

EXPERTISE COLLECTIVE : SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

Relatif à « Impact des technologies de post-traitement sur les émissions de NO₂ de véhicules diesel, et aspects sanitaires associés »
Saisine Afsset n°« 2006-009 »

Ce document synthétise les travaux du groupe de travail et présente les éventuels compléments du Comité d'Experts Spécialisés (CES).

1	Contexte	2
2	Présentation de la question posée	2
3	Organisation de l'expertise	3
4	Description de la méthode	3
4.1	Influence des technologies et des normes sur les émissions d'oxydes d'azote (NO, NO ₂ et NO _x) des véhicules routiers	3
4.2	Concentrations dans l'air ambiant des oxydes d'azote (NO, NO ₂ , NO _x) liés au trafic routier	4
4.3	Aspects sanitaires liés au NO ₂ , notamment associé aux différentes technologies de post traitement des émissions diesel	4
4.4	Mise en perspective de niveaux d'exposition au NO ₂ (actuels et prospectifs) au regard de différentes valeurs de référence	5
5	Résultats et conclusions de l'expertise collective	5
5.1	Influence des technologies et des normes sur les émissions d'oxydes d'azote (NO, NO ₂ et NO _x) des véhicules routiers	5
5.2	Concentrations dans l'air ambiant des oxydes d'azote (NO, NO ₂ , NO _x) liés au trafic routier	6
5.3	Aspects sanitaires liés au NO ₂ , notamment associé aux différentes technologies de post traitement des émissions diesel	7
5.4	Mise en perspective de niveaux d'exposition au NO ₂ (actuels et prospectifs) au regard de différentes valeurs de référence	9
6	Recommandations de l'expertise collective	12
6.1	Concernant l'amélioration des connaissances	12
6.2	Prise en compte des aspects sanitaires associés aux différentes technologies de post-traitement dans les normes portant sur les émissions des moteurs diesel	12

1 Contexte

Les différentes réglementations européennes en cours d'élaboration, et notamment les réglementations Euro relatives aux émissions des véhicules particuliers et des poids lourds, fixent des limites d'émissions en particules pour les véhicules diesels. Ces limites entraîneront probablement une certaine généralisation des filtres à particules sur ces véhicules, en parallèle à l'introduction éventuelle de nouveaux modes de combustion homogène (ex : technologie type HCCI) qui pourraient permettre de réduire les émissions à la sortie du moteur et de revoir ainsi la conception de la ligne d'échappement au niveau des systèmes de post traitement.

Les filtres à particules (FAP) permettent de réduire les émissions de particules en masse et en nombre.

Or, certaines technologies disponibles sur le marché associent la catalyse d'oxydation (catalyseur d'oxydation) au FAP et à l'heure actuelle, différentes conclusions d'études européennes et californiennes indiquent que les technologies incluant un catalyseur d'oxydation entraînent une augmentation significative des émissions de NO₂ (traduite par un ratio NO₂/NO_x plus élevé) sans qu'un effet soit observable sur les émissions globales de NO_x.

2 Présentation de la question posée

L'Afsset a été saisie le 24 août 2006 par le ministère de la santé et des solidarités, le ministère de l'écologie et du développement durable et le ministère de l'emploi, de la cohésion sociale et du logement afin de procéder à une expertise relative à « l'évaluation des impacts sanitaires relatifs des émissions de particules et de dioxyde d'azote (NO₂) des véhicules diesel ».

Après une phase d'analyse de la saisine, le CES « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » a validé une approche déclinée en trois axes de travail, traitant prioritairement des oxydes d'azote au vu du contexte, et acceptée formellement le 13 mars 2007 par le ministère de la santé et des solidarités, le ministère de l'écologie et du développement durable et le ministère de l'emploi, de la cohésion sociale et du logement :

- **Axe 1 :** Analyser l'ensemble des données bibliographiques disponibles avec plus particulièrement :
 - Une analyse des données de pollution françaises et européennes (en situation de proximité et de fond) dans le but notamment d'identifier un signal sur les concentrations d'oxydes d'azote (NO_x et NO₂) ;
 - Une analyse des données publiées dans la littérature scientifique, relatives aux émissions des véhicules diesel, et en particulier à l'évolution des émissions de dioxyde d'azote (NO₂) ;
 - Une revue des données bibliographiques existantes relatives aux conditions de mesure des émissions de dioxyde d'azote (NO₂).
- **Axe 2 :** Identifier les impacts différenciés des technologies de couplage de catalyseur d'oxydation et de filtre à particules (FAP) sur les émissions de NO_x et le ratio NO₂/NO_x.
- **Axe 3 :** cet axe de travail est orienté vers des considérations d'ordre sanitaire, décomposées en deux points :
 - Identifier les aspects toxicologiques liés aux émissions de NO₂ associés aux différentes technologies de couplage de catalyseur d'oxydation et de filtre à particules. Identifier différents « scénarios types » d'exposition (dont des scénarios de type « travailleurs »), rechercher dans la littérature récente des données de concentration d'exposition pour ces scénarios et fournir à minima une évaluation qualitative du risque.

- Etudier les relations entre les immissions¹ de NO_x, NO₂ et particules et des indicateurs sanitaires aigus et/ou chroniques (mortalité, pathologies cardiorespiratoires par exemple) au vu des éléments traités dans l'axe 1. Ce point ne pourra donc être abordé que si l'axe 1 met en évidence l'existence d'un signal particulier relatif aux oxydes d'azote et au ratio NO₂/NO_x.

3 Organisation de l'expertise

L'Afsset a confié au CES « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » l'instruction de cette saisine. Ce dernier a mandaté le groupe de travail « Emissions de particules et de dioxyde d'azote des véhicules diesel » pour la réalisation des travaux d'expertise.

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

Ces travaux d'expertise sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires. Ils ont été réalisés dans le respect de la norme NF X 50-110 « qualité en expertise » avec pour objectif de respecter les points suivants : compétence, indépendance, transparence, traçabilité.

4 Description de la méthode

4.1 Influence des technologies et des normes sur les émissions d'oxydes d'azote (NO, NO₂ et NO_x) des véhicules routiers (cf Axe 2, p.9)

Afin d'identifier les impacts différenciés des technologies de couplage de catalyseur d'oxydation et de filtre à particules sur les émissions de NO_x et le ratio NO₂/NO_x, ont été réalisés :

- une synthèse des connaissances sur les émissions unitaires de NO et NO₂, pour les véhicules légers (VL) et lourds (PL), selon les différentes normes Euro 0 à Euro 4 (VL) et Euro 0 à Euro V (PL), selon les différents systèmes de post-traitement (sans catalyseur d'oxydation, avec catalyseur d'oxydation et éventuellement filtre à particules catalysé / additivé, ...) et sur différents cycles de conduite (normalisés, « réels », ...). Pour cela, une revue bibliographique a été effectuée au niveau européen, en ne considérant que les émissions mesurées par chimiluminescence en ligne chauffée avec déshumidificateur, méthode jugée la plus appropriée. Près de 300 et 70 configurations d'émission ont ainsi été collectées respectivement pour les véhicules légers et lourds.
- une simulation des émissions de NO₂ du parc de véhicules légers roulant de 2007 à 2014, en croisant différents paramètres (facteurs d'émissions unitaires déterminés précédemment, nombre de kilomètres parcourus pour chaque famille de motorisation et de post-traitement).

Les hypothèses suivantes ont été adoptées pour les émissions des véhicules Euro 5 :

- Euro 5 essence : réduction des émissions de NO et NO₂ entre Euro 4 et Euro 5 dans la proportion prévue pour les NO_x par les limites réglementaires.
- Euro 5 diesel : trois scénarii alternatifs contrastés sur les émissions des véhicules Euro 5 diesel ont été examinés :

¹ Immission : Concentration d'une substance chimique dans l'air ambiant (InVS, 2000)

		<i>Hypothèses sur les émissions unitaires de NO₂ pour les véhicules diesel Euro 5</i>	
		Réduction des émissions de NO ₂ par rapport à Euro 4 dans la proportion prévue pour les NO _x par les limites réglementaires	Augmentation du NO ₂ émis de 10% par rapport à Euro 4
Hypothèses sur la répartition dans le parc : FAP catalysé / FAP additif	50/50	Scénario « favorable »	Scénario « modéré »
	80/20		Scénario « défavorable »

4.2

Concentrations dans l'air ambiant des oxydes d'azote (NO, NO₂, NO_x) liés au trafic routier (cf Axe 1, p.9)

Les données de pollution de l'air ambiant par les oxydes d'azote, en France et en Europe, ont été analysées afin de déterminer si l'évolution du rapport NO₂/NO_x à l'échappement se répercutait sur les niveaux d'oxydes d'azote et plus particulièrement de dioxyde d'azote dans l'environnement. Les données utilisées provenaient, pour la majorité, des dispositifs réglementaires de surveillance de la qualité de l'air qui fonctionnent en routine au sein d'agglomérations européennes.

Les objectifs étaient de :

- caractériser l'évolution des concentrations de NO₂, NO et NO_x à la fois en situation de proximité au trafic automobile et en situation urbaine dite « de fond » ;
- identifier un éventuel « signal » sur ces concentrations, et en discuter les déterminants plausibles ;
- estimer la contribution au NO₂ ambiant des émissions primaires de NO₂ issues du trafic routier.

Un intérêt particulier a également été porté aux niveaux de NO₂ rencontrés dans l'habitacle de véhicules légers insérés dans le trafic. Ce micro-environnement représente en effet un lieu d'exposition qui peut s'avérer non négligeable au regard du temps que la population générale ou professionnelle peut y passer. Deux études françaises récentes mesurant le NO₂ dans l'habitacle de véhicules insérés dans le trafic ont été utilisées.

4.3 Aspects sanitaires liés au NO₂, notamment associé aux différentes technologies de post traitement des émissions diesel (cf Axe 3, p.9)

Une synthèse des effets sanitaires du NO₂ a été réalisée en s'appuyant sur une revue des études expérimentales (animal, tests in vitro), des études d'exposition humaine contrôlée et des études épidémiologiques publiée par l'OMS². Ces données ont été [complétées par celles publiées plus récemment dans la littérature](#).

Les effets sanitaires du NO₂ dans les émissions diesel ont également été étudiés. Il n'a pas été trouvé de publication relative à l'impact des dispositifs de post-traitement sur la toxicité des émissions diesel dans leur globalité (phases gazeuse et particulaire) incluant des mesures de NO₂. Les seuls résultats d'études expérimentales disponibles proviennent des travaux de l'équipe Inserm/Certam/Ineris réalisés dans le cadre d'un programme de recherche Primequal/Predit³ et du programme MAAPHRI⁴ dont les données ont fait l'objet d'une réanalyse complète.

² « Air Quality Guidelines, Global Update 2005 » (OMS, 2006, p.333-394)

³ Rapport mis en ligne sur le site de Primequal/Predit (<http://www.primequal.fr/files/doc/899185bb1ea1e50e.pdf>)

⁴ Morin J-P, et al. Prevalidation of in vitro continuous flow exposure systems as alternatives to in vivo inhalation safety evaluation experimentations: Outcome from MAAPHRI-PCRD5 research program. *Exp Toxicol Pathol* (2008), doi:10.1016/j.etp.2008.01.007

4.4 Mise en perspective de niveaux d'exposition au NO₂ (actuels et prospectifs) au regard de différentes valeurs de référence (cf Axe 3, p.9)

La démarche retenue a consisté à :

- identifier et sélectionner les valeurs toxicologiques de référence (VTR), les valeurs guides de qualité de l'air (AQG⁵), et les valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) qui pouvaient être mises en perspectives avec des niveaux d'exposition au NO₂ ;
- identifier les principaux déterminants de l'exposition : milieux pouvant être sensiblement impactés par une modification des technologies de véhicules du parc roulant, populations principalement exposées, durées et fréquences d'exposition ;
- estimer les niveaux d'exposition en fonction des émissions de NO₂ du parc automobile entre 2007 et 2014 ;
- mettre en perspective les niveaux d'exposition estimés avec les valeurs de référence retenues pour la population générale d'une part, et pour la population professionnelle d'autre part.

5 Résultats et conclusions de l'expertise collective

5.1 Influence des technologies et des normes sur les émissions d'oxydes d'azote (NO, NO₂ et NO_x) des véhicules routiers (cf Axe 2, p.9)

A - Emissions unitaires d'oxydes d'azote (NO_x et NO₂) des véhicules légers diesel :

- Les véhicules Euro 1 présentent des émissions de NO_x inférieures en moyenne à celles des véhicules Euro 2. En effet, seule la somme HC+NO_x est réglementée pour Euro 1 et Euro 2. L'utilisation d'un catalyseur d'oxydation sur Euro 2, afin notamment d'atteindre les limites portant sur les émissions de CO, augmente fortement les émissions de NO₂. Ce catalyseur réduit également les HC, laissant ainsi la possibilité d'une augmentation des émissions de NO_x sans dépassement de la limite réglementaire portant sur la somme HC+NO_x.
- Par contre, le passage d'Euro 2 à Euro 3 se traduit bien par une baisse des émissions de NO_x sur cycles réels d'un facteur 2 à 3, sans réduction systématique des émissions de NO₂.
- La filtration proprement dite n'est pas génératrice d'une surémission de NO₂. Par contre, les technologies associant un renforcement de la catalyse d'oxydation au FAP pour gérer sa régénération entraînent une augmentation des émissions de NO₂.
- La norme Euro 4 qui impose sur le cycle d'homologation une réduction de moitié des émissions de NO_x, ne présente pas d'évolution majeure sur des cycles réels par rapport à Euro 3. Les différentes configurations présentant un renforcement de la catalyse d'oxydation (notamment pour gérer la régénération du FAP), qu'il soit en amont ou sur le FAP, affichent les plus fortes émissions de NO₂.
- A noter que pour les véhicules Euro 3, les émissions de NO, NO₂ et NO_x obtenues avec FAP additivé présentent relativement peu d'écart avec la version sans FAP, le FAP additivé ne nécessitant pas de renforcement de la catalyse d'oxydation pour sa régénération.

⁵ AQG : Air quality guideline, valeur guide de qualité de l'air

B – Emissions unitaires d’oxydes d’azote (NO_x et NO₂) des véhicules lourds diesel :

Bien que les données disponibles soient moins nombreuses pour ce type de véhicules, les points suivants ont pu être identifiés :

- Le renforcement des premières générations de normes Euro ne s’est pas toujours traduit par des réductions des émissions de NO_x en conditions réelles de circulation (ce qui a également été observé sur les véhicules légers) ;
- La présence de catalyseur, avec ou sans FAP, conduit systématiquement à une augmentation des émissions de NO₂ ;
- Les émissions de NO_x et de NO₂ sont fortement conditionnées par la combinaison d’un grand nombre de paramètres parmi lesquels figurent le point de fonctionnement du moteur (régime et charge), la recirculation des gaz d’échappement et les technologies de post-traitement.

C - Emissions globales de NO₂ des véhicules légers :

Les travaux montrent que le ratio NO₂/NO_x à l’émission pour le parc de véhicules diesel légers évolue à la hausse depuis 1996, date à laquelle les catalyseurs d’oxydation ont été rendus obligatoires sur les véhicules neufs par la norme Euro 2, et que ceci va perdurer.

Toutefois, si le taux de pénétration des FAP additivés parmi l’ensemble des véhicules équipés de FAP dépassait 30% environ, les émissions globales de NO₂ dues aux véhicules légers devraient se réduire à minima jusqu’en 2014, plus ou moins rapidement selon les scénarii « favorable » et « modéré ».

Au contraire, si ce taux était inférieur à 30% environ, on observerait à terme une augmentation du NO₂ émis par les véhicules légers.

Depuis le début des années 2000, les émissions de NO₂ du parc sont principalement attribuables aux véhicules diesel catalysés d’Euro 2 à 4 (voire 5 avec les scénarii « modéré » et « défavorable » présentant les plus fortes émissions de NO₂, cf p.11).

A l’heure actuelle, du fait de leur faible pénétration dans le parc, les véhicules équipés de FAP associés à un catalyseur d’oxydation ne contribuent que très peu aux émissions totales de NO₂. Cependant, cette contribution devrait augmenter à l’avenir.

5.2 Concentrations dans l’air ambiant des oxydes d’azote (NO, NO₂, NO_x) liés au trafic routier (cf Axe 1, p.9)

Une tendance à la baisse des niveaux d’oxydes d’azote (NO_x et NO₂) est observée au niveau des sites de surveillance dits de « fond » urbain. Les situations restent par contre variables pour les concentrations relevées en proximité du trafic automobile que ce soit en France ou au niveau d’autres pays européens. On observe ainsi au niveau de ces sites, des tendances à la stagnation ou à la hausse des niveaux de NO₂ mesurés, et ce depuis le milieu des années 1990.

Par ailleurs, la valeur limite annuelle⁶ de 40 µg/m³ fixée pour le dioxyde d’azote est dépassée sur nombre de ces sites.

⁶ Directive 2008/50/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 mai 2008 concernant la qualité de l’air ambiant et un air pur pour l’Europe

Ces tendances observées en proximité du trafic pourraient être expliquées par deux facteurs :

- les processus photochimiques liés entre autres à l'évolution à la hausse des niveaux d'ozone qui pourraient jouer un rôle en réagissant avec le NO primaire émis pour former du NO₂,
- l'évolution à la hausse des émissions primaires de NO₂ en lien avec la progression de la part des véhicules diesel et leurs évolutions technologiques au sein du parc automobile.

Il n'a cependant pas été possible dans le cadre des travaux du groupe de travail d'affecter précisément la part attribuable à chacun de ces facteurs.

Par ailleurs, les mesures réalisées dans le flux de circulation et notamment à l'intérieur de l'habitacle de véhicules montrent que les niveaux de NO₂ relevés sont largement supérieurs à ceux que l'on peut observer au niveau des stations de surveillance de proximité au trafic. L'un des paramètres majeurs influençant les niveaux de NO₂ dans l'habitacle est constitué par les émissions des véhicules avoisinant le véhicule considéré, en particulier celui le précédant immédiatement. Les concentrations dans l'habitacle du véhicule augmentent nettement lors des passages en tunnel. Il ne peut cependant être exclu que d'autres paramètres (typologie de l'axe routier emprunté, état de gestion du trafic, topographie des lieux, etc.) influencent également les concentrations à l'intérieur de l'habitacle.

5.3 Aspects sanitaires liés au NO₂, notamment associé aux différentes technologies de post traitement des émissions diesel (cf Axe 3, p.9)

5.3.1 Synthèse des effets sanitaires du NO₂

Les données toxicologiques montrent que le NO₂ induit des effets toxiques sur le système respiratoire. Ces effets sont décrits dans des études expérimentales à la suite d'expositions à des concentrations en NO₂ supérieures aux valeurs guides. Aucune étude publiée apportant des éléments nouveaux sur ce point n'a été relevée par le groupe de travail depuis la publication de la synthèse de l'OMS⁷.

Dans le cadre des études épidémiologiques la caractérisation des niveaux d'exposition à la pollution atmosphérique se réduit en fait quasiment toujours à l'évaluation de l'exposition à quelques polluants « indicateurs », qui ne représentent donc qu'une infime partie de l'ensemble des composés constituant la pollution atmosphérique. Il en découle que l'observation, dans le cadre d'une étude épidémiologique, de liens entre les niveaux d'un indicateur de pollution et une variable sanitaire n'est pas nécessairement la conséquence de l'existence d'effets propres du polluant considéré sur la santé, mais peut refléter les effets sanitaires d'un ou plusieurs polluants parmi l'ensemble de ceux émis ou formés avec ce polluant indicateur. Ainsi, les études épidémiologiques relatives aux expositions au NO₂ sont limitées par leur incapacité à séparer les effets du NO₂ de ceux des autres polluants émis ou formés avec lui, bien que de nombreux travaux méthodologiques soient en cours à ce sujet. En particulier, le NO₂ a déjà été utilisé comme marqueur de la pollution émise par les combustions, notamment celle émise par la circulation routière.

Les apports de l'approche épidémiologique dans le cadre de la question posée ici semblent donc relativement limités, tant pour ce qui concerne la connaissance des effets sanitaires du NO₂ émis par les véhicules diesel proprement dits, que pour la réalisation d'une évaluation des impacts sanitaires associés à l'introduction dans le parc de véhicules de nouvelles technologies de post-traitement.

⁷ [« Air Quality Guidelines, Global Update 2005 » \(OMS, 2006, p.333-394\)](#)

5.3.2 Effets sanitaires du NO₂ contenu dans les émissions diesel

Le potentiel oxydant mesuré en conditions abiotiques est fortement corrélé à la teneur en NO₂ de l'émission.

Les impacts d'expositions chez le rat (sain et insuffisant cardiaque) à des émissions diluées de moteurs diesel :

- traitées ou non par catalyse d'oxydation⁸,
- associée ou non à un filtre à particules, et
- enrichies (7200 µg/m³) ou non en NO₂,

sur les fonctions cardiaques, rénales et reproductives, sur le stress oxydant pulmonaire et systémique, et sur l'inflammation systémique ont été étudiés.

Les résultats présentés ici proviennent d'une réanalyse des travaux de l'équipe Inserm/Certam/Ineris.

Ces expositions correspondent à des niveaux élevés par rapport à celles habituellement rencontrées en milieu ambiant.

Au final :

- D'une part, concernant les émissions de moteurs diesels traitées par catalyse d'oxydation (non filtrées), les résultats obtenus suggèrent une augmentation de l'inflammation systémique, un stress oxydant marqué au niveau hépatique et un effet sur la fonction cardiaque (bradycardie et bradyarythmie) qui semblent plus importants que pour les émissions non catalysées pour ces deux derniers effets. La teneur en NO₂ de ces émissions constitue un traceur de leur traitement par catalyse d'oxydation et de leur potentiel oxydant ;
- D'autre part, concernant les émissions de moteurs diesels traitées par catalyse d'oxydation associée à un filtre à particules, les résultats obtenus suggèrent aussi des effets plus marqués que pour les émissions non catalysées : modulation de l'activité de quelques enzymes impliquées dans la défense anti-oxydante, inflammation systémique. L'existence d'effets sur l'inflammation systémique, après filtration des échappements, suggère un rôle de la phase gazeuse dans ces effets.

Par ailleurs, les effets de l'exposition de tranches de poumons de rat à des émissions de moteur diesel sur le stress oxydant, l'apoptose⁹ et l'inflammation ont été étudiés. La comparaison des résultats obtenus avec et sans catalyseur d'oxydation montre des effets toxiques plus importants avec catalyseur d'oxydation confortant en cela les résultats observés précédemment in vivo.

En résumé, les émissions de moteurs diesels traitées par catalyse d'oxydation, qu'elles soient ou non filtrées, semblent induire chez le rat des effets biologiques plus marqués que les émissions non catalysées. La teneur en NO₂ de ces émissions constitue un traceur de leur traitement par catalyse d'oxydation et de leur potentiel oxydant. Cependant, tant les données épidémiologiques que les données toxicologiques ne permettent pas d'exclure le rôle d'autres espèces pro oxydantes émises conjointement.

⁸ Catalyseur à forte charge en Platine

⁹ Mort cellulaire programmée

5.4 Mise en perspective de niveaux d'exposition au NO₂ (actuels et prospectifs) au regard de différentes valeurs de référence (cf Axe 3, p.9)

5.4.1 Valeurs de référence retenues

Les valeurs de référence sanitaires retenues par le groupe de travail, sont :

- pour la population générale, la valeur guide OMS de 200 µg/m³ sur une heure ;
- pour la population professionnelle, une valeur de 110 µg/m³ sur 8 heures. Cette valeur est obtenue par l'ajustement de la valeur guide OMS de 200 µg/m³ sur une heure pour une durée d'exposition de 8 heures¹⁰.

A titre indicatif pour la population professionnelle, les niveaux d'exposition sont également comparés aux valeurs de gestion suivantes :

- VLEP du SCOEL¹¹ de 0,2 ppm (400 µg/m³) sur 8 heures (recommandation en date de 1997, appliquée aux Pays-Bas depuis le 1er janvier 2007) ;
- VLEP du SCOEL de 0,5 ppm (1000 µg/m³) sur 15 minutes (recommandation en date de 1997, appliquée aux Pays-Bas depuis le 1er janvier 2007).

5.4.2 Milieux d'exposition retenus

Les milieux aériens les plus susceptibles d'être impactés par une modification des émissions du trafic sont ceux à proximité immédiate de la source de pollution (air de l'habitacle de véhicules et à proximité immédiate de véhicules). Plus on s'éloigne de la source de pollution, plus l'impact des technologies de post-traitement sur les concentrations de NO₂ devient difficile à appréhender, notamment du fait :

- des phénomènes complexes de la chimie atmosphérique ;
- des phénomènes aérauliques.

De plus, compte tenu de l'importance des niveaux observés à l'intérieur des habitacles de véhicules et au cœur même du trafic, les travaux se sont concentrés sur ces milieux. La disponibilité des données de mesures a conduit à restreindre l'analyse aux habitacles de véhicules légers.

Au final, trois scénarios ont été retenus afin d'estimer les niveaux moyens de NO₂ dans l'habitacle d'un véhicule léger en fonction des émissions globales de NO₂ du parc automobile entre 2007 et 2014 :

- **un scénario « minorant » des niveaux de concentration** tenant compte du 25^{ème} percentile des concentrations instantanées mesurées dans l'habitacle de véhicules en 2007¹² et du scénario « favorable » relatif aux évolutions entre 2007 et 2014 des émissions de NO₂ dans le parc de véhicules légers (cf Tableau p.11) ;
- **un scénario « moyen » des niveaux de concentration** tenant compte de la moyenne de ces concentrations et du scénario « modéré » d'évolution des émissions ;
- **un scénario « maximalisant » des niveaux de concentration** tenant compte du 95^{ème} percentile de ces concentrations et du scénario « défavorable » d'évolution des émissions.

Cette approche a été déclinée pour les situations « hors tunnel » et en « tunnel ».

¹⁰ Cet ajustement a été effectué en utilisant une relation générale concentration-temps-réponse dont est issue la loi de Haber.

¹¹ Scientific Committee on Occupational Exposure Limits (ou comité scientifique en matière de limites d'exposition professionnelle à des agents chimiques), institué par la décision 95/320/CE de la Commission européenne

¹² Données issues de mesures réalisées en 2007 et qui ont fait l'objet d'une publication (Morin J.P. et al. (2009). Evaluation de l'exposition aux polluants atmosphériques des conducteurs de véhicules automobiles par la mise en œuvre de mesures dynamiques dans l'habitacle du véhicule. *Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement* ; 70 : 184-192)

5.4.3 Estimation prospective des niveaux d'exposition dans l'habitacle d'un véhicule léger

▪ *Situation « hors-tunnel »*

- Le scénario « minorant » conduit à des concentrations estimées dans l'habitacle de l'ordre de 100 à 150 µg/m³ en 2014.
- Le scénario « moyen » conduit à des concentrations de l'ordre de 220 à 270 µg/m³ en 2014.
- Le scénario « maximalisant » conduit à des concentrations de l'ordre de 530 à 550 µg/m³ en 2014.

A titre comparatif, on notera qu'au cours des parcours hors tunnel réalisées en 2007 par l'équipe Inserm/Certam/Airnormand, la valeur de 400 µg/m³ est dépassée pendant 15 à 20% du temps, et la valeur de 200 µg/m³ est dépassée pendant 50 à 75% du temps.

▪ *Situation en « tunnel »*

Les concentrations de NO₂ dans l'habitacle lors de parcours en tunnel sont extrêmement variables, du fait des particularités propres à chaque tunnel. Au vu des résultats obtenus au cours de mesures réalisées dans quatre tunnels, les niveaux de NO₂ dans l'habitacle pendant les parcours en tunnel pourraient atteindre des niveaux élevés, de l'ordre de 400 µg/m³ (moyenne des niveaux mesurés pendant les parcours en tunnel combinée au scénario d'évolution « modéré » des émissions entre 2007 et 2014), pouvant dans le scénario maximalisant dépasser 1000 µg/m³.

A titre comparatif, on notera qu'au cours des parcours en tunnel lors des mesures réalisées en 2007 par l'équipe Inserm/Certam/Airnormand, la valeur de 400 µg/m³ est dépassée environ 50% du temps, et la valeur de 200 µg/m³ est dépassée pendant 70 à 85% du temps.

5.4.4 Population professionnelle

▪ *Situation « hors-tunnel »*

L'identification des principaux déterminants de l'exposition a abouti à cibler les travailleurs dont l'activité implique des déplacements fréquents et de longue durée dans un véhicule léger en agglomération.

Pour cette population de travailleurs, il a été retenu en première approche une durée d'exposition moyenne de 8 heures par jour. En seconde approche, une durée d'exposition moindre (4 heures par jour en moyenne) a été retenue.

Pour un travailleur passant donc 8 heures par jour dans un véhicule inséré dans le trafic en agglomération urbaine (hypothèse majorante) :

- La valeur de 110 µg/m³ sur 8 heures (obtenue par l'ajustement de la valeur guide OMS de 200 µg/m³ sur une heure pour une durée d'exposition de 8 heures selon la démarche retenue par le groupe de travail) est dépassée quel que soit le scénario considéré. La valeur guide de l'OMS dont dérive cette valeur ajustée est fondée sur l'apparition de manifestations biologiques chez les asthmatiques, dont la présence au sein des travailleurs ne peut être exclue¹³. Notons également qu'une exposition professionnelle réduite de moitié en durée (4h), conduirait pour les scénarios « moyen » et « maximalisant » à un dépassement de la valeur de 135 µg/m³ (obtenue selon la même méthode d'ajustement pour une durée de 4h).
- La VLEP préconisée par le SCOEL sur 8h (400 µg/m³) est dépassée dans le scénario « maximalisant ».

¹³ Recommendation of the Scientific Committee for Occupational Exposure Limits for nitrogen dioxide, SCOEL/SUM/53D, juin 1997

▪ *Situation en « tunnel »*

Les niveaux dans l'habitacle peuvent dépasser la valeur de $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sur des durées, qui dans certains cas pourraient vraisemblablement atteindre ou dépasser le quart d'heure.

Pour les populations professionnelles, le dépassement de la VLEP préconisée par le SCOEL sur 15 minutes ($1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ne peut donc être exclu.

5.4.5 Population générale

▪ *Situation « hors-tunnel »*

L'identification des principaux déterminants de l'exposition a abouti à cibler les conducteurs et passagers utilisant une voiture dans le cadre de leurs déplacements en agglomération.

Une durée d'exposition moyenne de 1 heure par jour pour la population générale demeurant dans les aires urbaines a été retenue sur la base des enquêtes ménages/déplacements du Certu¹⁴ et de données Insee¹⁵ relatives aux trajets domicile-travail.

Il apparaît que pour la population générale demeurant dans une agglomération métropolitaine, le temps passé dans l'habitacle d'un véhicule léger inséré dans le trafic est en moyenne d'une heure par jour. Ainsi, le scénario « moyen » conduit pour cette heure de trajet à une exposition dans l'habitacle (220 à $270 \mu\text{g}/\text{m}^3$) supérieure à la valeur guide de l'OMS ($200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur 1 heure). Seul le scénario « minorant » conduit à des valeurs inférieures à la valeur guide de l'OMS.

▪ *Situation en « tunnel »*

Les niveaux dans l'habitacle peuvent dépasser la valeur de $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sur des durées, qui dans certains cas pourraient vraisemblablement atteindre ou dépasser le quart d'heure.

5.4.6 Conclusion

Dans la majeure partie des situations envisagées, les niveaux d'exposition au NO_2 projetés dépassent les valeurs de référence retenues. Les limites de cette analyse ne semblent pas à même de remettre en cause les conclusions qui peuvent en être tirées.

Actuellement, les niveaux de NO_2 auxquels sont exposés les usagers de véhicules légers en agglomérations, tant en population générale qu'en population professionnelle, peuvent induire des effets toxiques sur le système respiratoire, en particulier pour les populations sensibles (asthmatiques notamment). L'évolution de cette situation jusqu'en 2014 (entrée en vigueur de la norme Euro 6) dépendra de la répartition au sein du parc des technologies de dépollution parmi celles connues à ce jour et des mesures de gestion qui conditionnent les émissions du parc.

Le Comité d'Experts Spécialisés « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » adopte le rapport d'expertise collective lors de sa séance du 5 mai 2009 et fait part de cette adoption à la direction générale de l'Afsset.

¹⁴ Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques

¹⁵ Institut national de la statistique et des études économiques

6 Recommandations de l'expertise collective

6.1 Concernant l'amélioration des connaissances

Les travaux du groupe ont mis en exergue l'intérêt de mieux documenter les émissions de NO₂ des véhicules ; en particulier pour les véhicules déjà en circulation et notamment les véhicules lourds, afin de mieux renseigner l'influence des technologies sur les émissions, mesurées sur cycle et en conditions réelles.

Le groupe recommande l'amélioration des connaissances concernant les niveaux des polluants émis par le trafic automobile à sa proximité immédiate, et leurs déterminants (par exemple, influence de la position de l'échappement sur les niveaux mesurés dans le sillage), compte tenu de l'ampleur des populations concernées, et de l'identification dans les présents travaux de l'intérêt de ces milieux.

Le groupe a constaté au cours de ses travaux la rareté des données disponibles concernant la toxicologie des émissions des véhicules diesels équipés de dispositifs de post-traitement. Il recommande le renforcement des connaissances dans ce domaine. En particulier, il est préconisé de renforcer les travaux sur la toxicologie des émissions considérées dans leur globalité (phases gazeuse et particulaire).

6.2 Prise en compte des aspects sanitaires associés aux différentes technologies de post-traitement dans les normes portant sur les émissions des moteurs diesel

Un bénéfice sanitaire peut être attendu de la mise en œuvre de dispositifs de dépollution incluant un filtre à particules sur les véhicules diesel, du fait notamment de la forte réduction des émissions de particules dont les effets sanitaires sont reconnus. Cependant, lorsque la mise en œuvre de dispositifs de dépollution incluant un filtre à particules s'accompagne d'une surproduction de NO₂, les résultats des présents travaux montrent que la situation au regard de ce polluant demeurera préoccupante notamment pour les occupants des véhicules légers en agglomérations. D'un point de vue sanitaire, les niveaux de NO₂ auxquels ils sont d'ores et déjà exposés indiquent, au regard des valeurs de référence, la possibilité de survenue d'effets sanitaires. Dans ce contexte, le CES préconise de prendre en compte spécifiquement dans les réglementations futures les émissions de NO₂ en complément des normes relatives aux NO_x totaux à l'émission.

Maisons-Alfort, le 5 mai 2009

Au nom des experts du CES « Evaluation des risques liés aux milieux aériens »,

le président du CES, Christian Elichegaray

