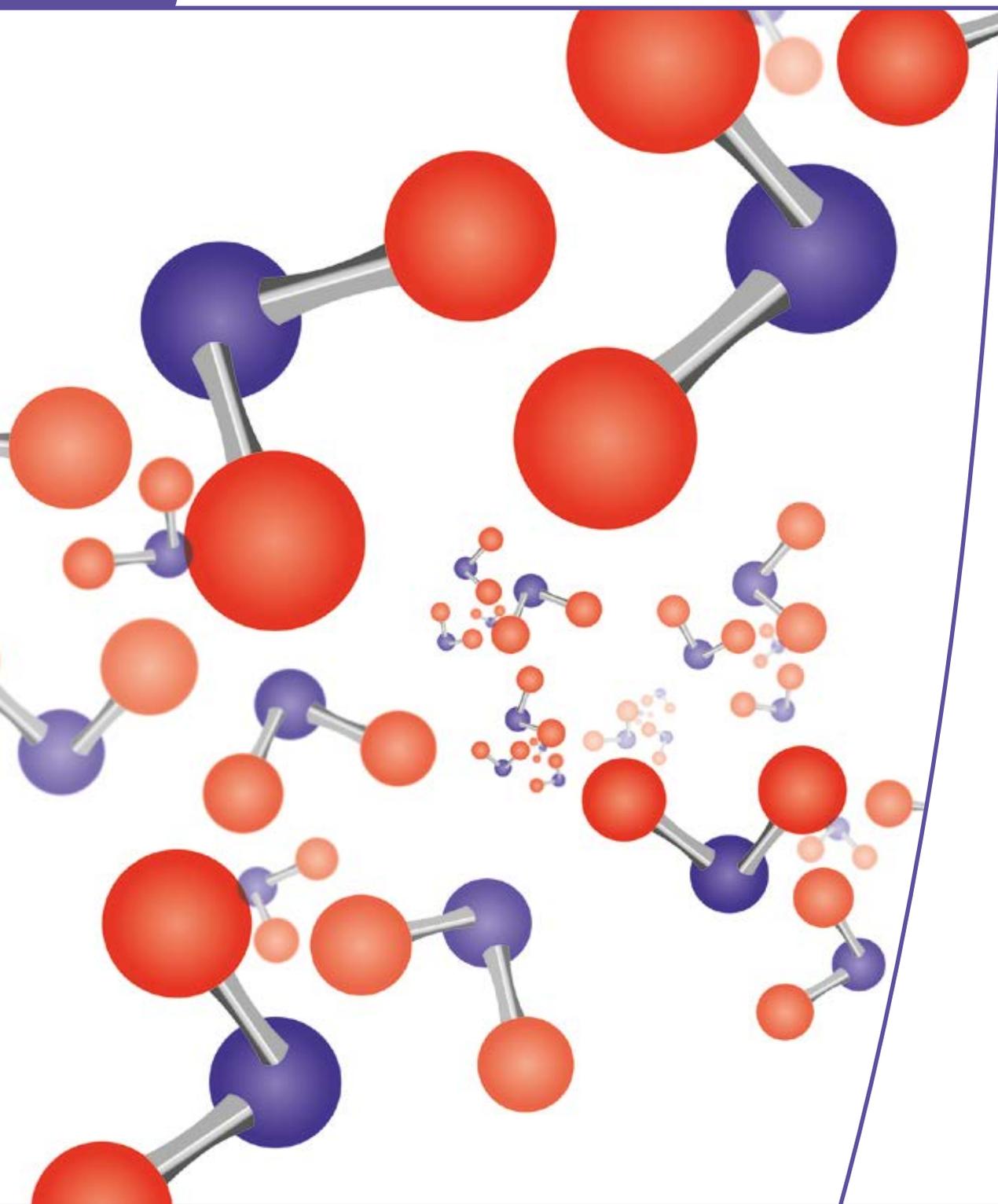
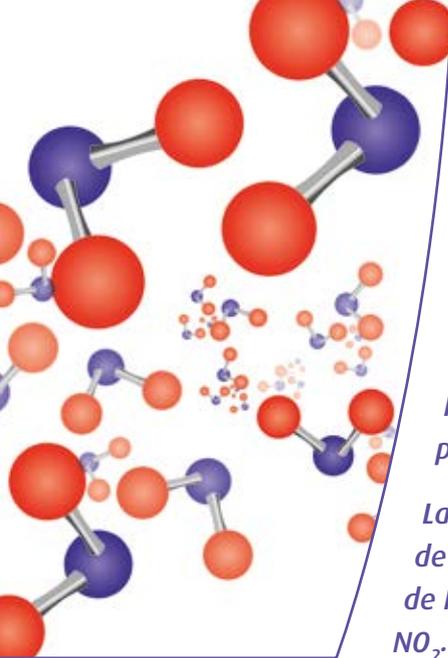


La détection et le contrôle du dioxyde d'azote dans les tunnels routiers



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
ET SOLIDAIRE



Le dioxyde d'azote (NO_2) est un polluant dont les émissions ne régressent pas en dépit des innovations technologiques observées sur le parc automobile roulant. Considéré comme toxique par l'OMS et les pouvoirs publics, il représente un enjeu sanitaire très important, d'autant plus qu'il est un gaz précurseur de particules secondaires (particules ultrafines formées après l'échappement) également néfastes. L'exposition au NO_2 est réglementée dans l'air ambiant ainsi que dans les tunnels routiers où certaines conditions potentiellement délicates (congestion du trafic, faible renouvellement naturel de l'air) peuvent conduire les usagers à des niveaux d'exposition à ne pas négliger.

La dilution des polluants par apport d'air frais permet d'assurer une bonne qualité de l'air, à condition de maîtriser rigoureusement la chaîne de contrôle commande de la ventilation sanitaire, et tout particulièrement la mesure des concentrations en NO_2 . Le CETU a étudié la problématique de la détection des oxydes d'azote en tunnel routier afin de proposer des solutions qui éviteraient soit de surestimer chroniquement les niveaux de NO_2 , soit d'en ignorer régulièrement les dépassements réglementaires.

En 1999, lorsque les niveaux de NO_2 en tunnel ont été réglementés, il était admis de pouvoir estimer les concentrations de ce polluant par l'intermédiaire de la mesure du monoxyde d'azote (NO), plus facile à mesurer. Aujourd'hui, la détermination directe des concentrations en NO_2 doit être préconisée, car le ratio prédéfini utilisé jusqu'à présent pour convertir le NO en NO_2 n'est plus valable. En effet, toutes les campagnes de mesure réalisées ces dix dernières années ont indiqué que le rapport NO/NO_2 n'était plus égal à 10, mais plutôt compris dans une fourchette de 3 à 5 tout en étant très fluctuant. En outre, grâce aux évolutions météorologiques, la mesure du NO_2 est désormais plus fiable qu'en 1999.

Pour toutes ces raisons, les tunnels routiers doivent désormais être équipés de détecteurs de NO_2 qui peuvent être choisis parmi deux grandes familles d'appareils : les cellules électrochimiques ou les appareils à mesure optique. Cette note d'information présente les atouts et les limites des deux catégories de capteurs, compare leurs contraintes respectives d'utilisation et fournit des éléments d'aide au choix.

Table des matières

1 . La réglementation applicable aux oxydes d'azote en tunnel routier	3
2 . Les niveaux d'oxydes d'azote en tunnel routier	3
3 . Les détecteurs de dioxyde d'azote pour la gestion de la qualité de l'air en tunnel routier	5
4 . Choix du type d'appareil de détection du NO_2 en tunnel routier	7
5 . Principes d'implantation et d'utilisation	8
6 . Bibliographie	11

Avertissement : Les notes d'information ont pour but de fournir une information sur une technique ou un problème nouveau ou insuffisamment traité par ailleurs. Le lecteur pourra y trouver des repères susceptibles de l'aider dans son activité. Bien que le maximum soit fait pour s'assurer de la fiabilité des sources utilisées, la responsabilité du CETU ou des auteurs du document ne saurait être engagée.

1 La réglementation applicable aux oxydes d'azote en tunnel routier

1.1 Seuil limite de NO₂ fixé par la circulaire n°99-329 du 8 juin 1999

La circulaire n° 99-329 du 8 juin 1999 du ministère de la santé impose de respecter, dans les ouvrages souterrains ou couverts, les critères fixés par le Conseil supérieur d'hygiène publique de France (CSHPF) dans son avis du 14 décembre 1998, pour le dioxyde de carbone (CO) et le dioxyde d'azote (NO₂).

Dans les tunnels routiers et les voiries souterraines, concernant le NO₂, le CSHPF a retenu le critère suivant :

- la teneur moyenne en NO₂ sur toute la longueur de l'ouvrage ne doit pas dépasser 0,4 ppm¹ (800 µg/m³) sur toute période de 15 minutes.

1.2 Contrôle des niveaux de NO₂ par extrapolation des niveaux de NO – Utilisation du rapport NO/NO₂

Deux types d'oxydes d'azote sont issus du trafic routier :

- le monoxyde d'azote (NO),
- le dioxyde d'azote (NO₂).

La somme de ces deux polluants NO et NO₂ est communément appelée NO_x. Les NO_x sont principalement émis par les moteurs diesel, ils constituent actuellement un bon traceur de la pollution automobile, à la différence du CO dont les émissions ont énormément régressé.

1- 1 ppm signifie une partie par million en volume, soit 1 cm³ pour 1 m³

Pour des raisons de toxicité, seul le NO₂ a été réglementé. Le NO n'a pour sa part pas fait l'objet de recommandation.

Toutefois, le CSHPF avait indiqué dans son avis du 14 décembre 1998 que le NO pouvait être détecté en lieu et place du NO₂. Cette souplesse avait été admise car le CSHPF avait estimé que le NO était plus facilement mesurable en raison de concentrations beaucoup plus élevées que celles du NO₂.

En 1998, il n'existait en effet pas d'appareil de détection à la fois suffisamment sensible et précis pour mesurer les niveaux de NO₂ présents en tunnel, ni suffisamment robuste et simple de fonctionnement pour résister à l'ambiance agressive des tunnels et s'adapter aux contraintes de maintenance et d'exploitation.

Afin de pouvoir estimer le niveau de NO₂ à partir du niveau mesuré de NO, le CSHPF avait alors préconisé d'appliquer un rapport NO/NO₂ de 10 (soit un ratio NO₂/NO_x de 1/11 ≈ 0,09). Ce rapport avait été déterminé expérimentalement, pour les tunnels routiers, à l'appui de multiples mesures effectuées au cours des années 1990. Il avait ainsi été introduit, pour le NO, un seuil équivalent de 4 ppm (5 mg/m³), à ne pas dépasser en valeur moyenne sur toute la longueur de l'ouvrage et sur toute période de 15 minutes.

Suite à la parution de la circulaire 99-329, les tunnels ont progressivement été équipés de moyens de détection des NO_x afin de piloter la ventilation sanitaire. Les appareils mis en place ont d'abord été presque exclusivement des cellules électrochimiques de NO puis, progressivement, grâce aux progrès technologiques, les détecteurs de NO₂ leur ont été préférés.

2 Les niveaux d'oxydes d'azote en tunnel routier

2.1 État des lieux

Au cours des vingt dernières années, le CETU a mené des campagnes de mesure de NO_x dans des tunnels de typologies variées. Ces mesures, qui ont été réalisées à l'aide d'analyseurs par chimiluminescence, ont montré que la nature de la pollution aux NO_x avait significativement évolué¹. Les enseignements que l'on peut tirer de ces mesures sont les suivants et sont illustrés par les Figures 1, 2, 3 et 4 :

- le niveau global de la pollution au NO₂ est demeuré stable ces dernières années tandis que celui de NO a sensiblement diminué ;
- en conséquence, le ratio NO₂/NO_x est désormais supérieur à 1/11 ≈ 0,09 et souvent compris entre 0,15 et 0,3. En l'absence de poids lourds, ce ratio est encore plus élevé, il peut parfois être supérieur à 0,5.
- le rapport NO/NO₂ est extrêmement variable ; non seulement il varie d'un tunnel à l'autre, mais dans un tunnel donné, il varie d'un jour à l'autre ou même d'une heure à l'autre.

Pour sa part, l'association mondiale de la route (AIPCR) a elle aussi constaté «une augmentation significative du pourcentage de production primaire de NO₂» au détriment de la part de NO, et a intégré cette nouvelle donnée dans ses recommandations sur le dimensionnement de la ventilation sanitaire². La problématique

de l'évolution de la pollution aux oxydes d'azote a également été étudiée avec attention par d'autres organismes comme, par exemple, en Norvège, avec des conclusions similaires³.

Ces évolutions ne sont pas spécifiques aux tunnels et ont aussi été mises en évidence par de nombreuses mesures réalisées à l'air libre, dans des zones sous forte influence de la pollution routière Figure 5. Ainsi, ces mesures montrent une tendance nette à la baisse des niveaux moyens des NO_x et du NO, tandis qu'on peut observer une relative stagnation des niveaux de NO₂.

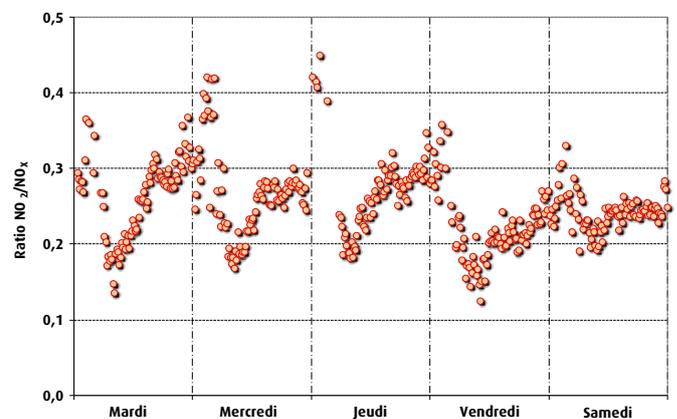


Figure 1: évolution quart-horaire du ratio NO₂/NO_x dans un tunnel urbain [4000 m environ] - Mesures CETU (2017)

1 - Observation du ratio [NO₂]/[NO_x] en tunnels routiers - Bernagaud & al. - Pollution Atmosphérique (2014)

2 - AIPCR (2012) : Tunnels routiers - Émissions des véhicules et besoins en air pour la ventilation (p12)

3 - NO₂/NO_x volume ratio in three tunnels in Norway - Norwegian Public Roads Administration (2013)

2.2 Interprétation

Les niveaux observés en tunnel sont le résultat de plusieurs phénomènes parallèles, agissant dans le même sens ou ayant des effets contraires, de façon très variable selon les axes routiers :

- le gain procuré par la baisse des émissions unitaires imposée par les normes EURO qui compense, au moins en partie, la croissance globale du trafic routier ;
- une ventilation sanitaire parfois insuffisante, du fait de l'utilisation d'un rapport NO/NO_2 inadapté conduisant à une sous-estimation des niveaux de NO_2 ;
- le fort accroissement de la part du diesel, - plus fortement émetteur de NO_x que l'essence - dans le parc automobile en circulation⁴ ;
- des émissions réelles en circulation nettement supérieures aux limites exigées par les normes EURO⁵.

Au cours des vingt dernières années, la diminution du rapport NO/NO_2 peut s'expliquer par⁶ :

- des solutions technologiques imparfaites pour maîtriser simultanément les niveaux d'émissions de particules et de NO_x :
 - la généralisation des catalyseurs d'oxydation (pots catalytiques) qui a permis une réduction très forte des émissions de CO et d'hydrocarbures (HC), tout en augmentant celles du NO_2 ;

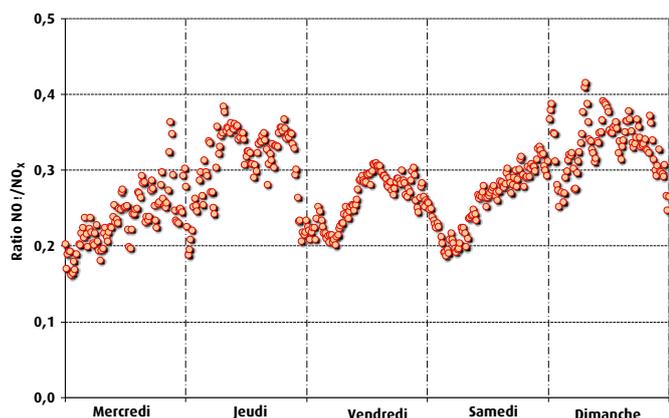


Figure 2 : évolution quart-heure du ratio NO_2/NO_x dans un tunnel interurbain long - Mesures CETU (2016)

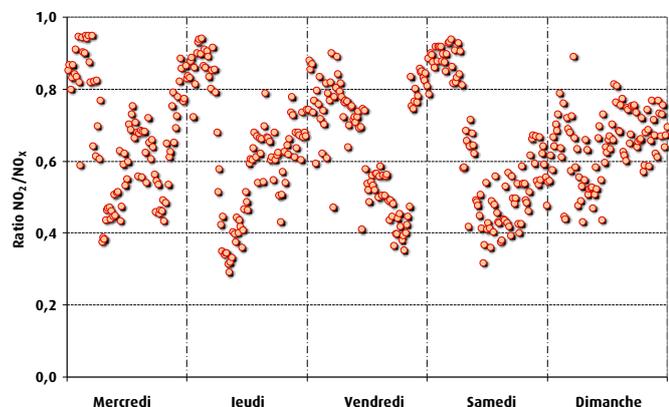


Figure 3 : évolution quart-heure du ratio NO_2/NO_x dans un tunnel urbain court [330 m] - Mesures CETU (2010)

- l'introduction des filtres à particules (FAP) qui, selon la technologie employée pour leur régénération, a pu conduire à une augmentation des émissions de NO_2 ;

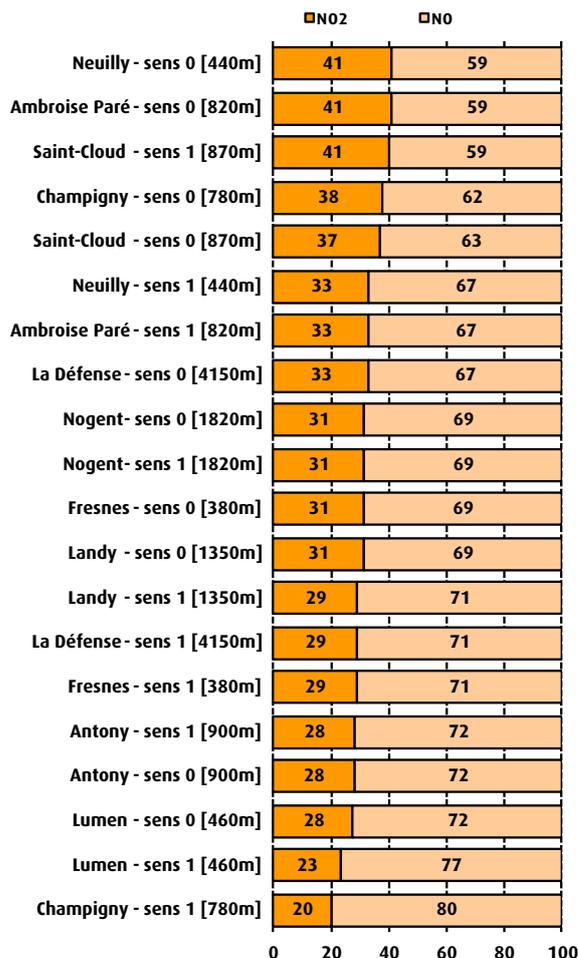


Figure 4 : répartition des niveaux de NO_2 et de NO mesurés en 2009 dans un panel de 20 tunnels urbains (mesures réalisées dans l'habitacle d'un véhicule, moyennées sur plusieurs passages, avec distinction des sens de circulation) - Mesures CERTAM-CEREMA-CETU (programme AIRTURIF)

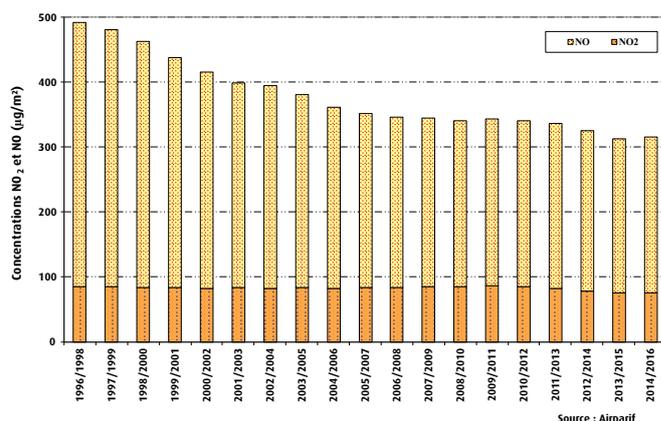


Figure 5 : évolution de la moyenne sur trois ans en NO et en NO_2 de cinq stations de mesure en situation de proximité au trafic dans l'agglomération parisienne - Mesures Airparif (1996-2016)

4- «Les émissions des transports routiers proviennent à 89% des véhicules Diesel (poids lourds Diesel : 41%, véhicules particuliers Diesel catalysés 33%, véhicules utilitaires légers Diesel catalysés 15%)» - CITEPA / format SECTEN (2013)

5 - «La sévèrification des seuils d'émissions des NO_x des voitures Diesel n'a pas permis de diminuer les émissions réelles de ces véhicules à l'usage» - ADEME (2014) : Émissions de particules et de NO_x par les véhicules routiers

6 - AFSSET (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

- des normes EURO qui ne portent que sur les NO_x totaux, ce qui a permis aux constructeurs automobiles de faire homologuer des véhicules avec des émissions de NO_x en baisse, mais avec une fraction de NO₂ en hausse, par rapport à la génération de véhicules précédente.

Les mesures actuelles montrent que de nombreux paramètres influencent les variations du ratio NO₂/NO_x, selon les tunnels, les saisons ou les moments de la journée :

- la composition du trafic et notamment la part de poids-lourds, mais aussi les proportions de véhicules diesel ou essence, la classe EURO, l'état d'entretien des véhicules, etc. ;
- l'emplacement du point d'observation et la longueur du tunnel, en raison d'apports de polluants extérieurs (ozone et NO₂) en journée. Pour les tunnels courts, on a pu observer un ratio NO₂/NO_x proche de 0,5 ;
- les conditions de circulation (vitesse moyenne, circulation fluide ou succession d'accélération et décélération, moteurs froids ou chauds, etc.) et la température ambiante.

2.3 Conséquences des évolutions observées

Les mesures qui ont été effectuées ces dernières années en tunnel démontrent que le contrôle de la pollution au NO₂ par la détection du NO et l'utilisation du rapport NO/NO₂ = 10 (soit un ratio NO₂/NO_x de 1/11 ≈ 0,09) ne sont plus adaptés.

Le rapport de 10, trop fort, conduit à sous-estimer les niveaux de NO₂. De plus, la baisse très sensible des niveaux de NO rend leur mesure difficile, les niveaux actuels se rapprochant des seuils de détection des appareils utilisés couramment, ce qui peut conduire autant à une sous-estimation qu'à une surestimation du NO et finalement du NO₂.

La détermination directe des concentrations en NO₂ est désormais la solution la plus pertinente et doit donc être généralisée. Cela est désormais possible grâce aux nets progrès technologiques réalisés sur les détecteurs de NO₂.

3

Les détecteurs de dioxyde d'azote pour la gestion de la qualité de l'air en tunnel routier

Deux types de matériels pour la détection du NO₂ sont actuellement déployés en tunnel routier :

- les cellules électrochimiques, basées sur le principe de l'adsorption du polluant recherché, provoquant la formation d'un courant électrique dans un électrolyte ;
- les appareils de type optique, utilisant les propriétés d'absorption du NO₂ pour des longueurs d'onde spécifiques dans le proche ultra-violet.

3.1 Les cellules électrochimiques

3.1.1 Historique

Les cellules électrochimiques ont été largement installées en tunnel depuis une trentaine d'années pour le contrôle des niveaux de CO, du fait de leurs faibles coûts d'installation et de maintenance, ainsi que pour leur robustesse. En outre, le seuil réglementaire pour ce polluant est compatible avec les gammes de mesure des appareils sur le marché qui conviennent donc très bien pour la détection du CO en tunnel routier.

Lorsque la circulaire 99-329 avait imposé de contrôler les niveaux de NO₂ dans les ouvrages souterrains, les appareils de détection qui avaient été mis en place étaient de type électrochimique. Seules des cellules de NO avaient été utilisées, du fait de la prépondérance du NO en tunnel routier - les niveaux de NO étaient alors 10 fois supérieurs à ceux de NO₂ - et de l'inadéquation des cellules électrochimiques NO₂ aux faibles niveaux de ce polluant.

Depuis 1999, les performances intrinsèques des cellules électrochimiques NO₂ ont remarquablement progressé (meilleure immunité aux interférents gazeux, meilleure sensibilité) et les meilleures d'entre elles permettent d'obtenir une «qualité de mesure» équivalente à celle des cellules électrochimiques NO. En parallèle, la baisse des niveaux de NO a depuis rendu moins pertinente la mesure de ce polluant. Enfin, la détermination des niveaux de NO₂ ne peut plus être extrapolée des niveaux de NO à partir du rapport NO/NO₂, dont la valeur est désormais très fluctuante.

Désormais, au regard :

- des progrès technologiques récents sur les cellules électrochimiques NO₂,
- des baisses significatives des niveaux de NO (mais pas de NO₂) observées ces dernières années en tunnel,
- des évolutions et des fluctuations du rapport NO/NO₂,

il est préconisé de ne plus utiliser de cellule électrochimique NO, mais de leur préférer les cellules électrochimiques NO₂, lorsque la technologie de détection par cellule électrochimique peut être retenue (cf. 4.3), qu'il s'agisse d'une installation nouvelle ou d'un renouvellement.

3.1.2 Des atouts et des limites

Conçues à l'origine pour des applications industrielles, les étendues de mesure des cellules électrochimiques sont en général supérieures aux gammes de concentrations en polluants présentes en tunnel. En outre, il existe un seuil de détection en-dessous duquel la mesure n'est plus possible, ce qui restreint le choix des modèles utilisables en tunnel routier.

Si on les compare avec les analyseurs communément utilisés par les réseaux de surveillance de qualité de l'air, les cellules électrochimiques sont des instruments relativement simples, adaptés aux conditions environnementales sévères et aux contraintes d'exploitation des tunnels routiers. Elles ont toutefois des performances métrologiques moindres, et leur robustesse ne les dispense pas d'un entretien rigoureux (dérives et durée de vie limitée).

Les spécifications techniques de ces appareils doivent donc être analysées avec la plus grande attention en gardant à l'esprit qu'elles ont été établies dans un environnement de laboratoire et que leurs performances sont susceptibles de se dégrader significativement dans les sévères conditions d'utilisation propres aux tunnels routiers.

Des détecteurs à utiliser avec précaution :

« Ces détecteurs sont influencés par la température et l'hygrométrie. Des températures basses (à partir de 0°C) peuvent inhiber l'efficacité de certains détecteurs, tandis qu'une température haute (à partir de 30°C) peut générer des défauts (même lorsqu'une compensation en température est implémentée). Une faible hygrométrie a pour conséquence un dessèchement de la cellule, la rendant ainsi inefficace. Ce phénomène est réversible. Une pression inférieure à la pression présente au moment du calibrage influe sur la réponse, avec une sous-estimation de la concentration présente de quelques pourcents à plusieurs dizaines de pourcents, suivant la différence de pression. La durée de vie des capteurs est de l'ordre de quelques mois à 24 mois, en fonction du contexte d'utilisation, dans le cas d'un entretien optimal. »¹

« Les gaz de fumée contiennent le plus souvent des particules solides. Il faut les préfiltrer. Sinon, les mesures risquent d'être faussées très rapidement, en raison de l'encrassement des membranes et des capillaires, au point même d'endommager les capteurs. »²

3.1.3 Les cellules électrochimiques NO₂

La détection du NO₂ en tunnel est confrontée aux limites métrologiques des détecteurs électrochimiques NO₂. Ainsi, dans les meilleurs des cas, avec des valeurs annoncées de 0,2 à 0,3 ppm, le seuil de détection reste très proche du seuil réglementaire de 0,4 ppm, alors qu'il serait souhaitable que ce seuil de détection reste inférieur à 0,05 ppm.

Les niveaux de polluants que l'on souhaite observer sont à la fois très faibles par rapport aux gammes de mesure les plus basses des meilleurs modèles sur le marché (quelques pourcents de l'étendue de mesure), et très souvent voisins du seuil minimal de détection. Enfin de nombreuses dérives du zéro (long terme, humidité, température, etc.) peuvent rapidement conduire à des incertitudes très importantes par rapport aux concentrations à mesurer. Les cellules électrochimiques NO₂ ne peuvent être utilisées en tunnel qu'avec précautions et sans perdre de vue leurs limites métrologiques.

Sur le marché français, plusieurs constructeurs (Dräger, Pillard, Sick...) proposent des cellules électrochimiques NO₂. Pour tous les fabricants, le principe de mesure est le même, chacun d'eux développant des solutions techniques particulières destinées à mieux répondre aux besoins variés des exploitants de tunnels routiers.



Figure 6: cellules électrochimiques NO₂
(1) DRAGER Polytron 7000
(2) FIVES PILLARD Nocostop

Dans la lignée de tous les progrès technologiques déjà obtenus sur ces produits, certains constructeurs développent actuellement de nouveaux modèles aux performances et sensibilités améliorées, dont il faudra toutefois vérifier l'aptitude sur le terrain à la détection en tunnel.

3.2 Les détecteurs de type optique

Les détecteurs de NO₂ de type optique sont apparus plus récemment (2006-2007) sur le marché des équipements de tunnel. Trois fabricants proposent aujourd'hui en France ce type d'appareil : CODEL, SICK et TUNNEL SENSORS.

De manière générale, les faibles niveaux d'exigence des cahiers des charges pour la détection du NO₂ en tunnel routier en France n'ont pas permis aux détecteurs de NO₂ de type optique de beaucoup pénétrer le marché français. À ce jour, uniquement une vingtaine d'appareils ont été installés, tous de marque CODEL. Le retour d'expérience pour ce type de matériel est ainsi plus limité que pour les cellules électrochimiques.



Figure 7: détecteurs de NO₂ de type optique
(1) CODEL TunnelTech 205
(2) SICK Vicotec 320
(3) Tunnel Sensors Viconox

Deux technologies différentes sont utilisées :

- mesure de l'absorption par le NO₂ d'un faisceau lumineux monochromatique émis par une LED bleue, avec deux variantes :
 - pour CODEL, la mesure est effectuée dans une cellule de 1 mètre de longueur à l'intérieur de laquelle se diffusent les gaz ;
 - pour TUNNEL SENSORS la mesure est réalisée directement dans l'atmosphère du tunnel grâce à un émetteur et un réflecteur distinct placé à dix mètres ;
- mesure par Spectroscopie d'Absorption Optique Différentielle (DOAS) dans le spectre du proche ultra-violet pour SICK.

En comparaison avec les cellules électrochimiques, ces matériels offrent des spécifications métrologiques bien meilleures (seuil de détection, incertitudes, dérives...). En outre, ils sont dotés d'une fonction d'autocalibration qui assure une bien meilleure stabilité et les immunise contre les dérives. D'autre part, la fréquence de leur maintenance est inférieure (1 an préconisé).

Ainsi les détecteurs de type optique sont a priori mieux adaptés que les cellules électrochimiques pour la détection du NO₂ en tunnel routier.

3.3 Principales spécifications techniques pour la détection du NO₂ en tunnel routier

Afin de disposer d'un outil permettant d'indiquer de manière fiable les évolutions des concentrations en NO₂ dans des tunnels routiers en exploitation, il convient de sélectionner des appareils répondant aux critères suivant :

- étendue de mesure, seuil de détection, sensibilité, temps de réponse, insensibilité aux interférents adaptés aux concentrations et vitesses d'évolution des phénomènes à observer ;

1 - Rapport d'étude INERIS (2009) «Principes et techniques pour la détection des gaz»

2 - www.euro-index.be : «Mesure des émissions par capteurs électrochimiques de gaz» d'après Dr. Karl-Heinz Pettinger (Compur Monitors Sensor Technology GmbH): "Emissionsmessung mit elektrochemischen Gassensoren"

- maîtrise des dérives au cours du temps, soit par un système d'auto-calibration, soit par des dérives largement inférieures aux valeurs à mesurer ;
- conditions, fréquence et coûts de maintenance et de calibration compatibles avec les contraintes d'exploitation ;
- durée de vie des principaux éléments suffisamment longue.

Ces critères doivent figurer sous forme de spécifications techniques précises dans les cahiers des charges. Le tableau ci-dessous fournit des préconisations type qui répondent aux exigences de la détection du NO₂ en tunnel routier.

Les détecteurs de type optique répondent bien à ces exigences, ce qui n'est pas encore complètement le cas pour les cellules électrochimiques.

Étendue de mesure	0 à 2 ppm (à adapter éventuellement pour des cas de tunnels très spécifiques)
Seuil de détection	≤ 0,05 ppm (50 ppb)
Sensibilité	≤ 0,05 ppm (50 ppb)
Temps de réponse	300 secondes maxi
Reproductibilité du zéro	≤ ± 0,05 ppm (50 ppb)
Dérive à long terme	≤ ± 0,05 ppm (50 ppb) / mois
Influence de l'humidité sur le zéro	≤ ± 0,005 ppm (5 ppb) / %HR
Influence de la température sur le zéro	≤ ± 0,005 ppm (5 ppb) / °C
Intervalles entre deux calibrations ou entre deux maintenances	Souhaitable : 12 mois Minimum : 3 mois

Caractéristiques minimales souhaitables pour un détecteur NO₂ en tunnel routier.

4 Choix du type d'appareil de détection du NO₂ en tunnel routier

4.1 Critères techniques

Les caractéristiques métrologiques des détecteurs de type optique s'avèrent supérieures à celles des cellules électrochimiques, mais elles sont surtout mieux appropriées au besoin (seuils de détection, échelles de mesure, dérives...) D'autre part, ces appareils sont mieux adaptés aux contraintes environnementales et d'exploitation (maintenance) rencontrées en tunnel routier.

Du strict point de vue technique, l'installation d'appareils de type optique serait donc à préconiser systématiquement.

4.2 Critères de coût

En dépit de caractéristiques techniques inférieures, les cellules électrochimiques sont très majoritairement installées dans les tunnels routiers français au détriment des détecteurs de type optique, du fait de coûts à l'achat largement favorables. Ce choix financier ne prend pas en considération les coûts liés à la maintenance et élude l'impact négatif de performances métrologiques dégradées et ses conséquences sur les coûts d'exploitation (risque de sur-utilisation de la ventilation sanitaire).

4.2.1 Coût d'investissement

Sur la base d'appels d'offres récents, on constate que le coût à l'achat des détecteurs de type optique reste à ce jour relativement élevé et dépendant du modèle. Le détecteur optique NO₂ peut parfois en outre être couplé avec un opacimètre ou un détecteur de CO, ce qui impacte aussi le prix.

A titre indicatif, le coût de fourniture et pose observé dans des appels d'offre récents est de l'ordre de 15 à 20 k€ HT, contre 1 à 2 k€ pour les cellules électrochimiques NO₂.

Seules les cellules électrochimiques les plus performantes – mais qui ne sont pas les moins onéreuses – possèdent des spécifications

techniques qui s'approchent de celles données au paragraphe 3.3. Certains fabricants proposent dans leur gamme de tels produits, mieux adaptés aux tunnels routiers.

4.2.2 Coût de maintenance

Il s'agit des coûts de remplacement des pièces d'usure et de tests et calibrations des appareils, auxquels il faut rajouter tous les coûts liés aux sujétions d'intervention en tunnel.

Le retour d'expérience sur les cellules électrochimiques CO montre une très bonne fiabilité de ces appareils en tunnel, avec un coût faible tant pour les consommables (cellules ou filtre) que pour l'intervention.

Ce constat peut être en partie transposé aux cellules électrochimiques NO₂, le coût unitaire des consommables restant similaire à celui des détecteurs de CO. Cependant :

- la fréquence d'intervention doit être trimestrielle plutôt qu'annuelle pour pouvoir gérer les risques de dérives ;
- les cellules doivent être changées plus souvent en raison d'un usage aux limites des possibilités de ce type d'appareil ;
- les interventions de calibration doivent être très soignées et effectuées par des techniciens parfaitement formés, car le réglage du zéro de ces détecteurs est extrêmement délicat et sensible, et ne tolère pas le moindre écart¹.

Une maintenance annuelle² est préconisée par les constructeurs des appareils de type optique, mais son contenu est très variable d'un constructeur à l'autre selon le degré de technicité exigé.

En l'état du retour d'expérience actuel portant principalement sur les appareils de la marque CODEL, cet appareil nécessite un contrôle annuel consistant à :

- la surveillance de l'état de la source lumineuse (LED bleue), avec un changement tous les 5 à 10 ans ;

¹ - Le réglage des cellules électrochimiques NO₂ consiste à calibrer le zéro et la sensibilité en utilisant deux bouteilles différentes de gaz titrés. Dans l'environnement spécifique des tunnels routiers, un contrôle au moins trimestriel est à préconiser.

² - A adapter selon la vitesse d'encombrement de l'ouvrage.

- un nettoyage soigné des ouïes d'entrées (métal fritté) de la chambre de mesure ;
- éventuellement, une calibration de l'appareil avec un gaz étalon.

De manière générale, le niveau de technicité exigé pour la maintenance des détecteurs de NO₂, qu'ils soient de type optique ou électrochimique, nécessite l'intervention d'un technicien qualifié, en général un prestataire spécialiste dont il convient d'évaluer le budget d'intervention avant investissement. Le coût de maintenance doit être pris en compte lors du choix du capteur.

4.2.3 Coût d'exploitation

La ventilation sanitaire peut représenter, dans certains tunnels, une part importante du poste budgétaire d'exploitation. Sa durée de fonctionnement est susceptible d'être impactée très directement par la qualité de la détection du NO₂.

Pour ce polluant, le seuil de détection des cellules électrochimiques étant très proche de la valeur réglementaire à respecter, les dérives de ces appareils – notamment du zéro – font qu'il existe un risque sérieux de surestimation des niveaux de NO₂ pouvant provoquer une sur-ventilation chronique de l'ouvrage, donc une sur-consommation d'énergie et un surcoût d'exploitation.

Les appareils optiques de détection du NO₂, qui ont un meilleur seuil de détection et présentent potentiellement moins de dérives dans leur mesure, permettent de réduire significativement les risques de sur-ventilation de l'ouvrage.

4.2.4 Conclusion sur les coûts

Il faut retenir que même si le coût d'investissement des détecteurs optiques est significativement plus élevé, les coûts de maintenance sont à leur avantage, avec toutefois une variabilité significative selon les constructeurs.

Le choix final du matériel de détection de NO₂ ne doit pas négliger non plus les impacts possibles sur le coût d'exploitation de l'ouvrage, ni sur la fonction attendue, à savoir le respect des règlements sur la qualité de l'air en tunnel routier.

4.3 Choix du détecteur

Malgré des performances nettement inférieures, l'utilisation de cellules électrochimiques ne peut être écartée. Elle sera réservée aux seules configurations pour lesquelles la probabilité de risques d'exposition au NO₂ supérieure aux niveaux réglementaires est très réduite.

Dès lors que la sensibilité au NO₂ est avérée, le choix doit se porter sur des détecteurs de type optique. Les principales raisons pouvant conduire à cette forte sensibilité sont :

- une densité d'émission importante (trafic intense, congestion, déclivité importante, forte proportion de poids lourds),
- un faible renouvellement d'air (tunnel bidirectionnel, congestion),
- une durée importante d'exposition des usagers (grande longueur, congestion).

Par exemple :

- dans un tunnel moyennement long (à partir d'1 km environ), urbain et à fort trafic (plusieurs dizaines de milliers de véhicules par jour), l'installation de détecteurs de type optique est indispensable. Cela est justifié par une forte exposition du fait des niveaux potentiellement élevés, pouvant être aggravée lors d'incident d'exploitation (congestion inhabituelle en lien avec un véhicule en panne ou une voie neutralisée) même si la durée de traversée du tunnel reste en général modérée ;
- dans un tunnel long (plusieurs kilomètres), l'installation de détecteurs de type optique est indispensable, même si le trafic est modéré (inférieur à 10 000 véhicules par jour) et qu'il ne s'agit pas d'un tunnel urbain. Dans un tel cas, le risque d'exposition élevée est avéré.
- à l'inverse, dans un tunnel court, même s'il est urbain avec un trafic substantiel, ou dans un tunnel moyennement long non urbain avec un trafic modéré, et à condition qu'il s'agisse de tunnels unidirectionnels, de simples cellules électrochimiques sont suffisantes.

En outre le choix devra aussi prendre en compte les possibilités d'intervention en tunnel pour les opérations de maintenance. Si on cherche à réduire leur fréquence, les appareils de type optique sont à privilégier.

5 Principes d'implantation et d'utilisation

Étant donné que la réglementation porte sur les valeurs moyennes spatiales et que les niveaux de pollution varient tout le long des ouvrages, il est indispensable d'installer plusieurs points de mesure dans un tube de tunnel donné. C'est aussi un moyen d'assurer une certaine redondance en cas de défaut d'un appareil.

Les principes qui sont donnés ci-après doivent être adaptés selon les configurations géométriques particulières de chaque ouvrage (présence de bretelles par exemple) et selon l'architecture du système de ventilation (longitudinal ou transversal, nombre de cantons le cas échéant, etc.).

L'expérience montre qu'il est difficile de gérer deux types de détecteurs distincts dans un même ouvrage, tant du point de vue de l'interprétation des mesures que de la maintenance. Il convient donc d'éviter de panacher cellules électrochimiques et détecteurs optiques dans un même tube.

5.1 Cas des détecteurs de type électrochimique

Les informations produites par ce type d'appareils étant entachées d'incertitudes relativement importantes, il convient de disposer de suffisamment d'appareils afin de bien couvrir chaque tube et en outre de ne pas être trop dépendant de l'indisponibilité d'un capteur. On retient souvent une inter-distance de l'ordre de 400 mètres au maximum entre deux points de mesure successifs (en général au niveau des opacimètres pour rationaliser les câblages)

La moyenne spatiale qui servira au pilotage de la ventilation sera calculée en faisant la moyenne arithmétique, sur une période glissante de 15 minutes, des valeurs données par chaque capteur, en éliminant d'éventuelles valeurs aberrantes.

5.2 Cas des détecteurs de type optique

Compte tenu de la spécificité des tunnels pour lesquels on retient des détecteurs optiques (risques de forte exposition des usagers en cas de congestion récurrente, trajets longs ou circulation bidirectionnelle), il convient de disposer d'au moins deux appareils par tube. Dans l'idéal, il faudra viser une inter-distance de l'ordre de 400 mètres entre chaque point de mesure, comme c'est le cas pour les détecteurs de type électrochimique, de manière à disposer d'un profil longitudinal de concentration de NO₂ représentatif. Toutefois, compte tenu du prix des détecteurs de type optique, une inter-distance un peu supérieure pourra être acceptée afin d'optimiser le nombre de capteurs.

Lorsque deux détecteurs sont installés dans un tube, ils seront placés à chaque tiers. Plus généralement, l'ensemble des détecteurs seront régulièrement espacés le long du tube.

En général, la valeur qui servira au pilotage de la ventilation sanitaire sera la moyenne arithmétique de l'ensemble des valeurs données par chaque capteur, en éliminant d'éventuelles valeurs aberrantes. Cependant, certaines configurations particulières d'ouvrage pourront nécessiter des adaptations à ce principe de calcul (par exemple, pondération des mesures selon le profil longitudinal de vitesse de courant d'air relevé par les anémomètres). Comme pour le cas des détecteurs de type électrochimique, la moyenne arithmétique sera calculée sur une période glissante de 15 minutes.

Mesure déportée en local technique

Une très grande prudence est recommandée lorsqu'on souhaite installer les cellules électrochimiques dans un local technique (mesure déportée). Cette solution implique un système d'amenée d'air risquant d'engendrer des fluctuations de pression sur les membranes des cellules électrochimiques, pouvant provoquer ainsi d'autres sources d'erreurs sur les mesures. Il convient de s'assurer que le volume d'air soit appliqué aux cellules sans interférer avec d'autres appareils (opacimètres par exemple).

Le CETU considère qu'il est préférable d'éviter ce type d'installation et de lui préférer un fonctionnement in situ, avec une implantation des détecteurs dans la partie circulée de l'ouvrage.

Pour les détecteurs de type optique, CODEL propose une solution de mesure déportée avec le modèle TunnelTech402 (et ses variantes) incluant dans une armoire de mesure un détecteur optique mais aussi un opacimètre et une mesure du CO grâce à une cellule électrochimique.



Avis du 14 décembre 1998 du Conseil supérieur d'hygiène publique de France (section des milieux de vie) sur la qualité de l'air dans les ouvrages souterrains ou couverts

Rapport de décembre 1998 sur la qualité de l'air dans les ouvrages souterrains ou couverts du Conseil supérieur d'hygiène publique de France

Circulaire DGS/VS3 n° 99-329 du 8 juin 1999 relative aux recommandations du Conseil supérieur d'hygiène publique de France, section milieux de vie, sur la qualité de l'air dans les ouvrages souterrains ou couverts

Les dossiers Pilote du CETU – Fascicule Ventilation (2003)

Air quality guidelines global updates - OMS (2005)

Avis et rapport « 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 » - AFSSET (2009)

Tunnels routiers : émissions des véhicules et besoins en air pour la ventilation - Association mondiale de la route [AIPCR] (2012)

NO₂/NO_x volume ratio in three tunnels in Norway – Norwegian Public Roads Administration (2013)

Émissions de particules et de NO_x par les véhicules routiers - ADEME (2014) :

Observation du ratio [NO₂]/[NO_x] en tunnels routiers - Bernagaud & al. – Pollution Atmosphérique (2014)

Contributeurs : Bruno VIDAL et Jean-François BURKHART (CETU)

Contact : ventilation-environnement.cetu.ve.cetu@developpement-durable.gouv.fr

Centre d'Études des Tunnels

25 avenue François Mitterrand
69674 BRON - FRANCE
Tél. 33 (0)4 72 14 34 00
Fax. 33 (0)4 72 14 34 30
cetu@developpement-durable.gouv.fr

