

Observations du ratio $[\text{NO}_2]/[\text{NO}_x]$ en tunnel routier

Observations of the $[\text{NO}_2]/[\text{NO}_x]$ ratio in road tunnels

Cyrille Bernagaud¹, Jean-François Burkhardt¹, Bruno Vidal¹, Tiphaine Lepriol², Jean-François Petit²,
Tiphaine Brunel³, Frantz Gouriou³, David Préterre³

Résumé

Les techniques de post-traitement à l'échappement des véhicules routiers ont conduit à augmenter la part du dioxyde d'azote au sein de leurs émissions d'oxydes d'azote. Cet article est dédié à l'observation de ce phénomène en s'appuyant sur les tunnels routiers. Ces derniers constituent en effet un site d'étude privilégié, en concentrant la source trafic et en limitant les réactions photochimiques.

L'essentiel des données exploitées dans cet article provient d'un programme de recherche intitulé AIRTURIF portant sur la qualité de l'air dans et aux abords des tunnels routiers d'Ile-de-France. Ce projet associe plusieurs services du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie dont notamment le CETE (Centre d'Études Techniques de l'Équipement) Ile-de-France, le CETU (Centre d'Études des Tunnels) et les services en charge de la gestion des tunnels parisiens. Les mesures exploitées sont issues de mesures fixes mais aussi de mesures embarquées réalisées avec la collaboration du CERTAM (Centre d'Études et de Recherche Technologique en Aérothermique et Moteurs).

Les mesures embarquées donnent un ratio médian $[\text{NO}_2]/[\text{NO}_x]$ de l'ordre de 0,3. En revanche, la médiane est significativement plus faible, de l'ordre de 0,2, lors de l'exploitation de mesures fixes réalisées en tunnel dans le cadre d'Airturif. Par ailleurs, le weekend se caractérise par un ratio qui tend à être plus élevé, surtout le dimanche. L'interdiction de circulation des poids lourds le dimanche peut expliquer ce phénomène, dans la mesure où, à l'échappement de ces derniers, le ratio $[\text{NO}_2]/[\text{NO}_x]$ tend à être plus faible que pour les véhicules légers. Deux campagnes réalisées indépendamment du programme Airturif ont permis d'étudier plus précisément ce phénomène, notamment une campagne de mesure réalisée dans un tunnel long autoroutier.

Mots-clés

NO_2/NO_x , ratio, tunnel, trafic, measurement

Abstract

The post-processing techniques of the exhaust gas from road vehicles have led to increase the proportion of nitrogen dioxide in nitrogen oxides. This article presents the observation in road tunnel of this phenomenon. Tunnels are indeed a special study area, focusing the source traffic and limiting photochemistry.

Most of the data used in this article comes from a research program (called AIRTURIF) on the air quality in and around the road tunnels of Ile-de-France. This project involves several departments of the Ministry of Ecology, Sustainable Development and Energy including the CETE (Regional Engineering Design Centre) Ile-de-France, CETU (Tunnels Study Centre) and the departments responsible for the operation of tunnels in Paris. The measures used are from fixed measurements but also from measurements in the passenger compartment of a vehicle into traffic thanks to a collaboration with the CERTAM (Aerothermal And Internal Combustion Engine Technological Research Center).

The onboard measurements give a median ratio $[\text{NO}_2]/[\text{NO}_x]$ of the order of 0.3. In contrast, the median is significantly lower, about 0.2 during fixed measurements tunnel. The weekend is characterized by a ratio which tends to be higher, especially on Sundays. The prohibition of heavy truck traffic on Sunday may explain this phenomenon since the exhaust gas ratio $[\text{NO}_2]/[\text{NO}_x]$ from heavy truck tends to be lower. Two studies carried out independently of Airturif program enable to measure more precisely this phenomenon, including measurements carried out in a long highway tunnel.

Keywords

NO_2/NO_x , ratio, tunnel, traffic, measurement

(1) CETU, Centre d'Études des tunnels à Bron

(2) CETE d'Ile-de-France, Centre d'Études Techniques de l'Équipement d'Ile-de-France à Trappes

(3) CERTAM, Centre d'Étude et de Recherche Technologique en Aérothermique et Moteur à Rouen

L'article ci-joint, issu du programme de recherche AIRTURIF, apporte une contribution pertinente à la relation entre les efforts fournis par les constructeurs automobiles pour limiter les émissions de particules et la qualité de l'air. Les filtres à particules, utilisés pour limiter les impacts de la motorisation diesel importante en France, peuvent, selon certains modèles, favoriser la production de dioxydes d'azote dont la nocivité est reconnue. L'avis de l'ADEME¹ sur les émissions de particules par le trafic routier remarque que : « certains FAP (filtres à particules) contribuent à accentuer les concentrations de NO₂ en proximité du trafic routier : Les FAP catalysés (2/3 des FAP), sont à l'origine de surémissions de NO₂ (à NO_x constant, le rapport NO₂/NO est plus important). Les FAP additivés (1/3 des FAP) ne souffrent pas de ce phénomène ». Ce travail présente l'intérêt de pouvoir saisir la qualité des émissions affranchies de l'influence trop forte de l'air ambiant qui réagit tout de suite avec les oxydes d'azote en transformant le monoxyde d'azote NO en dioxyde d'azote NO₂. Bien sûr, ce travail porte sur l'ensemble des véhicules transitant par les tunnels étudiés et ne peut détailler l'influence des différents types de motorisation ; cependant, les interrogations posées s'inscrivent dans le contexte plus large de l'évaluation des efforts effectués pour améliorer la qualité de l'air afin d'éliminer d'éventuels effets pervers, toujours possibles, quand il s'agit d'améliorer le système global et interactif qu'est l'environnement urbain. Isabelle Roussel

1. Tendances liées aux effets de la réglementation à l'échappement

Les premières données de référence concernant le ratio [NO₂]/[NO_x] en tunnel datent de 1998. En effet, en 1999, une circulaire (n° 99.329, 1999) du ministère de la Santé (ministère de la Santé, 1999) recommande la prise en compte d'un avis du CSHPF (Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France) (CSHPF, 1998) qui estime le ratio volumique [NO]/[NO₂] à environ 10 dans les ouvrages souterrains routiers, soit un ratio volumique [NO₂]/[NO_x] environ égal à 9 % (1/11^e). Ce ratio était alors utilisé pour estimer les concentrations en dioxyde d'azote lors des mesures simples de monoxyde d'azote.

Ces dernières années, plusieurs campagnes de mesure ont montré que le ratio [NO₂]/[NO_x] en tunnel

tendait à augmenter et n'était plus égal à 9 %. Cette évolution du ratio [NO₂]/[NO_x] en tunnel est le reflet des évolutions globalement constatées en proximité des sources « trafic ».

Ainsi, le suivi des concentrations en oxydes d'azote en bordure des infrastructures routières suggère, lui aussi, une augmentation du ratio [NO₂]/[NO_x]. Cette tendance est facilement observable à la lecture des grandeurs mesurées par les stations de proximité au trafic routier du réseau de surveillance de la qualité de l'air de la région Ile-de-France. Si l'on s'intéresse aux données de concentrations mesurées par Airparif, les concentrations en monoxyde d'azote en bordure de voie diminuent, tandis que celles de dioxyde d'azote stagnent, d'où une croissance du ratio [NO₂]/[NO_x] (Cf. illustrations 1, 2 et 3, dans Airparif, 2013).

Ce phénomène, de plus en plus documenté (AFSSET, Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail) (AFSSET, 2009), est notamment lié aux techniques utilisées par les constructeurs pour le respect des émissions à l'échappement des véhicules automobiles. En effet, la réglementation limite les émissions en oxydes d'azote totaux sans contrainte sur les quantités respectives de monoxyde d'azote et de dioxyde d'azote. Or certaines techniques de post-traitement des émissions, pots catalytiques et filtres à particules, favorisent indirectement l'oxydation du NO en NO₂ (AFSSET, 2009).

Dans ce contexte, l'AFSSET a rendu un avis le 11 août 2009 (AFSSET, 2009) qui préconise de prendre en compte spécifiquement dans les réglementations futures les émissions de NO₂ en complément des normes relatives aux oxydes d'azote totaux à l'échappement. Cette volonté est dictée par la toxicité élevée du NO₂ en comparaison du NO.

Dans l'établissement du ratio [NO₂]/[NO_x], les mesures faites à l'air libre ne sont pas complètement caractéristiques de la source « trafic » compte tenu de la multiplicité des sources d'émissions et du rôle de la photochimie. La mesure directe en tunnel, en isolant la source trafic et en limitant la photochimie, permet de s'affranchir de ces deux limites. La suite de ce document est consacrée à l'étude du ratio [NO₂]/[NO_x] en tunnel.

2. Nature des données disponibles en tunnel

Le Centre d'Études des Tunnels (CETU) effectue régulièrement des mesures de pollution dans les ouvrages souterrains avec la collaboration des exploitants concernés. Ces mesures visent à améliorer la connaissance des niveaux de pollution dans les

(1) <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=1&cid=96&m=3&catid=23865>

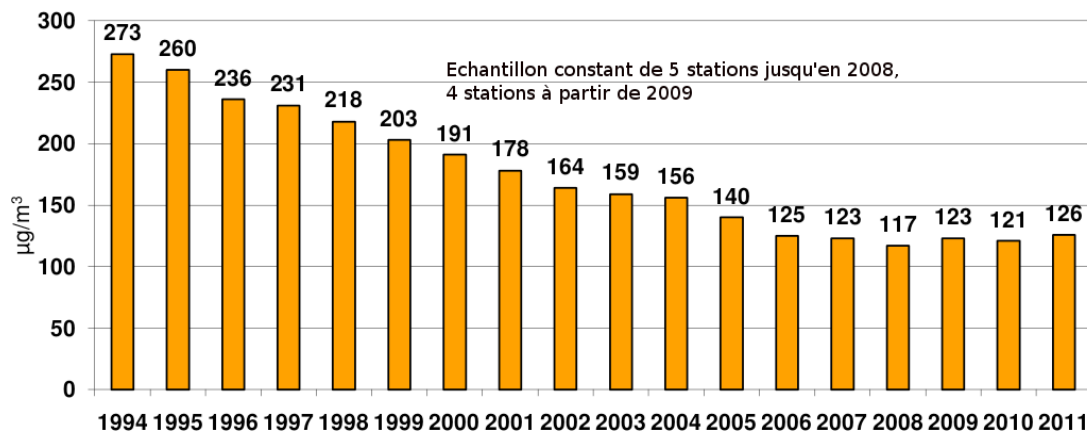


Figure 1. Valeurs moyennes annuelles de NO mesurées par des stations de mesures en proximité de voie routière (Source : Airparif).
Annual mean values of NO measured by monitoring road stations (Airparif).

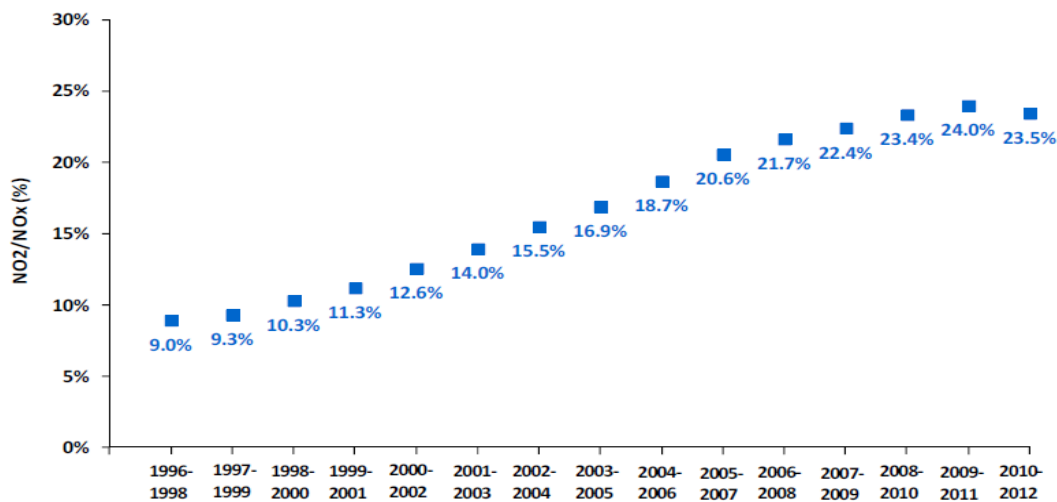


Figure 2. Ratio des concentrations $[NO_2]/[NO_x]$, une fois les teneurs de fond retranchées, en moyenne sur trois ans sur les stations de proximité au trafic routier en Ile-de-France, de 1998 à 2012 (Source : Airparif).
 $[NO_2]/[NO_x]$ averaged ratio over three years from stations close to traffic (once the background levels subtracted) in Ile-de-France from 1998 to 2012 (Airparif).

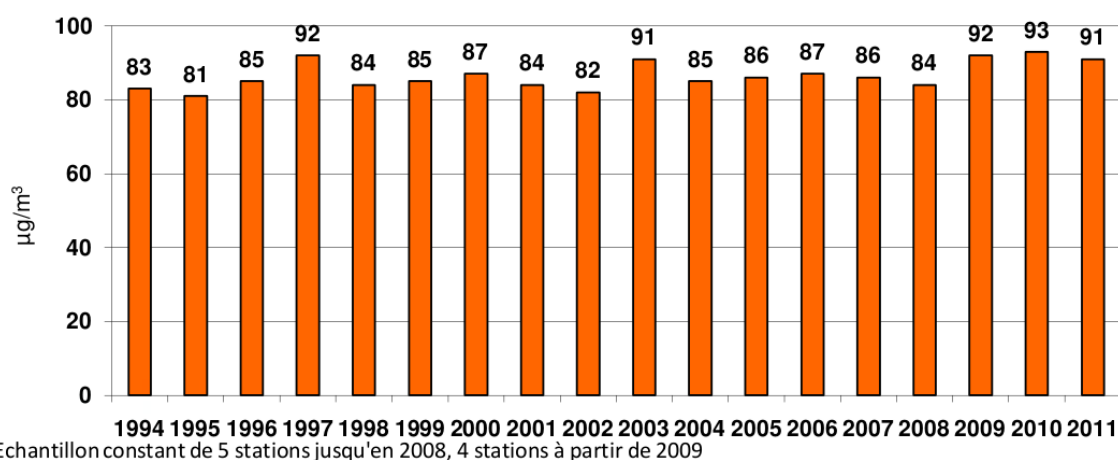


Figure 3. Valeurs moyennes annuelles de NO₂ mesurées par des stations de mesures en proximité de voie routière (Source : Airparif).
Annual mean values of NO₂ measured by monitoring road stations (Airparif).

ouvrages routiers, et plus concrètement à aider à la calibration des appareils de détection de la pollution atmosphérique. Les tunnels sont en effet équipés de dispositifs de détection auxquels est asservi un système de ventilation sanitaire qui s'active en cas de besoin afin d'assurer des niveaux en pollution répondant aux objectifs mentionnés dans la circulaire n° 99.329 (ministère de la Santé, 1999) qui s'applique à ces ouvrages.

Dans cette logique d'amélioration de la connaissance de la pollution dans les tunnels routiers, a été mis en place un programme de recherche intitulé AIRTURIF portant sur la qualité de l'air dans et aux abords des tunnels routiers d'Ile-de-France. Ce projet associe plusieurs services du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, dont notamment le CETE (Centre d'Études techniques de l'Équipement) Ile-de-France, et les services en charge de la gestion des tunnels parisiens. Dans le cadre de ce programme initié en 2009, plusieurs campagnes de mesure ont permis d'enrichir les données existantes sur la pollution en tunnel. En complément de mesures de la pollution en des points fixes, ont été réalisées avec l'appui technique du CERTAM (Centre d'Études et de Recherche Technologique en Aérothermique et Moteurs) des mesures embarquées donnant directement les concentrations dans l'habitacle d'un véhicule en circulation.

3. Mesures embarquées : homogénéité des résultats en dépit de l'influence du véhicule qui précède

Les résultats de mesures embarquées, présentés par la suite, sont tous le fruit de trajets effectués dans des tunnels urbains ou périurbains sur des axes importants de circulation en région Ile-de-France.

Le véhicule équipé s'insérait dans le trafic routier et ne disposait pas de système de filtration d'air de l'habitacle afin de ne pas introduire d'éventuel effet perturbateur, susceptible en outre d'évoluer au cours de la campagne de mesure. Le conducteur du véhicule n'avait pas de consigne particulière. Il a *a priori* privilégié une circulation sur la voie de droite – le véhicule étant en particulier doté d'une remorque – et aucune préconisation concernant la distance à respecter par rapport aux véhicules le précédant n'a été donnée. Les analyseurs prélevaient directement l'air entrant dans l'habitacle du véhicule permettant ainsi de transposer les concentrations mesurées à tout type d'habitacle. Un seul point de prélèvement, situé dans la partie amont de la gaine de ventilation en proximité du pied du pare-brise, a été utilisé sur ces campagnes. Ceci permet de prélever indépendamment des condi-

tions de ventilation de l'habitacle pour réaliser une mesure la plus fidèle possible de l'air se présentant à l'avant du véhicule.

L'utilisation de plusieurs points de prélèvement dans l'habitacle a été préalablement étudiée, et la dose équivalente mesurée était identique pour les deux points de mesures utilisés, à savoir au niveau des bouches d'aération du véhicule pour l'un, et de la tête du conducteur pour l'autre (Gouriou, Morin, Weill, 2004).

Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un analyseur ESA Topaze 32M, analyseur par chimiluminescence double chambre haute dynamique des oxydes d'azote cadencé à 1 Hz.

Les tunnels ont été traversés 10 à 15 fois par sens de circulation, sauf deux ouvrages ayant fait l'objet d'investigations complémentaires avec une trentaine de traversées par sens pour l'un (tunnel n° 4) et plus d'une centaine de traversées pour l'autre (tunnel n° 11). Seuls les tunnels n° 3 et 8 sont bidirectionnels. Pour les vingt tunnels concernés, les traversées ont été effectuées préférentiellement aux heures de pointe.

Au final, il semblerait que les campagnes aient toutefois été peu marquées par la congestion, avec seulement 6 % des traversées effectuées à une vitesse de moins de 20 km/h.

Les valeurs médianes des ratios $[\text{NO}_2]/[\text{NO}_x]$ rencontrées par tunnel et par sens de circulation (Cf. figure 3) oscillent entre 20 et 41 %. Ces résultats confortent l'analyse selon laquelle le ratio $[\text{NO}_2]/[\text{NO}_x]$ a augmenté (ou encore que le ratio $[\text{NO}]/[\text{NO}_2]$ a diminué). Dans aucun des tunnels, le rapport médian $[\text{NO}_2]/[\text{NO}_x]$ n'est proche de 9 %, valeur équivalente à un ratio $[\text{NO}]/[\text{NO}_2]$ égal à 10. Les ratios rencontrés sont 2 à 4 fois plus élevés que la valeur donnée par l'avis du CSHPF.

Les vingt tunnels traversés présentent des caractéristiques très variées. Leur longueur varie de 300 mètres à 4 kilomètres, et leur trafic de 90 000 à 210 000 véhicules par jour (deux sens de circulation confondus). L'ensemble des paramètres qui pourraient influencer sur le ratio n'a pas été étudié dans le cadre des travaux présentés ici. Les longueurs différentes de ces ouvrages, ainsi que les variations de la composition du trafic qui les traverse, sont toutefois des éléments qui peuvent expliquer les différences observées d'un tunnel à l'autre, différences qui restent malgré tout relativement faibles compte tenu de l'hétérogénéité des caractéristiques des ouvrages. En effet, le ratio médian est relativement homogène d'un tunnel à l'autre, avec 34 des 40 médianes calculées qui se situent entre 28 et 38 %.

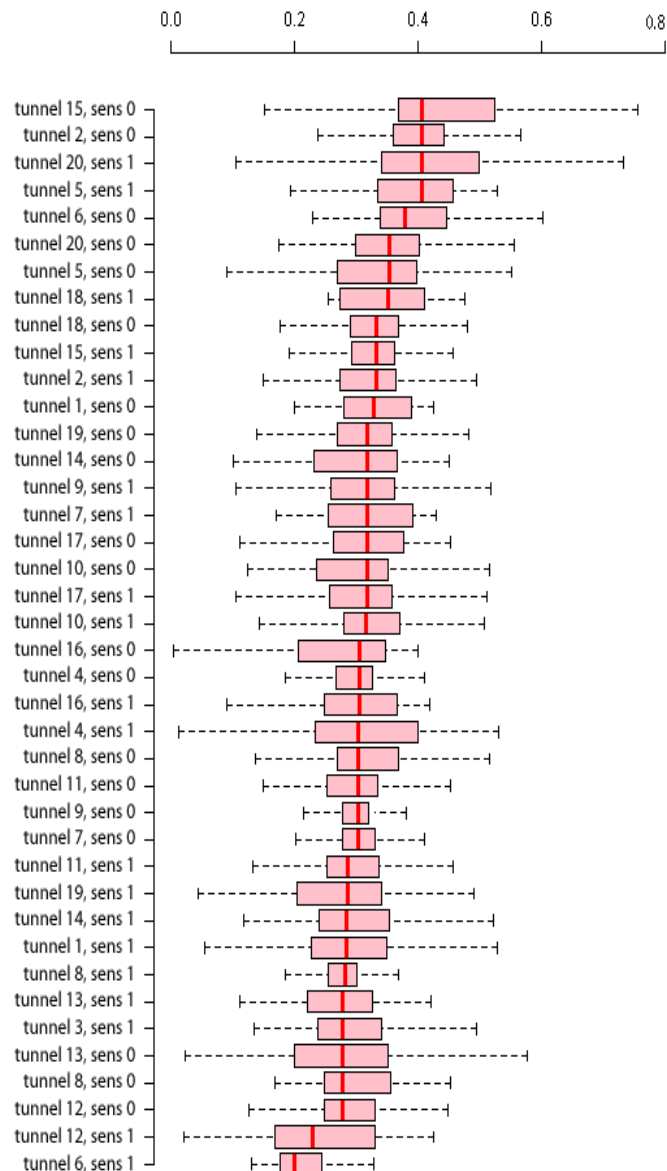


Figure 4. Diagrammes en boîte du ratio $[NO_2]/[NO_x]$ suite à des mesures embarquées dans différents tunnels franciliens.

Boxplot of $[NO_2]/[NO_x]$ ratio measured in the passenger compartment of a vehicle traveling through various tunnels.

Si l'on s'intéresse maintenant à la variation du ratio durant une traversée, il n'existe pas de tendance forte. Pour certains trajets, le ratio est remarquablement stable, alors que pour d'autres, il est perturbé. Ces perturbations ont a priori pour principale origine l'influence du véhicule qui précède, dont les émanations sont directement mesurées s'il est très proche. Ce phénomène a déjà été mis en évidence par des travaux d'Airparif (Airparif, 2007). Sur la figure 5, sont représentés des trajets au ratio stable et d'autres au ratio perturbé pour des traversées de deux tunnels distincts.

4. Mesures en station fixe : variation temporelle du ratio ?

Les mesures fixes en un point d'abscisse donné dans un tunnel, plus courantes, offrent par construction l'opportunité de ne pas être perturbées par le véhicule qui précède et sont essentiellement influencées par le flux global de trafic. Elles permettent d'apprécier par ailleurs les variations temporelles du ratio. Le tunnel n° 11 a fait l'objet d'une telle campagne entre le 18 octobre 2010 et le 9 novembre 2010. Ce tunnel a une longueur d'un peu plus de 2 km pour un trafic qui

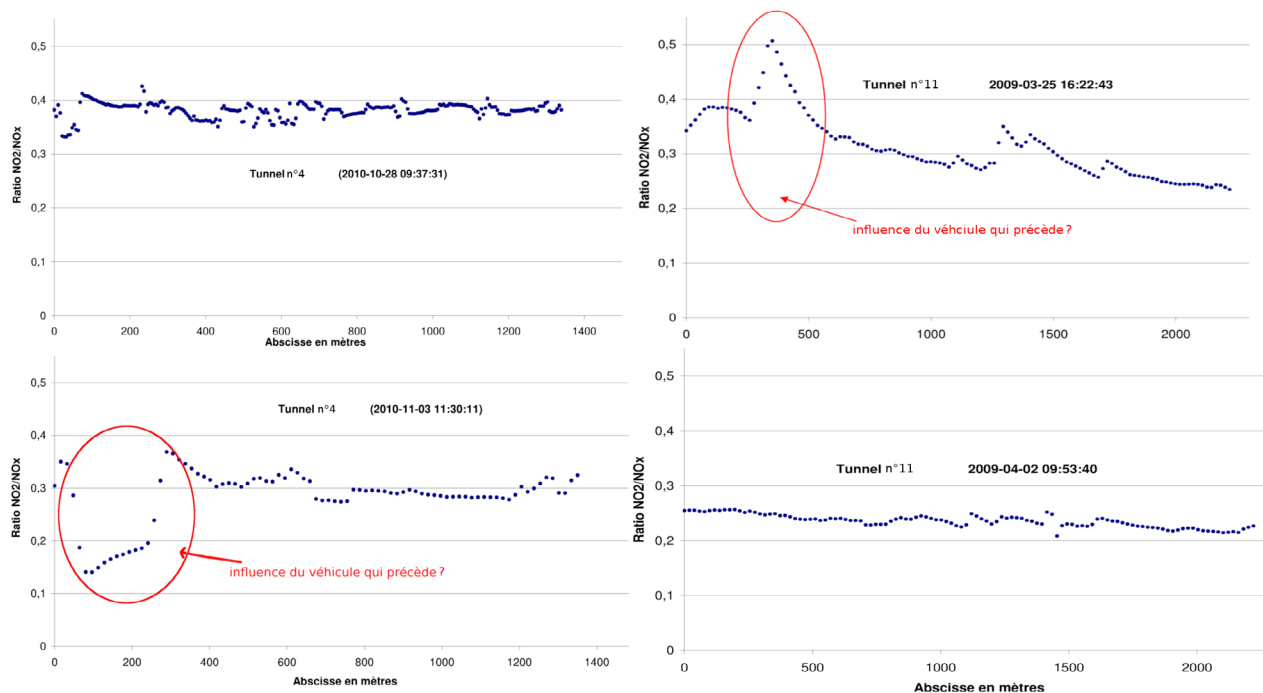


Figure 5. Ratio $[NO_2]/[NO_x]$ mesuré lors de traversées du tunnel n° 4 (à gauche) et du tunnel n° 11 (à droite).

Alors que le ratio est relativement stable pour certaines traversées, pour d'autres, il est perturbé.

$[NO_2]/[NO_x]$ ratio measured during the crossings of the tunnel No. 4 (left) and of the tunnel No. 11 (right). While the ratio is relatively stable for some crossings, for others it is disturbed.

Tableau 1. Grandeurs statistiques du ratio volumique $[NO_2]/[NO_x]$ extraites de mesures fixes dans le tunnel francilien n° 11, entre le 18 octobre 2010 et le 9 novembre 2010.

$[NO_2]/[NO_x]$ ratio statistics extracted from fixed measurements in the tunnel No.11 between October 18, 2010 and November 9, 2010.

Mesures fixes dans le tunnel n° 11, octobre-novembre 2010	
Moyenne	0,19
Ecart type	0,03
Max	0,34
Nbre mesures	2 123
Min	0,1
Percentile 02	0,13
Percentile 05	0,14
Percentile 25	0,17
Percentile 50	0,19
Percentile 75	0,21
Percentile 95	0,23
Percentile 98	0,25
Percentile 99.7	0,29

s'élève à 45 000 véhicules par jour par sens de circulation, dont 15 % de poids lourds.

Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un analyseur par chimiluminescence (APNA-HORIBA) placé dans une niche de sécurité à environ 400 m de la sortie du tunnel. Les variations du ratio $[\text{NO}_2]/[\text{NO}_x]$ ainsi observées, selon un pas de temps de 5 minutes, sont représentées sur la figure 6 qui suit, et les principales grandeurs statistiques sont pour leur part indiquées dans le tableau 1. La moitié des valeurs du ratio sont comprises entre 0,17 et 0,21, et même la valeur minimale est supérieure aux prescriptions du CSHPF (circulaire n° 99.329, ministère de la Santé, 1999). Ces résultats confortent à leur tour l'analyse selon laquelle le ratio $[\text{NO}_2]/[\text{NO}_x]$ a augmenté.

La médiane (0,19) est significativement plus faible que celle observée dans le cadre des mesures embarquées (0,31). Les échelles temporelles et géographiques différentes, mesures embarquées sur l'intégralité d'une traversée répétée à plusieurs reprises en période de pointe contre mesures fixes sur plusieurs jours incluant weekends et nuits, appareils de mesure de technologie identique mais de caractéristiques et de marques différentes, peuvent expliquer cet écart.

Cet écart peut aussi reposer sur les différences de niveaux qui peuvent exister entre l'intérieur de l'habitacle d'un véhicule et le bord immédiat de la voie dans un tunnel, ne serait-ce que du fait de l'influence du véhicule qui précède.

À la lecture des variations temporelles, on observe systématiquement une baisse du ratio en fin de nuit. Durant les 21 jours complets de mesure, le ratio atteint

un minimum journalier qui, selon les jours, se situe entre 4h45 et 7h30 du matin. Pour 17 des 21 jours, ce minimum est même spécifiquement observé entre 5h00 et 6h00 du matin. Ces variations pourraient s'expliquer en partie par le cycle de l'ozone. Compte tenu de l'absence de photochimie dans le tunnel, les seuls apports d'ozone envisageables sont ceux provenant des masses d'air extérieures. En journée, il y a donc des apports d'ozone par l'extérieur, ozone qui, dans le tunnel, se recombine avec le NO pour former du NO_2 . En journée, le ratio $[\text{NO}_2]/[\text{NO}_x]$ observé en tunnel serait donc plus élevé que le ratio moyen à l'échappement des véhicules. La nuit, l'absence de photochimie à l'extérieur réduit la source d'ozone qui tend à s'épuiser, si bien qu'en fin de nuit, la formation de NO_2 par réaction entre l'ozone et le NO est minimale. Cela se traduit par un minimum du ratio $[\text{NO}_2]/[\text{NO}_x]$. Ce ratio minimal observé de nuit en tunnel serait très proche du ratio moyen à l'échappement des véhicules, car peu influencé par des transformations chimiques. Ce constat est néanmoins à nuancer par l'effet de la présence des poids lourds, précisé ci-après, dont le pourcentage peut différer entre la nuit et la journée.

Le weekend se caractérise, pour sa part, par un ratio qui tend à être plus élevé, surtout le dimanche. L'interdiction de circulation des poids lourds le dimanche peut expliquer ce phénomène, dans la mesure où, à l'échappement de ces derniers, le ratio $[\text{NO}_2]/[\text{NO}_x]$ tend à être plus faible. Pour les véhicules légers diesel de norme euro 5, il est très variable selon les constructeurs automobiles et peut dépasser 50 % contre un ratio plutôt de l'ordre de 10 % pour la grande majorité des poids lourds de norme euro 5 (European Environment Agency, 2013). Cet aspect sera développé ultérieurement.

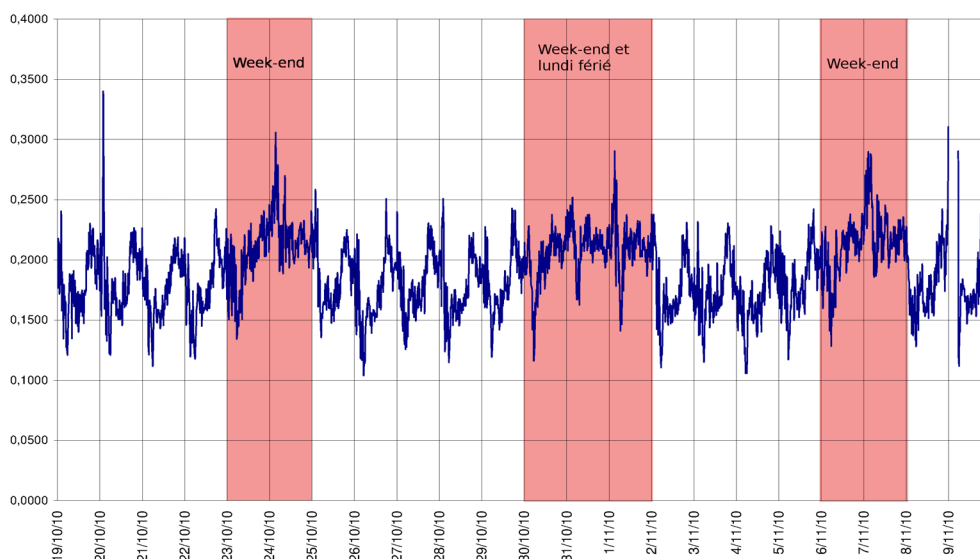


Figure 6. Variation du ratio $[\text{NO}_2]/[\text{NO}_x]$ dans le tunnel n° 11, entre le 19/10/2010 et le 09/11/2010.

Variation in the $[\text{NO}_2]/[\text{NO}_x]$ ratio in the tunnel N° . 11 between October 19, 2010 and November 9, 2010.

Des mesures fixes reposant sur un protocole sensiblement identique (mesure en continu – pas de temps d'acquisition de 5 minutes – avec un analyseur automatique de type thermo environmental 42C fonctionnant sur le principe de la chimiluminescence) ont été réalisées par le laboratoire central de la préfecture de police de Paris, du lundi 23 mars au dimanche 5 avril 2009 :

- dans le tunnel n° 4, long de 1 300 mètres environ, à 200 mètres de la sortie du tunnel ; ce tunnel accueille, dans le sens de circulation concerné, un trafic de 100 000 véhicules par jour en moyenne dont 8 % de poids lourds (Préfecture de Police, Laboratoire Central, pôle environnement, 2009b).
- dans le tunnel n° 20, long de 800 mètres environ, à 400 mètres après l'entrée du tunnel ; ce tunnel accueille, dans le sens de circulation concerné, un trafic de 65 000 véhicules par jour en moyenne dont 11 % de poids lourds (Préfecture de Police, Laboratoire Central, pôle environnement, 2009a) ; Les observations faites sur ces mesures vont dans le même sens que les observations faites dans le tunnel n° 11 :
- la moitié des valeurs du ratio $[\text{NO}_2]/[\text{NO}_x]$ sont comprises entre 0,19 et 0,24 dans le tunnel n° 4, entre 0,19 et 0,26 dans le tunnel n° 20 ;
- les variations temporelles indiquent un comportement du ratio différent le weekend des jours ouvrés. Sans nécessairement atteindre des valeurs plus élevées le weekend, le ratio connaît des valeurs minimales plus élevées qu'en jours ouvrés, ce qui pourrait s'expliquer

par une moindre présence des poids lourds.

5. Influence de la répartition VL-PL sur le ratio $[\text{NO}_2]/[\text{NO}_x]$

Afin d'approfondir la question de l'influence de la composition du trafic (part du trafic poids lourds) sur le ratio $[\text{NO}_2]/[\text{NO}_x]$, peuvent être citées deux campagnes réalisées indépendamment du programme Airturif :

- une campagne de mesure dans un tunnel urbain court interdit aux poids lourds, hors région Ile-de-France, en août 2011 ;
- une campagne de mesure dans un tunnel long autoroutier, en juin 2012.

Ces deux campagnes confirment l'hypothèse selon laquelle la répartition véhicules légers *versus* poids lourds (VL-PL) a une influence sur le ratio $[\text{NO}_2]/[\text{NO}_x]$.

La campagne de mesure dans le tunnel urbain en août 2011 donne des résultats significativement différents de ceux déjà présentés, avec des ratios très élevés (cf. figure 7 et tableau 2), mais qui trouvent une explication.

Ces valeurs élevées sont le fruit de la conjonction de différents phénomènes :

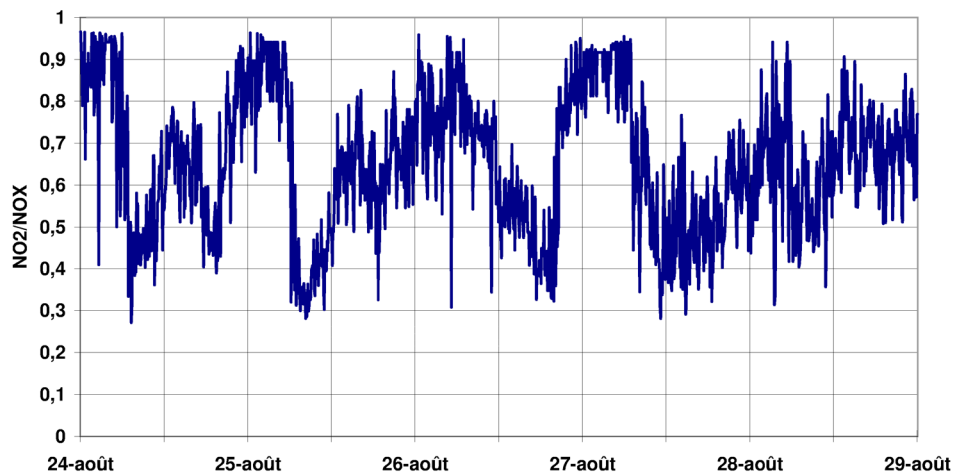
- un tunnel court, 330 mètres, qui laisse place à la prédominance des apports d'air extérieur donc à un ratio $[\text{NO}_2]/[\text{NO}_x]$ élevé ;

Tableau 2. Grandeurs statistiques du ratio volumique $[\text{NO}_2]/[\text{NO}_x]$ à l'issue de mesures fixes réalisées dans un tunnel urbain en août 2011.

$[\text{NO}_2]/[\text{NO}_x]$ ratio statistics extracted from fixed measurements in an urban tunnel in August 2011.

Mesures fixes dans un tunnel urbain en août 2011	
Moyenne	0,64
Ecart type	0,18
Max	0,97
Nbre mesures	2 092
Percentile 0	0,26
Percentile 02	0,31
Percentile 05	0,35
Percentile 25	0,50
Percentile 50	0,64
Percentile 75	0,78
Percentile 95	0,93
Percentile 98	0,94
Percentile 99.7	0,96

Figure 7. Variation du ratio $[NO_2]/[NO_x]$ dans le tunnel urbain entre le 24/08/2011 et le 29/08/2011.
Variation in the ratio $[NO_2]/[NO_x]$ in an urban tunnel between 24 and 29 August 2011.



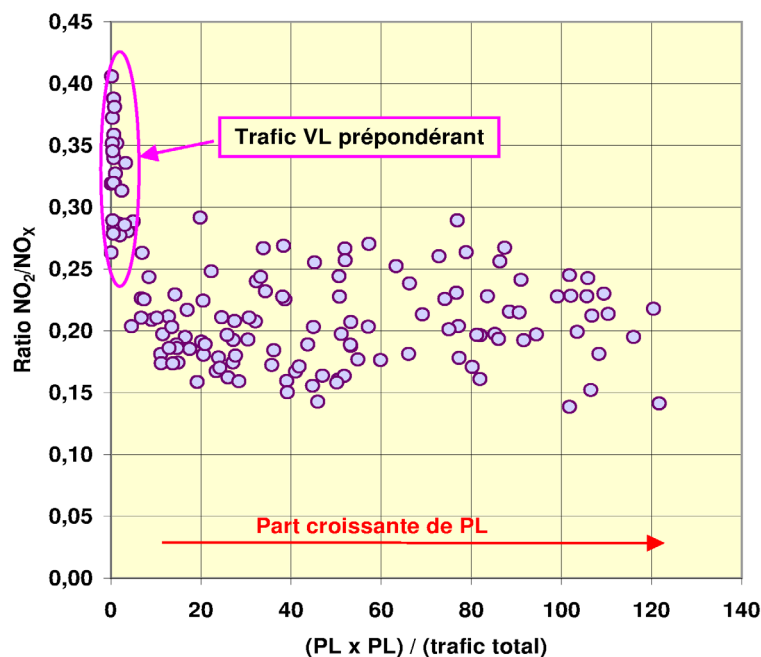
- un tunnel interdit aux poids lourds, alors même que ces derniers ont un ratio $[NO_2]/[NO_x]$ à l'échappement plus faible que les véhicules légers (European Environment Agency, 2013) ;
- une campagne de mesure réalisée en plein mois d'août et qui a favorisé l'oxydation du NO en NO_2 dans l'environnement extérieur, environnement extérieur dont l'influence est, pour cet ouvrage, presque toujours prédominante. En effet, en dehors des heures de pointe, les valeurs mesurées sont voisines de celles observées en fond urbain (ministère de l'Écologie, du Développement durable

et de l'Énergie, 2012), dépassant régulièrement 0,7. En heure de pointe, la source trafic devient prédominante, conduisant à une baisse du ratio.

Le tunnel autoroutier choisi offre, pour sa part, l'opportunité d'observer des situations très variées de répartition VL-PL entre jour de semaine (où le trafic PL atteint, voire dépasse, le trafic VL) et le weekend où le trafic PL est très faible.

Sur la figure 8, le ratio $[NO_2]/[NO_x]$ a été rapporté à un paramètre faisant ressortir les situations où le trafic PL

Figure 8. Tunnel autoroutier, juin 2012, sensibilité du ratio $[NO_2]/[NO_x]$ à la répartition VL-PL.
Motorway tunnel, June 2012, sensitivity of $[NO_2]/[NO_x]$ to the distribution trucks/light vehicles.



est prépondérant. Le paramètre retenu en abscisse pour mettre en évidence le trafic PL est le terme $PL^2 / (PL+VL)$ avec les variables PL et VL qui représentent respectivement le nombre de poids lourds et le nombre de véhicules légers. Les données sont des données horaires. Les ratios $[NO_2]/[NO_x]$ les plus élevés tendent à être observés lorsque les poids lourds sont très peu représentés dans le trafic.

Dans ce tunnel autoroutier, on observe ainsi avec les données issues de deux points de mesure situés à chaque tiers du tunnel :

- lorsque le trafic PL est majoritaire, une valeur médiane moyenne du ratio NO_2/NO_x de 0,20 [entre 0,18 et 0,23 pour 50 % du temps] ; les PL, aux émissions unitaires plus élevées que les VL, masquent la présence des VL dès qu'ils sont suffisamment représentés ;
- et, lorsque le trafic VL est majoritaire, avec un trafic PL faible, une valeur médiane moyenne de ratio NO_2/NO_x de 0,33 [entre 0,31 – 0,35 pour 50 % du temps].

6. Conclusion

Les mesures qui ont été effectuées ces dernières années en tunnel démontrent que le ratio $[NO_2]/[NO_x]$ a augmenté dans les tunnels routiers. Les valeurs données par le CSHPF qui estimait en 1999 à environ 10 le ratio $[NO]/[NO_2]$, c'est-à-dire à $1/11^e$ le ratio $[NO_2]/[NO_x]$, ne sont plus vérifiées. Ces observations rejoignent par ailleurs celles également faites à l'air libre en proximité des infrastructures routières et sont le fruit des évolutions des techniques de traitement des gaz à l'échappement des véhicules. En tunnel, les investigations sur le sujet se poursuivent dans la mesure où ces ouvrages constituent un lieu d'observation privilégié de la source « trafic ». La composition du trafic, et notamment la répartition véhicules légers/poids lourds, a une influence sur le ratio qui tend à être plus élevé en l'absence de poids lourds.

Références bibliographiques

Ministère de la Santé. (1999). Circulaire n° 99.329, 2 p.

Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France, (1998), *Qualité de l'air dans les ouvrages souterrains ou couverts*, 40 p.

Airparif. (2013). *La qualité de l'air en Ile-de-France en 2012*, 108 p.

Afsset, avis et rapport d'expertise collective. (2009). *Émissions de dioxyde d'azote de véhicules diesel, impact des technologies de post-traitement sur les émissions de dioxyde d'azote de véhicules diesel et aspects sanitaires associés*, 13 et 250 p.

Gouriou F., Morin J.-P., Weill M.-E. (2004). On-road measurements of particle number concentrations and size distributions in urban and tunnel environments. *Atmospheric Environment*, n° 38 (18), p. 2831-2840.

Airparif. (2007). *Mesure dans le flux de circulation, Étude exploratoire*, 35 p.

European Environment Agency. (2013). *Air pollutant emission inventory. Technical guidance to prepare national emission inventories, Exhaust emissions from road transport*, Guidebook, 156 p.

Préfecture de Police. (2009a). Laboratoire Central, pôle environnement. *Étude de la qualité de l'air dans le tunnel du Landy, rapport d'essai n° 158/09*, 97 p.

Préfecture de Police. (2009b), Laboratoire Central, pôle environnement, *Étude de la qualité de l'air dans le tunnel de Saint-Cloud, rapport d'essai n° 157/09*, 66 p.

Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie. (2012). Direction Générale de l'Énergie et du Climat, *Bilan de la qualité de l'air en France en 2011*, 50 p.