentrations de BC en Île-de-France

- **Concentrations moyennes annuelles (en $\mu g/m^3$) du scénario de référence (en haut à gauche).**
- **Différences relatives des concentrations (en %) entre le scénario FAP et celui de référence (en haut à droite), et entre le scénario Essence (S2) et le scénario FAP (S1) (en bas à gauche)**

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 particules¹² induite par les scénarios prospectifs entraîne une baisse des concentrations de particules organiques et inorganiques, même en zones urbaines 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 (Figure 11) ; cette baisse est due à la diminution des oxydants à proximité des forêts et à la diminution des émissions de précurseurs en zones urbaines 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.

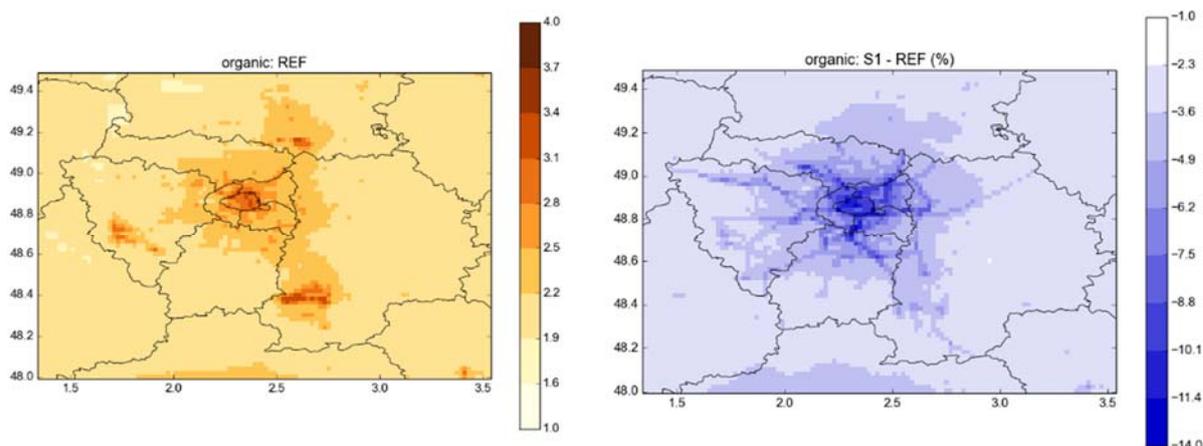


Figure 11 : Concentrations de la fraction organique particulaire en Île-de-France :

- Concentrations moyennes annuelles ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) du Scénario de référence (à gauche).
- Différences relatives des concentrations (en %) entre le scénario FAP (S1) et la situation de référence (à droite)

3. Exposition de la population

Le croisement des concentrations de polluants avec les densités de population – 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 (PM_{10} et NO_2) simulées et de la densité de population résidente permet d'estimer un impact potentiel sur l'exposition à la pollution par maille de 1 km^2 sur l'Île-de-France.

¹² NO_2 , polluant plutôt lié aux motorisations Diesel, COV liés aux motorisations essence, notamment les deux-roues motorisés, COSV liés aux motorisations Diesel et essence.

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. Une diminution maximale d'au moins 2 µg/m³ est atteinte pour 0,4 % de la population avec le scénario FAP (S1) et pour 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).

4. Analyse rétrospective

Les résultats des simulations montrent des évolutions cohérentes avec les observations rétrospectives en France et 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 (Figure 12).

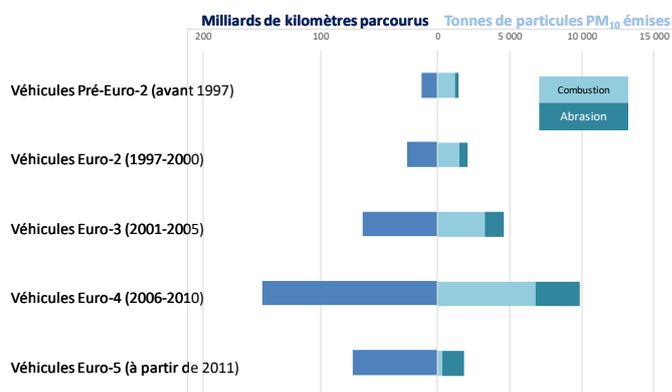


Figure 12 : Émissions de PM₁₀ et kilomètres parcourus selon les normes Euro pour les véhicules particuliers Diesel (estimation du parc national 2013 du CITEPA ; CITEPA-OMINEA 2016)

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 (Figure 13). Cette évolution concerne cependant les particules PM₁₀ principalement.

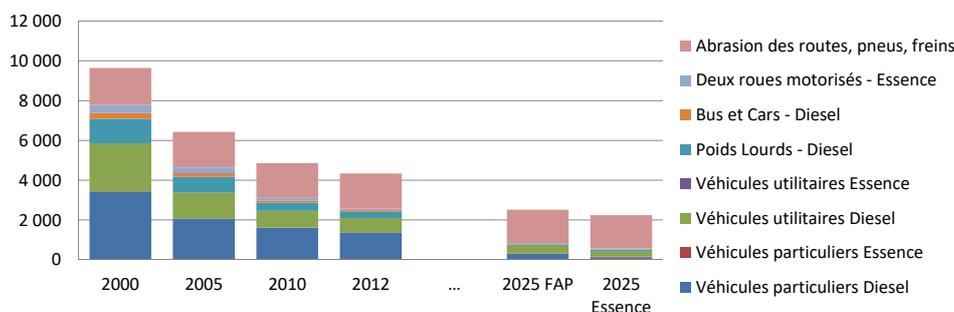


Figure 13 : Évolution des émissions annuelles (t/an) de particules PM₁₀ du trafic routier – Scénarios prospectifs vs émissions 2000-2012, Ile-de-France.

Globalement, les baisses d'émission se traduisent 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, 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 2016 (MTES, 2016).

5. Synthèse des résultats

En réponse à la question B de la saisine (p.3), sont résumés dans les Tableau 4 et Tableau 5 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 particuliers 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 4) et des concentrations atmosphériques (Tableau 5).

Tableau 4 : 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 5 : 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.

5 ÉMISSIONS DU TRAFIC ROUTIER - CONCLUSIONS DU CES « AIR » et du GT « Particules »

Les conclusions sont présentées ci-après en distinguant :

- d'une part ce qui relève des résultats stricts issus des simulations et de leur analyse ;
- et d'autre part, ce qui relève d'une mise en perspective de ces résultats dans un contexte plus général où les évolutions et les enjeux ne se limitent pas à l'impact des technologies automobiles sur la pollution de l'air (*texte décalé en italique*) ; ces éléments de conclusions ou de recommandations associés sont donc basés sur une élicitation des dires d'experts par auto-analyse à la lumière des scénarios étudiés et de la connaissance de leurs limites.

Importance relative du trafic et des différentes catégories de véhicules sur l'émission de polluants dans l'air ambiant

Le trafic routier est le principal émetteur dans l'air ambiant de certains polluants comme le carbone suie ou black carbon (BC), la matière organique (OM) et les oxydes d'azote (NOx) en zone urbaine. Il produit également une part importante des PM_{2,5} et PM₁₀ et de leurs précurseurs gazeux, et contribue de ce fait assez fortement à la pollution urbaine. Au sein du trafic, les voitures particulières sont globalement prédominantes, mais chacune des autres catégories de véhicules peut s'avérer importante en regard de certains polluants.

Baisse des émissions simulées dans les différents scénarios

La simulation des émissions et concentrations de polluants dans l'air ambiant en Île-de-France et la France, à l'horizon 2025 et en scénario quasi au fil de l'eau, montre que les émissions du trafic décroissent fortement (-30 % à -60 %), du fait de l'évolution de la réglementation des émissions applicables aux véhicules (normes Euro), l'amélioration des technologies de dépollution - notamment la quasi-généralisation du filtre à particules sur les véhicules Diesel – et le renouvellement progressif du parc. Un scénario de promotion des motorisations essence (56 % du trafic des véhicules légers contre 27 % dans la situation de référence et le scénario FAP (S1)) se traduirait par un renouvellement accéléré du parc automobile et des réductions supplémentaires d'émission de particules et de NOx, mais aussi par une réduction moindre des rejets de COV et NH₃.

Baisse des concentrations simulées dans les différents scénarios

À contexte constant (démographie, trafic, émissions des autres secteurs que le transport), les réductions d'émissions du trafic simulées par les scénarios d'évolution technologiques se traduisent par :

- une baisse des concentrations moyennes annuelles (importante pour BC et NO₂) ;
- une diminution des nombres d'épisodes de concentrations élevées (sauf pour l'ozone O₃ en milieu urbain), sans toutefois permettre d'atteindre le respect des valeurs guides annuelles de l'OMS en PM_{2,5} ;
- une augmentation possible mais limitée d'O₃ en zones urbaines.

Dans une perspective d'évolution réaliste (incluant des variations probables d'autres paramètres), cette amélioration de la qualité de l'air serait cependant atténuée par l'augmentation du trafic et d'autres activités polluantes en zone urbaine ou périurbaine,

en lien avec l'urbanisation, si de nouveaux types de mobilité ne sont pas favorisés (autopartage, covoiturage, modes actifs...) en complément du renforcement des réseaux de transport en commun. À l'inverse, elle peut être amplifiée par une baisse des émissions des autres secteurs d'activités (chauffage, industrie, etc.) qui font également l'objet d'améliorations techniques et par différentes mesures ou politiques locales en faveur de la qualité de l'air, ainsi que par la diminution des imports de pollution dès lors que le contexte global est favorable à la réduction des émissions anthropiques. Ces différents aspects ainsi que l'évolution du climat et de la démographie n'ont pas été pris en compte dans ce cadre et doivent être considérés.

L'évolution technologique sans modification du trafic, risque donc d'être insuffisante pour améliorer durablement la qualité de l'air dans les agglomérations.

Il est à noter que les améliorations plus limitées observées pour les concentrations de PM_{2,5} et PM₁₀ sont liées :

- à la contribution élevée d'autres secteurs (combustion liée au chauffage et agriculture en Île-de-France). Des politiques coordonnées en faveur d'une amélioration de la qualité de l'air doivent donc être privilégiées ;
- au maintien des émissions du trafic par abrasion (pneus, freins, chaussée). Ces dernières pourraient diminuer grâce à l'amélioration des systèmes de freinage et à l'évolution réglementaire ;
- à l'augmentation des concentrations d'oxydants en zone urbaine qui favorisent la formation de particules secondaires.

Scénarios technologiques et autres leviers de réduction de la pollution du trafic

Entre l'évolution au fil de l'eau avec généralisation du filtre à particules et le scénario intégrant un recul des véhicules légers Diesel au profit des véhicules essence, les écarts seraient finalement assez limités au regard de ceux observés entre 2014 et 2025.

Un avantage faible (et de ce fait incertain) serait observé avec le scénario Essence (S2) en ce qui concerne la pollution particulaire et les concentrations de NO₂ et ce pour différentes raisons :

- d'une part, pour les particules, cet avantage est en partie dû à une plus forte baisse des précurseurs gazeux dont le NO₂, et cela malgré une augmentation des concentrations d'O₃ en urbain ;
- d'autre part, une partie des bénéfices du scénario Essence (S2) en comparaison du scénario FAP (S1) est liée au renouvellement accéléré du parc (qui se traduit par une proportion plus faible de véhicules légers Diesel sans FAP et une proportion plus forte de véhicules récents Euro 5 et 6), en raison de l'évolution forte de la répartition essence - Diesel sur une période relativement courte.

Indépendamment des options technologiques, le renouvellement « accéléré » du parc (par différentes incitations, mesures de restriction, etc.) apparaît donc comme un levier potentiel d'amélioration de la qualité de l'air, en complément de l'amélioration technologique des véhicules et de l'évolution réglementaire. Les effets secondaires du renouvellement (surcoûts économiques et environnementaux de la construction et destruction de véhicules, utilisation accrue des véhicules récents, iniquités éventuelles des mesures incitatives et raréfaction des véhicules d'occasion, etc.) doivent cependant être considérés.

Mais les simulations des émissions révèlent surtout le potentiel de la promotion de motorisations non polluantes à l'échappement (électriques) et plus encore d'une

diminution ambitieuse du trafic en zones denses, contribuant d'une part à une réduction supplémentaire des émissions et anticipant d'autre part une réduction de l'exposition des personnes et de la pollution de proximité.

Les options technologiques, de même que le renouvellement accéléré du parc doivent ainsi être mises en regard d'autres mesures comme la maîtrise du trafic (zones à faibles émissions, péages urbains, etc.), la promotion des transports en commun, de l'intermodalité, des modes actifs, de l'autopartage, du covoiturage et des logistiques marchandises (e-commerce, livraison du dernier kilomètre, plates-formes logistiques urbaines), porteurs de bénéfices en qualité de l'air par la réduction éventuelle de la contribution du trafic. L'efficacité réelle de ces différentes mesures reste cependant à évaluer.

Les orientations et mesures visant à améliorer la qualité de l'air en France dans les domaines du transport routier et de la mobilité (plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques, Assises nationales de la mobilité) et les lignes directrices pour le développement de « systèmes de transports durables » (travaux internationaux OCDE, CEE-ONU, OMS-Europe) peuvent constituer un cadre intéressant d'analyse.

Les mesures d'amélioration de la qualité de l'air peuvent être sources de co-bénéfices tels que la réduction des nuisances sonores ou de la durée des trajets domicile-travail. Plus généralement, les mesures spécifiques aux mobilités doivent s'inscrire dans une gouvernance plus large de la ville, intégrant l'urbanisme, les transports, la santé, la qualité de l'air, de l'environnement et du cadre de vie.

L'évaluation objective de l'efficacité des mesures reste cependant très complexe et à ce jour insuffisamment documentée, et nécessite également de dépasser le cadre strict de la pollution. Ainsi, les motorisations électriques, l'hydrogène, etc., qui peuvent être des solutions efficaces pour réduire la pollution locale et les émissions de gaz à effet de serre sous certaines conditions, doivent être évaluées en tenant compte d'implications multiples (disponibilité et sources de l'énergie, matériaux, impacts environnementaux induits, etc.). Le transport « tout-électrique » à l'horizon 2025 ou même 2040 apparaîtrait alors sans doute assez peu réaliste.

Évolutions des enjeux

Les travaux ont montré la contribution déterminante du trafic routier dans la pollution de l'air ambiant en milieu urbain. Plusieurs évolutions peuvent être anticipées et sont discutées ci-dessous.

- *L'urbanisation et le développement des zones péri-urbaines (même sans extension urbaine) contribuent à l'augmentation des besoins de mobilité et à la dépendance automobile : la maîtrise du trafic, la promotion des transports en commun et des modes actifs, le co-voiturage domicile-travail semblent indispensables pour contenir les augmentations d'émissions qui pourraient en résulter.*
- *Le développement d'une logistique urbaine reposant sur les véhicules utilitaires légers (au détriment des véhicules lourds) pourrait accroître considérablement le trafic et les émissions de polluants : leur contribution déjà forte aux émissions de polluants devrait cependant s'atténuer par le rattrapage réglementaire (exigences plus proches de celles des voitures) et par le renouvellement assez rapide du parc de véhicules professionnels. Une moindre diésélisation et une évolution vers le gaz naturel pour véhicules (GNV) sont également attendues. Finalement, en raison du transfert important de véhicules utilitaires légers d'occasion vers le parc des voitures, les*

politiques incitatives sur les véhicules utilitaires légers (VUL) peuvent s'avérer stratégiques quant à l'évolution globale du parc.

- *Le trafic des deux-roues motorisés augmente déjà considérablement dans certaines agglomérations congestionnées. Leur contribution élevée en COV devrait décroître avec l'évolution réglementaire et la promotion de deux-roues électriques.*
- *La baisse des émissions réelles du trafic est généralement plus faible que celle attendue avec l'évolution réglementaire, réduisant ainsi l'amélioration de la qualité de l'air. L'attention au respect des procédures d'homologation et de contrôle, suscitée par les scandales récents, semble devoir limiter ce risque pour l'avenir. Le démontage ou la désactivation des systèmes dépolluants, ou encore leur dysfonctionnement et la dégradation des émissions avec l'âge du véhicule, devraient également décroître par la sophistication des technologies de dépollution des véhicules et le renforcement du volet pollution du contrôle technique. De nouvelles techniques de mesure des émissions (systèmes portatifs embarqués PEMS, mesures in situ), d'identification des véhicules et d'encouragement à l'éco-conduite (vignettes Crit'Air, vignettes connectées) devraient contribuer également à améliorer la connaissance et la maîtrise des émissions du trafic.*
- *De nouvelles formes de mobilité (autopartage, co-voiturage, véhicules autonomes) et de logistiques marchandises (e-commerce, livraison du dernier kilomètre, plates-formes logistiques urbaines) devraient impacter le trafic, les parcs automobiles et les émissions de polluants, sans qu'il soit possible à ce jour d'en évaluer l'ampleur.*
- *Concernant les émissions particulières à l'échappement des technologies automobiles aujourd'hui mises sur le marché, l'écart est à présent faible entre les quantités de carbone suie émises par un véhicule Diesel et celles émises par un véhicule essence. Néanmoins, la question de la différence en émissions de gaz précurseurs d'aérosols secondaires organiques (COSV - Composés Organiques Semi-Volatils) et inorganiques (NO₂, NH₃, etc.) est encore ouverte.*
- *Concernant les émissions particulières hors échappement des technologies automobiles, ces dernières pourraient diminuer grâce à l'amélioration des technologies et à l'évolution réglementaire, mais elles restent essentiellement liées aux volumes de trafic et non aux technologies. La substitution de véhicules à moteurs thermiques par des véhicules équivalents à motorisation électrique ou hybride plus lourds ne garantirait pas une diminution des émissions hors échappement de PM_{2,5} et PM₁₀ car leur poids plus élevé accentuerait les émissions de particules liées au contact pneu – chaussée et à la remise en suspension (Victor et al, 2016).*

Incertitudes et limites

Les travaux de simulation selon les différents scénarios présentés sont affectés d'incertitudes (émissions, technologies de dépollution récentes, précurseurs des particules secondaires, distribution spatio-temporelle du trafic et des autres sources polluantes, etc.). Les évolutions prospectives sont par nature incertaines, en raison de la fragilité de certaines hypothèses des scénarios, et ne tiennent pas compte de nombreux aspects (évolution de la population, des comportements et modes de vie, etc.). Les résultats ne présagent pas de l'importance de sources de pollution locales de l'air ambiant. Ils offrent toutefois un cadre d'analyse de l'évolution de la qualité de l'air permettant d'identifier des enjeux et de comparer différents scénarios par l'explicitation des mécanismes de la pollution.

La disponibilité de données et d'observations de grande qualité (mobilités, trafic, connaissance des émissions, etc.) est fondamentale dans ce processus.

En résumé :

Le trafic routier est l'un des principaux contributeurs de la pollution urbaine, par ses émissions de composés particulaires et de précurseurs gazeux.

Avec l'évolution réglementaire et l'amélioration des technologies de dépollution, les émissions du trafic décroissent fortement à un horizon d'une dizaine d'années, induisant également - à contexte constant - une baisse plus modérée des concentrations moyennes annuelles et des épisodes de concentrations élevées, et une augmentation possible mais limitée des concentrations d'ozone en zones urbaines. La seule évolution technologique s'avère donc insuffisante pour améliorer durablement la qualité de l'air dans les agglomérations.

La comparaison de scénarios technologiques montre un avantage faible et incertain à la promotion des motorisations essence par rapport à la généralisation attendue des filtres à particules Diesel, par la baisse des émissions particulaires et de précurseurs comme le NO₂ et par un effet accélérateur du renouvellement du parc.

Dans un contexte en évolution (augmentation de l'urbanisation et des besoins de mobilité, du nombre de véhicules utilitaires légers et des deux-roues motorisés, nouvelles réglementations, nouvelles formes de mobilité, etc.) des bénéfices plus marqués doivent être recherchés par la diminution du trafic polluant en zones densément peuplées et en articulation avec d'autres mesures de maîtrise du trafic, de promotion des transports en commun et des modes actifs, etc. Un cadre d'évaluation de l'efficacité de ces différentes mesures est indispensable. Il peut reposer sur la simulation, mais nécessite la spécification de scénarios prospectifs intégrant les principales évolutions démographique, climatique, énergétique et des différents secteurs d'activité (résidentiels, agriculture, etc.) dont le trafic.

6 RECOMMANDATIONS DU CES « AIR » et du GT « Particules »

Les recommandations de ces travaux sur les volets A et B de la saisine s'articulent en deux champs : politiques publiques et travaux de recherche et d'évaluation pour l'aide à la décision.

6.1 Recommandations relatives aux effets sanitaires des particules de l'air ambiant extérieur selon les composés, les sources et la granulométrie

1/ Politiques publiques

i) Les composés des particules de l'air ambiant extérieur

Au regard des indications d'effets néfastes sur la santé mises en évidence pour les composés particuliers sous-mentionnés, le GT et le CES recommandent, dans le cadre des politiques de surveillance de la qualité de l'air ambiant et de réduction des émissions de polluants atmosphériques, de considérer prioritairement les composés particuliers suivants :

- les particules ultrafines (< 100 nm, concentration en nombre),
- le carbone suie,
- et le carbone organique.

Les particules grossières ($PM_{2,5-10}$), pour lesquelles il existe des indications d'effets sur la santé, sont déjà indirectement prises en compte dans la mesure déjà réglementée des PM_{10} et des $PM_{2,5}$. Ces recommandations ne remettent pas en cause la pertinence de la mesure des $PM_{2,5}$ et des PM_{10} dans les dispositifs actuels.

Ces recommandations sur les particules ultrafines et le carbone suie renforcent celles émises sur la nécessité de compléter et de pérenniser l'acquisition de données relatives à ces deux indicateurs, dans le cadre des travaux de l'agence sur les polluants émergents dans l'air ambiant sur (Anses, 2018).

ii) Les sources des particules de l'air ambiant extérieur

Au regard des indications d'effets néfastes sur la santé mises en évidence pour les sources sous-mentionnées, le GT et le CES recommandent de poursuivre les efforts nationaux et internationaux de réduction de la pollution de l'air ambiant extérieur et/ou de l'exposition des populations en lien avec les sources suivantes :

- le trafic routier (incluant les émissions à l'échappement et les émissions hors échappement),
- la combustion de charbon,
- la combustion de produits pétroliers,
- la combustion de biomasse,
- et les poussières de désert.

Concernant la pollution particulaire issue du trafic routier, le GT et le CES soulignent l'intérêt de poursuivre les efforts de réduction de l'exposition des populations au carbone suie, à la matière organique et aux particules ultrafines émis dans l'air ambiant, considérant :

- d'une part les résultats de l'expertise collective mettant en évidence des indications fortes d'effets néfastes sur la santé liée à l'exposition au carbone suie des particules issues du trafic, au carbone organique et aux particules ultrafines,
- et d'autre part les résultats de l'expertise collective mettant en évidence des diminutions des émissions et concentrations atmosphériques de carbone suie, de matière organique et de particules ultrafines issues du trafic routier, obtenues par l'évolution de la réglementation en émissions (normes Euro), par l'amélioration des technologies de dépollution – notamment la quasi-généralisation du filtre à particules sur les véhicules Diesel – et par le renouvellement progressif du parc, sur la base des scénarios simulés de 2014 à l'horizon 2025.

Concernant la pollution particulaire par l'industrie en général, il n'a pas été possible de conclure sur les effets sanitaires pour cette catégorie de sources en raison de l'hétérogénéité des sources d'émission ou de la qualité insuffisante du corpus d'études analysées. Néanmoins, le GT et le CES soulignent que ce résultat de cotation du niveau d'indication d'effets sanitaires dans le cadre d'une expertise sur la qualité de l'air ambiant ne remet pas en cause les preuves accumulées à partir d'autres corpus de la littérature sur les effets néfastes pour la santé humaine de contaminations environnementales par des sites industriels (ex : OMS Europe, 2014) ; de même qu'elle ne remet pas en cause la surveillance et le contrôle des émissions de sources industrielles.

Enfin, en raison d'un manque de données, d'autres sources n'ont pu être évaluées dans le cadre de la présente revue de la littérature scientifique : agriculture, transport maritime, pollution aéroportuaire, sources naturelles telles que pollens et débris végétaux, érosion éolienne, éruptions volcaniques et émissions de composés organiques volatils biogéniques par les végétations (précurseurs d'aérosols organiques secondaires).

2/ Travaux d'évaluation pour l'aide à la décision et travaux de recherche

Afin de permettre d'éventuelles évaluations des risques sanitaires ou évaluations d'impact sanitaire de la pollution de l'air ambiant extérieur, le GT et le CES recommandent de dériver, ou produire au besoin, des fonctions exposition-risque pour les polluants particuliers suivants afin d'inclure ces polluants dans les évaluations :

- les particules ultrafines (< 100 nm, concentration en nombre),
- le carbone suie,
- et le carbone organique.

En termes d'amélioration des connaissances, le GT et le CES recommandent de poursuivre les efforts de la recherche sur :

- les effets sur la santé de l'exposition aux particules de l'air ambiant extérieur en incluant des « métriques » d'exposition autres que la masse des PM₁₀ et PM_{2,5}, en vue d'élaborer d'autres indicateurs de référence (fonctions exposition-risque, normes de qualité de l'air ambiant, etc.) pour la pollution particulaire,

- une définition métrologique des aérosols organiques secondaires en vue, si possible, d'une harmonisation et d'une standardisation de cette métrique d'exposition,
- le caractère prédictif du potentiel oxydant des particules de l'air ambiant extérieur en termes d'effets sur la santé, ainsi que sur la définition de cet indicateur actuellement mesuré par différents tests en condition acellulaire, en vue, si possible, d'une harmonisation et d'une standardisation de cette métrique d'exposition,
- les effets sur la santé des endotoxines de l'air ambiant extérieur,
- les effets sur la santé de la pollution de l'air ambiant extérieur par certaines sources anthropiques encore peu documentées telles que l'agriculture, le transport maritime et la pollution aéroportuaire.

6.2 Recommandations relatives à l'impact sur la pollution atmosphérique des technologies et de la composition du parc de véhicules automobiles circulant en France

1/ Politiques publiques

Le CES et le GT rappellent que plusieurs documents précisent les orientations et les mesures nationales visant à améliorer la qualité de l'air dans les domaines du transport routier et de la mobilité, tels que l'arrêté du 10 mai 2017 établissant le plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques, ainsi que la synthèse de l'atelier thématique « Mobilités plus propres » des Assises nationales de la mobilité en décembre 2017.

Cependant, le CES et le GT notent que l'évaluation objective de l'efficacité de ces mesures reste très complexe et insuffisamment documentée et nécessite la définition de méthodes d'évaluation incluant la définition de scénarios prospectifs. Par ailleurs, la mise en application de plusieurs de ces mesures par les collectivités locales implique la mise en œuvre et la pérennisation des appels à projet (par exemples les appels à projets « transports collectifs en site propre » et « transports collectifs et mobilité durable »).

En regard de l'analyse circonscrite menée dans le cadre de ces travaux d'expertise d'une part et de l'insuffisance actuelle d'informations et de méthodes qui permettraient d'évaluer l'efficacité réelle des différentes mesures d'amélioration de la qualité de l'air d'autre part, le CES et le GT soulignent la nécessité :

- d'accentuer la coordination intersectorielle des politiques en faveur de la qualité de l'air compte tenu des contributions des différents secteurs d'activité¹³ à la pollution de l'air ambiant, notamment à la pollution particulaire ;
- de considérer globalement la problématique de la pollution de l'air par le trafic routier plutôt que de raisonner en options technologiques et leur impact sur les seules émissions de polluants ;
- de prendre en compte conjointement la pollution locale et les gaz à effet de serre (GES) ;
- de considérer conjointement l'évolution technologique et réglementaire, la promotion des technologies alternatives (électromobilité), le renouvellement du parc roulant (toutes catégories de véhicules incluant les deux-roues et les véhicules utilitaires légers), mais aussi et surtout la réduction du trafic compensée par le renforcement des transports en communs et modes actifs dans les zones densément peuplées, comme leviers potentiels de réduction de la pollution atmosphérique, de la pollution de proximité et de l'exposition des populations ;
- de prendre en compte globalement les polluants contribuant à la pollution particulaire, pour l'élaboration de politiques publiques en faveur de la qualité de l'air, compte tenu de la forte dépendance des concentrations de particules aux précurseurs gazeux (NO₂ et composés organiques) ;

¹³ Selon les territoires, les contributions à la pollution particulaire des secteurs résidentiel et tertiaire, industrie, transport routier et agriculture, peuvent être prépondérantes.

- de retenir les concentrations de carbone suie (BC), de dioxyde d'azote (NO₂) et du nombre de particules (PNC) comme indicateurs d'exposition dans les études d'impacts et de surveillance de la pollution de l'air générée par le trafic routier.

2/ Travaux d'évaluation pour l'aide à la décision et travaux de recherche

En termes de simulation et de méthodes d'évaluation, le GT et le CES recommandent :

- d'étendre les travaux de simulation à d'autres composés des particules (hydrocarbures aromatiques polycycliques, métaux), à des scénarios plus radicaux (100 % essence, réductions ciblées du trafic par exemple) ou additionnels permettant d'observer la sensibilité de certains résultats (influence sur l'ozone et les aérosols secondaires), et ce en complément de diverses améliorations ponctuelles d'hypothèses ou de données d'entrée des simulations (ANSES, 2019b) ;
- de développer et mettre en œuvre les outils devant permettre – en articulation avec les différentes plates-formes de simulation de la pollution de l'air existantes – des analyses plus locales et l'étude spécifique à des résolutions spatiales plus fines de la pollution de proximité induite par les sources d'émission ;
- de développer des méthodes permettant l'analyse comparative des différentes mesures d'amélioration de la qualité de l'air – notamment celles portant sur le trafic routier – ainsi que l'évaluation prédictive de l'impact des politiques publiques ; ces méthodes doivent inclure les autres secteurs d'activité, le trafic routier et les mobilités, et tenir compte de l'évolution du contexte (ex : climat, démographie, énergies, technologies et services émergents, comportements, etc.), sous la forme de scénarios prospectifs – même simplifiés – à élaborer ;
- d'élargir les problématiques d'évaluation de la pollution de l'air et d'évaluation des mesures et politiques de réduction, en intégrant les modèles et indicateurs les plus robustes sur l'exposition des populations, l'exposition à la pollution de proximité, et sur les effets sanitaires.

En termes d'acquisition de connaissances, le GT et le CES recommandent :

- de caractériser expérimentalement les facteurs d'émission des polluants non réglementés, des précurseurs des polluants secondaires et des composés organiques semi-volatils (COSV), pour les différentes technologies de véhicules, et d'investiguer plus spécifiquement les émissions par abrasion (freins, pneus, chaussée) et la remise en suspension de particules ;
- de déployer des campagnes d'observations (trafic), et des enquêtes (mobilités), permettant de disposer de statistiques fiables comme données d'entrée des simulations (composition du parc, vitesses, données de trafic et profils d'activités des différents secteurs émetteurs de polluants, etc.) et de mieux appréhender les évolutions (comportements).

7 BIBLIOGRAPHIE

ANSES (2019a) Effets sanitaires des particules de l'air ambiant extérieur selon les composés, les sources et la granulométrie. Rapport d'expertise collective de l'Agence nationale de sécurité sanitaire alimentation, environnement, travail :

<https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2014SA0156Ra-Sante.pdf>

ANSES (2019b) Impact sur la pollution atmosphérique des technologies et de la composition du parc de véhicules automobiles circulant en France. Rapport d'expertise collective de l'Agence nationale de sécurité sanitaire alimentation, environnement, travail :

<https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2014SA0156Ra-Emission.pdf>

ANSES (2018) Polluants « émergents » dans l'air ambiant Identification, catégorisation et hiérarchisation de polluants actuellement non réglementés pour la surveillance de la qualité de l'air. Avis et rapport d'expertise collective :

<https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2015SA0216Ra.pdf>

ANSES (2017) Illustrations et actualisation des recommandations pour l'évaluation du poids des preuves et l'analyse d'incertitude à l'Anses. Avis et rapport d'expertise collective : <https://www.anses.fr/fr/system/files/AUTRE2015SA0089Ra-2.pdf>

CCFA (2017) L'industrie automobile française - Analyse et statistiques 2017. Rapport du Comité des Constructeurs Français d'Automobiles :

http://ccfa.fr/wp-content/uploads/2018/01/Analyse_Statistiques_2017_FR.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>

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>

CITEPA (2018). Rapport OMINEA – 15ème édition. Rapport du Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique.

CITEPA (2016). Rapport OMINEA – 13ème édition. Rapport du Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique.

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>

Eeftens, M., G. Hoek, O. Gruzieva, A. Molter, R. Agius, R. Beelen, B. Brunekreef, A. Custovic, J. Cyrus, E. Fuertes, J. Heinrich, B. Hoffmann, K. de Hoogh, A. Jedynska, M. Keuken, C. Klumper, I. Kooter, U. Kramer, M. Korek, G. H. Koppelman, T. A. Kuhlbusch, A. Simpson, H. A. Smit, M. Y. Tsai, M. Wang, K. Wolf, G. Pershagen, et U. Gehring (2014) Elemental composition of particulate matter and the association with lung function. *Epidemiology* 25 (5):648-57. doi: 10.1097/EDE.000000000000136

EFSA (2010) Application of systematic review methodology to food and feed safety assessments to support decision making. *EFSA Journal* 8 (6):1637. doi: 10.2903/j.efsa.2010.1637.

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>

Higgins, J. P. T., et S. Green. 2011. *Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions*: The Cochrane Collaboration.

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

Katsouyanni, K., G. Touloumi, E. Samoli, A. Gryparis, A. Le Tertre, Y. Monopoli, G. Rossi, D. Zmirou, F. Ballester, A. Boumghar, H. R. Anderson, B. Wojtyniak, A. Paldy, R. Braunstein, J. Pekkanen, C. Schindler, et J. Schwartz (2001) Confounding and effect modification in the short-term effects of ambient particles on total mortality: results from 29 European cities within the APHEA2 project. *Epidemiology* 12 (5):521-31. doi: 10.1097/00001648-200109000-00011.

MTEs (2016) Développement des véhicules propres. Synthèse du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/developpement-des-vehicules-propres>

NTP OHAT (2015) Handbook for Conducting a Literature-Based Health - Assessment Using OHAT Approach for Systematic Review and Evidence Integration. National Institute of Environmental Health Sciences, National Toxicology Program, Office of Health Assessment and Translation (OHAT). 1-98.

OMS Europe (2014). Human Health in Areas with Industrial Contamination. Rapport de l'Organisation Mondiale de la Santé Europe :

http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0006/264813/Human-Health-in-Areas-with-Industrial-Contamination-Eng.pdf?ua=1

OMS Europe (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

OMS Europe (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

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 régional de santé d'Ile-de-France :

https://www.ors-idf.org/fileadmin/DataStorageKit/ORS/Etudes/Etude_1578/Synthese_erpurs_EIS_trafic_1_.pdf

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

US EPA (2009) Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter. Rapport final de l'United States Environmental Protection Agency :

<https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=216546>

Victor R.J.H. Timmers, Peter A.J. Achten (2016) Non-exhaust PM emissions from electric vehicles. *Atmospheric Environment*, 134:10-17. doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.03.017.



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)