

UNECE

COMMISSION ÉCONOMIQUE POUR L'EUROPE

**Document d'orientation sur les techniques
de lutte contre les émissions pour les sources mobiles
dans le cadre de la Convention sur la pollution
atmosphérique transfrontière à longue distance**



NATIONS UNIES

UNECE
COMMISSION ÉCONOMIQUE POUR L'EUROPE

**Document d'orientation sur les techniques
de lutte contre les émissions pour les sources mobiles
dans le cadre de la Convention sur la pollution
atmosphérique transfrontière à longue distance**



NATIONS UNIES

Note

Les documents des Nations Unies sont symbolisés par des lettres majuscules associées à des chiffres. L'utilisation d'un tel symbole indique un renvoi à un document des Nations Unies.

Les appellations employées et la présentation du matériel dans cette publication n'impliquent pas l'expression d'une quelconque opinion de la part du Secrétariat des Nations Unies concernant le statut juridique de tout pays, territoire, ville ou région ou de leurs autorités, ou concernant la délimitation de leurs frontières ou limites.

ECE/EB.AIR/138

PUBLICATION DES NATIONS UNIES

Copyright © Nations Unies, 2016
Tous droits réservés

Service de l'information de la CEE-ONU

Palais des Nations
CH-1211 Genève 10
Suisse

Courriel: info.ece@unece.org
Téléphone: +41 (0) 22 917 44 44
Site Internet: www.unece.org

Pour tout complément d'information, veuillez consulter le site web de la Convention:
www.unece.org/env/lrtap/welcome.html

Table des matières

Liste des abréviations et acronymes	5
I. Introduction	6
II. Champ d'application	8
III. Processus d'émission et contributions des sources mobiles aux émissions	10
IV. Meilleures techniques disponibles de réduction des émissions provenant de sources mobiles	12
A. Cyclomoteurs et motocycles	13
B. Moteurs à allumage commandé (à essence) équipant les véhicules routiers légers	15
C. Allumage par compression (diesel) des véhicules utilitaires légers	17
D. Allumage par compression (diesel) des véhicules utilitaires lourds	19
E. Émissions de particules dues à l'usure et à l'abrasion d'éléments des véhicules routiers	21
F. Moteurs à essence des engins mobiles non routiers	22
G. Engins mobiles à moteur diesel non routiers et destinés au réseau ferré	23
H. Bateaux à moteur diesel (navigation intérieure)	25
I. Navires	26
J. Aéronefs	27
K. Tramways électriques, métros et trolleybus	27
V. Mise en œuvre et mesures non techniques	28
Bibliographie	30

Liste des abréviations et acronymes

CEE	Commission économique pour l'Europe de l'ONU
CH₄	Méthane
CO	Monoxyde de carbone
COV	Composés organiques volatils
DME	Diméthyle éther
GNC	Gaz naturel comprimé
GNL	Gaz naturel liquéfié
GPL	Gaz de pétrole liquéfié
HAP	Hydrocarbures aromatiques
HC	Hydrocarbures
MTD	Meilleures techniques disponibles
N₂	Diazote
NH₃	Ammoniac
NO_x	Oxydes d'azote
PM_{2,5}	Particules fines d'un diamètre inférieur ou égal à 2,5 micromètres (µm)
ppm	Parts par million
RCS	Réduction catalytique sélective
RGE	Recyclage des gaz d'échappement
SO₂	Dioxyde de soufre
SO_x	Oxydes de soufre

I.

Introduction

1. Le présent document a pour objet de fournir aux Parties à la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance de la Commission économique pour l'Europe (CEE) des indications leur permettant de déterminer les meilleures solutions applicables aux sources mobiles d'émissions, compte tenu en particulier des meilleures techniques disponibles (MTD), pour les aider à s'acquitter des obligations découlant du Protocole de 1999 relatif à la réduction de l'acidification, de l'eutrophisation et de l'ozone troposphérique (Protocole de Göteborg).
2. Ce document met à jour et remplace le document d'orientation sur les techniques de lutte contre les émissions provenant de certaines sources mobiles adopté en 1999 (voir EB.AIR/1999/2). Les informations générales et analyses d'ordre technique qui étaient le présent document d'orientation mis à jour sont présentées dans un rapport technique détaillé [1].
3. L'accent est mis principalement sur les techniques qui peuvent être mises en œuvre pour réduire les taux d'émission de chaque véhicule ou moteur concerné en fonctionnement normal (« mesures techniques »). D'autres mesures comprenant notamment les modifications des spécifications des carburants ou du type de carburant, de même que des « mesures non techniques », sont également passées en revue. Ces dernières consistent par exemple à faire évoluer les comportements, les modes de fonctionnement et les infrastructures de façon à réduire les émissions.
4. Le présent document recense parmi les MTD plusieurs techniques permettant de réduire les émissions de tel ou tel polluant. Les techniques proposées ont fait la preuve qu'elles pouvaient réduire les émissions dans des applications concrètes à grande échelle. Des techniques d'avenir prometteuses sont également décrites. Le fait de qualifier une technique de MTD pour les sources mobiles implique par définition que les coûts supplémentaires associés à sa mise en œuvre sur toute la durée utile du matériel sont en proportion des réductions d'émissions escomptées, ce qui justifie la viabilité économique de la technique envisagée. En outre, les conditions limites et les contraintes s'exerçant sur l'application de chaque technique doivent être prises en considération, tout comme les synergies et les arbitrages éventuels avec d'autres objectifs environnementaux. Une solution assimilée aux MTD peut consister en une combinaison de plusieurs techniques. En outre, une technique est d'autant plus susceptible d'être qualifiée de MTD qu'elle permet de prendre en compte plus d'un polluant.
5. La définition des MTD applicables à la réduction des émissions provenant de sources mobiles s'inspire de la définition retenue pour les sources fixes (voir ECE/EB.AIR/117). Dans un souci de cohérence, le présent document d'orientation ne cherche pas à fournir une définition supplémentaire des MTD pour les sources mobiles, mais uniquement à spécifier les critères de sélection à retenir en l'occurrence. Pour cette raison, une technique rangée parmi les MTD pour les sources mobiles présente les caractéristiques suivantes :
 - a) Elle permet des réductions d'émissions concrètes et mesurables par rapport à une technologie de référence à un coût qui est proportionnel aux réductions opérées ;
 - b) Elle est techniquement réalisable et a déjà été mise en œuvre dans des applications concrètes à grande échelle ;
 - c) Les avantages procurés par la réduction des émissions de polluants pour laquelle la technique a été introduite l'emportent largement sur les effets environnementaux ou autres effets secondaires entraînés par sa mise en œuvre.
6. Par sources mobiles, on entend un large éventail de véhicules et d'engins (y compris non routiers) de conceptions diverses, fonctionnant dans des conditions variables et dans de multiples situations. Par conséquent, les techniques utilisées et les niveaux d'émission qui en résultent peuvent varier considérablement suivant les catégories et les applications considérées. Le présent document présente donc des recommandations différenciées par catégorie de véhicules ou d'engins et fait une distinction entre les MTD applicables à ceux qui sont d'un type récent ou plus ancien. Cela permet de tenir compte des différences entre les Parties à la Convention concernant le parc de véhicules et la structure des stocks d'engins mobiles existants. L'applicabilité des MTD peut être fonction des conditions économiques, environnementales ou technologiques propres au pays.
7. Les recommandations figurant dans le présent document devraient être considérées comme des indications générales relatives aux techniques susceptibles de réduire les émissions pour les différentes catégories de sources mobiles. Il ne s'agit pas d'une liste exhaustive de toutes les techniques possibles. Dans des conditions locales précises, d'autres techniques pourraient être considérées comme des MTD tout aussi satisfaisantes. Ce document d'orientation mentionne donc, pour chacune des MTD, un certain nombre de conditions qui peuvent en limiter l'application. Des contraintes supplémentaires d'ordre technique ou financier, ou liées à l'infrastructure, peuvent aussi s'exercer dans des cas particuliers.

II. Champ d'application

8. Le présent document porte sur les émissions des polluants pris en considération dans le Protocole de Göteborg, à savoir principalement les oxydes d'azote (NO_x), les composants organiques volatils (COV) et les particules. Les sources mobiles font partie des principales catégories de sources émettant tous ces polluants. Un pourcentage important des particules émises par des sources mobiles consiste en carbone noir. Les techniques envisagées pour réduire les quantités de particules rejetées concernent donc également les émissions de cette substance.
9. Parmi les autres polluants visés par le Protocole de Göteborg, il convient de mentionner les oxydes de soufre (SO_x), l'ammoniac (NH₃) et d'autres précurseurs de l'ozone, tels que le monoxyde de carbone (CO) et le méthane (CH₄). Ces polluants sont mentionnés ici uniquement lorsque cela est jugé utile.
10. Dans leur majorité, les véhicules, navires et autres engins fonctionnent avec des carburants de type gazole ou essence. Le présent document d'orientation range les MTD suggérées par type de carburant, en faisant une distinction appropriée entre les nouveaux véhicules et le parc existant. Il tient compte tant des gaz d'échappement que d'autres émissions (évaporation, usure des pièces) et prévoit des mesures à la fois techniques et non techniques, les premières comprenant les techniques applicables au groupe motopropulseur, le changement de carburant et le traitement en aval. Le tableau ci-dessous récapitule les principales catégories de sources mobiles se prêtant à l'application des techniques de réduction des émissions décrites dans le présent document.
11. **Sources mobiles non visées par le Protocole de Göteborg** : Les émissions provenant des sources mobiles ci-après ne sont pas prises en compte à l'annexe VIII du Protocole de Göteborg : aéronefs, navires de mer (cabotage ou trafic hauturier), tramways (électriques), métros et trolleybus. Cependant, certaines d'entre elles sont déjà consignées dans les inventaires nationaux établis au titre de la Convention (phases d'atterrissage et de décollage, trafic maritime national) ou sont susceptibles de l'être (trafic maritime international). S'agissant des tramways électriques, des métros et des trolleybus, ils n'émettent pas de gaz d'échappement mais rejettent des métaux lourds en raison de l'usure des pièces et, en particulier, de la projection d'étincelles sur les lignes d'alimentation électrique. C'est pourquoi toutes ces sources mobiles sont également traitées brièvement dans le présent document d'orientation.

Principales catégories de sources mobiles considérées

	Moteurs à allumage commandé	Moteurs à allumage par compression
Véhicules routiers	Motocycles et cyclomoteurs Véhicules routiers légers (voitures particulières, véhicules utilitaires légers)	Véhicules routiers légers (voitures particulières, véhicules utilitaires légers) Véhicules utilitaires lourds (camions, autobus)
Engins mobiles non routiers	Engins portatifs et non portatifs (équipements domestiques, matériel de jardinage, engins agricoles et forestiers)	Machines industrielles, engins de chantier, engins/tracteurs agricoles et forestiers Automotrices, locomotives
Voies navigables intérieures	–	Moteurs à allumage par compression (navires à passagers, bateaux de transport de marchandises)

III.

Processus d'émission et contributions des sources mobiles aux émissions

12. Les sources mobiles émettent des polluants atmosphériques produits principalement par la combustion de carburant dans leur moteur. Les mesures applicables aux moteurs, qu'elles soient liées à l'efficacité de la combustion et au contrôle des propriétés des carburants, peuvent entraîner une réduction de ces émissions. Des réductions supplémentaires peuvent être obtenues grâce à l'utilisation de dispositifs de traitement aval des gaz d'échappement. L'usure des pièces (pneus, freins) et l'évaporation d'essence provenant du réservoir des véhicules routiers sont les sources les plus fréquentes d'émissions autres que les gaz d'échappement (à savoir sous la forme de particules). Ces émissions sont également prises en compte dans le présent document.
13. Les sources mobiles comptent pour 40 à 60 % environ dans le total des émissions de NO_x et pour 10 à 30 % dans les quantités totales de particules fines (PM_{2,5}, ou particules ≤2,5 μm de diamètre) émises dans les différents pays de la région de la CEE (année 2010). Les principales sources d'émissions sont les voitures et camions à moteur diesel, suivis des tracteurs agricoles. Les activités de transport ferroviaire et maritime à propulsion diesel constituent également une source importante d'émissions sur le territoire de certaines Parties à la Convention. Les sources mobiles contribuent pour 20 % environ aux émissions totales de COV dans les différentes parties de la région de la CEE (année 2010). Les principales sources mobiles de COV sont les véhicules légers fonctionnant à l'essence, y compris les deux-roues, suivis des petites machines et des engins agricoles. Les sources mobiles terrestres contribuent pour moins de 1 % au total des émissions de dioxyde de soufre (SO₂) et pour 1 à 4 % aux émissions totales de NH₃ dans les différentes parties de la région de la CEE (année 2010).
14. Vu que les sources mobiles contribuent fortement aux émissions de NO_x et de particules, ces deux polluants sont ceux auxquels le présent document d'orientation accorde la plus grande attention. Il est question des COV et du NH₃ uniquement dans le cas de sources mobiles qui en émettent des quantités notables et lorsqu'il existe des techniques économiques et bien établies permettant de réduire les émissions de façon appréciable. Les niveaux d'émission augmentent généralement avec le degré de vétusté des sources mobiles, étant donné que l'efficacité des dispositifs antiémissions diminue au fil du temps. Par ailleurs, des dysfonctionnements dus à une utilisation malavisée, à l'usure ou à des défaillances aléatoires peuvent également dégrader les équipements antipollution.

IV.

Meilleures techniques disponibles
de réduction des émissions
provenant de sources mobiles

15. On trouvera dans cette section des recommandations précises relatives à la réduction des émissions par catégorie de sources mobiles, fondées sur l'évaluation des MTD envisageables. Pour chaque catégorie, les mesures proposées sont subdivisées en mesures applicables aux véhicules/moteurs neufs et véhicules/moteurs en circulation (parc existant) et en mesures applicables aux futurs véhicules/moteurs (nouvelles technologies prometteuses ou d'avenir). L'évaluation et le choix des MTD soulèvent des questions communes à toutes les catégories de sources mobiles, parmi lesquelles : a) l'applicabilité ou les limites à l'applicabilité d'une technique aux véhicules/moteurs neufs ou existants ; b) les avantages et coûts environnementaux (qu'il s'agisse du montage a posteriori ou à la construction) ; c) les aspects liés à la mise en œuvre ; et d) les effets, synergies et arbitrages environnementaux (impact sur la consommation de carburant, polluants non réglementés, etc.). En général, les techniques introduites par les constructeurs pour satisfaire aux dernières normes d'émission correspondent aux MTD applicables aux types de véhicules et d'engins actuellement produits (considérés comme neufs). Les limites à l'applicabilité et les aspects liés à la mise en œuvre (obstacles technologiques, infrastructure à prévoir, état de l'environnement, spécifications du carburant et entretien nécessaire) revêtent une importance particulière dans le processus d'évaluation.
1. **MTD applicables aux véhicules neufs (systèmes courants de réduction des émissions d'échappement et systèmes antiévaporation du carburant)**
17. Les techniques employées pour satisfaire aux limites d'émission les plus récentes correspondent aux MTD pour les nouveaux types de véhicules, à savoir principalement : l'injection indirecte, la combustion stœchiométrique (commandée par une sonde lambda) et le post-traitement catalytique des gaz d'échappement. Le traitement catalytique englobe à la fois des catalyseurs d'oxydation de conception relativement simple (sur les cyclomoteurs et les petits motocycles, par exemple) permettant de réduire les rejets de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrocarbures (HC) et les pots catalytiques à trois voies qui règlent le rapport air/carburant dans un système à boucle fermée (sur les plus gros moteurs à quatre temps). En l'occurrence, la technologie antiémissions est analogue à celle qui est utilisée dans les voitures particulières à essence.
18. Sur les cyclomoteurs et certains motocycles (les petites motos, principalement), la combustion est souvent réglée pour un mélange légèrement riche de façon à améliorer la performance et la réactivité. En pareil cas, de l'air est injecté en complément dans l'orifice d'échappement avant que les gaz n'atteignent le pot catalytique. Il se peut que le mélange global ne corresponde pas au réglage stœchiométrique, mais le catalyseur réduit en fait les quantités de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures, tandis que les NO_x sont éliminés du cylindre par la carburation riche. En fonction du catalyseur et du réglage, une réduction supplémentaire des NO_x est possible dans le système d'échappement.

A. Cyclomoteurs et motocycles

16. Les cyclomoteurs et motocycles fonctionnant à l'essence ont été jusqu'à présent d'importants émetteurs de COV et de monoxyde de carbone. Les cyclomoteurs en particulier, qui étaient dans le passé surtout équipés de moteurs à deux temps, rejettent des quantités non négligeables d'hydrocarbures imbrûlés et, du même coup, de particules du fait des pertes dues au balayage du cylindre. La contribution de ces véhicules à la pollution atmosphérique urbaine n'a cessé de croître, notamment dans les zones (urbanisées) à forte densité de population dans lesquelles les cyclomoteurs et les motocycles sont un moyen de transport essentiel.
19. **Moteurs à deux temps** : En dépit d'une tendance récente à l'élimination des moteurs à deux temps en raison des problèmes d'émission de COV, des véhicules dotés de ce type de moteur continuent d'être produits. Pour satisfaire aux nouvelles limites d'émission, il est nécessaire d'engager d'importants investissements dans les systèmes antiémissions. Il s'agit de l'injection directe, commandée électroniquement, de carburant dans le cylindre en vue de régler précisément la quantité de carburant fournie et le moment où il est introduit, de l'injection d'air secondaire dans le système d'échappement et du montage de catalyseurs d'oxydation pour réduire les émissions d'hydrocarbures et, accessoirement, de monoxyde de carbone, les

rejets de NO_x étant réduits principalement par des mesures d'étalonnage de la combustion. Ces nouveaux éléments et les systèmes antipollution dans leur ensemble rendent les moteurs à deux temps un peu moins avantageux (en termes de simplicité, de coût et de rapport puissance/masse) par comparaison avec les moteurs à quatre temps.

20. **Systèmes antiévaporation du carburant** : Sur les motos, la réduction des émissions par évaporation est assurée par des filtres à charbon reliés au système d'alimentation en carburant. Des réservoirs à faible perméabilité analogues à ceux des voitures particulières sont également utilisés. Les dispositifs antiévaporation sont applicables uniquement aux plus grosses cylindrées, mais il se pourrait qu'ils soient étendus à l'avenir à tous les types de véhicules.

2. MTD applicables au parc existant (véhicules en circulation)

21. Le parc actuel de cyclomoteurs et de motocycles se prête bien à des mesures de réduction des émissions, surtout si l'on cible les moteurs à deux temps et véhicules les plus anciens sans traitement aval. Cependant, les problèmes de réduction des émissions sont relativement complexes dans le cas des moteurs de petite cylindrée utilisés sur la majorité des véhicules existants, en raison de limites d'espace et de la simplicité des caractéristiques de conception des petits moteurs. Par conséquent, pour les véhicules dépourvus de système de traitement aval des gaz d'échappement, l'ajout d'un convertisseur catalytique ne peut, en général, être recommandé en tant que MTD. La seule option qui peut être considérée comme une mesure efficace pour les véhicules anciens en circulation est de mettre l'accent sur l'élimination de ces véhicules de la route ; de telles mesures, à savoir les programmes de remplacement accéléré assortis d'incitations financières, constituent de loin la méthode la plus efficace pour réduire la pollution atmosphérique en milieu urbain. Pour les motocycles d'un modèle plus récent (parc existant neuf), probablement équipés d'un pot catalytique, les solutions techniques proposées ci-après peuvent être considérées comme faisant partie des MTD.
22. **Entretien des systèmes antiémissions** : Les programmes de contrôle et d'entretien permettent de détecter les défaillances et les dysfonctionnements des systèmes de réduction

des émissions. Il est recommandé de mettre en place un programme prévoyant un contrôle annuel de tous les véhicules à deux roues, qui devrait consister à mesurer leurs émissions et à exiger des travaux de réparation lorsque les niveaux spécifiés sont dépassés.

23. **Carburants et lubrifiants de bonne qualité** : Des impuretés contenues dans les carburants et les lubrifiants peuvent désactiver le catalyseur. Pour les véhicules à moteur à deux temps, l'ajout d'huile de lubrification dans les cylindres a amplifié ce problème. Les MTD applicables aux types de moteurs existants peuvent donc consister à faire appliquer les consignes du constructeur concernant l'emploi des huiles recommandées de préférence à d'autres produits bon marché, et à effectuer des vidanges aux intervalles recommandés.

3. Évaluation des carburants de substitution envisagés pour les deux-roues

24. Le recours à des carburants de substitution, comme le gaz de pétrole liquéfié (GPL) ou le gaz naturel comprimé (GNC) par exemple, sans autre réduction des émissions (traitement aval) ne procure pas d'amélioration notable en termes de qualité de l'air (voir l'analyse plus détaillée présentée pour les voitures à essence). En outre, des impératifs de sécurité et des limites d'espace sont à prendre en considération pour le stockage de tels carburants à bord des motocycles. En général, l'emploi de carburants de substitution ne peut être considéré comme faisant partie des MTD pour remplacer l'essence sur les motocycles et les cyclomoteurs.

4. Futurs types de véhicules

25. **Véhicules à essence** : Les normes Euro 4 et Euro 5 fixent déjà des objectifs très ambitieux, nécessitant des techniques antiémissions perfectionnées. Concrètement, il est à prévoir que les catalyseurs trifonctionnels et la combustion stœchiométrique seront largement utilisés pour les motocycles, tandis que les cyclomoteurs devront être équipés de pots catalytiques plus gros et de moteurs mieux conçus. S'agissant en particulier de la norme Euro 5, d'importantes avancées technologiques seront sans doute nécessaires, notamment une amélioration de la qualité et du conditionnement de l'ensemble du système (réglage stœchiométrique avec un

catalyseur trifonctionnel). Les contraintes de coût et d'espace peuvent être un facteur limitant sur de petits véhicules tels que les cyclomoteurs, vu que le catalyseur à trois voies devra fonctionner en boucle fermée et qu'il faudra aussi le positionner à proximité de la sortie du moteur (système d'échappement à double couche) pour un amorçage rapide, installer des sondes lambda jumelées pour une meilleure longévité, vérifier les dispositifs antiémissions, etc. Cet ensemble de mesures devrait sensiblement majorer au final le prix des cyclomoteurs. Une telle évolution, conjuguée à la tendance à remplacer les moteurs à deux temps par des moteurs à quatre temps, se traduira sans doute par des véhicules de plus grande taille, nettement plus compétitifs, en vue d'obtenir le meilleur rapport qualité-prix. De surcroît, l'application de normes rigoureuses contribuera à accélérer un peu plus l'élimination des moteurs à deux temps.

26. **Véhicules électriques** : Les véhicules électriques à deux roues peuvent procurer d'importants avantages sur le plan de la qualité de l'air et ils ont récemment commencé à gagner en popularité sur plusieurs marchés. Les problèmes de poids et les contraintes d'espace doivent être pris en compte. En tout état de cause, une plus large pénétration des cyclomoteurs et motocycles électriques est à prévoir pour l'avenir à mesure que la technologie et la compétitivité des batteries s'amélioreront, ce qui pourrait contribuer à réduire le poids des véhicules pour les mêmes exigences d'autonomie. L'électrification offre un réel potentiel parmi les MTD applicables aux cyclomoteurs et aux motocycles.

B. Moteurs à allumage commandé (à essence) équipant les véhicules routiers légers

27. Dans un moteur à allumage commandé, le carburant sous haute pression est mélangé à de l'air et ce mélange est enflammé par une bougie d'allumage pour produire de la puissance [2]. Les moteurs à allumage commandé sont traditionnellement le plus montés sur les voitures particulières mais ils sont aussi montés dans une moindre mesure sur les véhicules utilitaires légers. Les véhicules équipés de ce type de moteurs contribuent notablement aux émissions totales de COV mais émettent moins de NO_x et de particules que les véhicules à moteur diesel.

1. MTD applicables aux véhicules neufs (systèmes courants de réduction des émissions d'échappement et systèmes antiévaporation du carburant)

28. Les dernières normes en matière d'émissions sont respectées grâce à des mesures de limitation des émissions qui portent à la fois sur la combustion et sur le traitement en aval, mesures qui sont considérées comme des MTD pour les nouveaux types de véhicules. On distingue deux grands types de modes de fonctionnement des moteurs à allumage commandé. Le premier, qui est le plus répandu, est l'injection indirecte (PFI) et le second, l'injection directe (GDI). En raison de leur différence de rendement, ces deux modes sont examinés séparément.
29. **Moteurs à injection indirecte** : Afin de limiter les émissions, les moteurs à injection indirecte sont étalonnés de façon stœchiométrique et équipés d'un catalyseur trifonctionnel. Généralement, le système d'échappement est en outre équipé d'une sonde placée en amont qui mesure la teneur en oxygène des gaz d'échappement et adapte constamment le débit de carburant aux besoins du moteur. Une autre sonde, placée en aval, mesure la capacité de stockage d'oxygène du catalyseur et, ainsi, son efficacité dans des conditions réelles. Au fil du temps, l'injection indirecte s'est avérée très efficace et pourrait devenir le mode qui émettrait le moins de polluants réglementés.
30. **Moteurs à injection directe** : L'injection directe, plus récente, a été inventée pour améliorer l'efficacité énergétique et la puissance des moteurs par une injection directe du carburant dans le cylindre. Aujourd'hui, la plupart de ces moteurs fonctionnent de façon stœchiométrique pendant la totalité de leur cycle, mais il existe aussi des moteurs qui combinent deux modes (réglage pauvre et réglage stœchiométrique) aux différents niveaux de charge. Les émissions de NO_x des moteurs à injection directe fonctionnant de façon stœchiométrique ne diffèrent pas fondamentalement des moteurs classiques à injection indirecte. Cependant, lorsqu'ils fonctionnent en réglage pauvre, les moteurs à injection directe ont tendance à émettre de grandes quantités de NO_x à cause de la présence d'oxygène dans les gaz d'échappement. En réglage pauvre, on peut installer un piège à NO_x mais en raison de contraintes liées à la gestion du

moteur et à l'intolérance au soufre, ce dispositif n'a pas connu un grand succès commercial. Les moteurs à injection directe peuvent aussi produire une plus grande masse et un plus grand nombre de particules, qu'il est possible de réduire en modifiant la stratégie d'injection et en améliorant le système d'alimentation en carburant. Si les réglages moteur ne suffisent pas, les filtres à particules pour moteurs à essence sont aussi un moyen très efficace de réduire les émissions de particules, à tous les niveaux de charge et à toutes les températures.

31. **Systèmes antiévaporation du carburant** : Les émissions de COV autres que le méthane provenant du système d'alimentation des véhicules par évaporation sont dues à la volatilité du carburant mais aussi aux variations de la température ambiante et de la température du système d'alimentation en carburant. Élément essentiel dans la limitation des évaporations de carburant, le filtre à charbon actif sert à piéger les vapeurs dans l'évent du réservoir à carburant. Pour réduire les émissions par évaporation provenant du réservoir, on utilise du plastique et des polymères étanches à l'essence, qu'elle soit en phase liquide ou en phase vapeur.

2. MTD applicables au parc existant (véhicules en circulation)

32. Dans les pays d'Europe occidentale et d'Amérique du Nord, la majorité des véhicules légers à essence en circulation sont déjà équipés de catalyseurs trifonctionnels. Sur ce type de véhicule, un catalyseur, à condition qu'il soit bien entretenu, est généralement considéré comme peu polluant, même s'il existe des exceptions à cause de mauvaises conditions de fonctionnement, par exemple des températures extrêmes. Pour ce type de véhicules, la meilleure façon de mettre en œuvre les MTD serait de garantir leur bon rendement. Dans les pays où un pourcentage significatif des véhicules ne sont pas équipés de catalyseurs trifonctionnels, la meilleure façon de réduire la pollution atmosphérique provenant de ces véhicules serait de les retirer de la circulation. L'expérience montre que, par des incitations financières, on peut amener les propriétaires de ces véhicules à les remplacer [3] [4] [1]. Deux techniques sont proposées comme MTD pour les véhicules en circulation équipés d'un catalyseur trifonctionnel.

33. **Entretien des systèmes antiémissions** : Un catalyseur peut perdre une grande partie de son efficacité avec le temps, pour toute une série de raisons. On peut détecter des défaillances et des dysfonctionnements grâce à des programmes de contrôle et d'entretien. La télédétection des émissions associée à la lecture des plaques d'immatriculation est un moyen de reconnaître facilement les pollueurs. Les essais simplifiés pratiqués régulièrement devraient être améliorés pour être plus efficaces, par exemple en mesurant les niveaux de NO_x . Enfin, on peut aussi utiliser les systèmes d'autodiagnostic pour détecter les dysfonctionnements sur les véhicules plus récents. Une fois qu'un dysfonctionnement a été détecté, l'entretien doit se traduire par le remplacement d'éléments (par exemple le catalyseur), le réétalonnage ou le nettoyage (par exemple des injecteurs). Le remplacement des vieux catalyseurs après un contrôle devrait avoir une incidence notable sur les émissions des trois principaux polluants (CO, COV et NO_x) mais aussi une incidence indirecte très favorable sur les émissions de NH_3 , étant donné que les vieux catalyseurs réduisent les NO_x plus efficacement que les NH_3 .

34. **Systèmes antiévaporation du carburant** : Malgré quelques difficultés techniques, le montage après coup d'un filtre à charbon actif et l'utilisation de réservoirs peu perméables peuvent être considérés comme des MTD pour réduire les émissions par évaporation. En outre, étant donné qu'il n'existe aucun moyen de contrôler l'efficacité de ce type de filtre et que son remplacement n'est pas prévu dans les programmes d'entretien, il serait très efficace de prévoir des essais dans le cadre de programmes de contrôle réguliers. Le remplacement du filtre à charbon actif pourrait être considéré comme une MTD pour les anciens types de véhicules.

3. Évaluation des carburants de substitution envisagés pour les véhicules routiers légers

35. Le gaz naturel, le gaz de pétrole liquéfié et les agrocarburants sont souvent présentés comme des carburants plus propres que les carburants traditionnels pour les véhicules équipés d'un moteur à allumage commandé. La plupart des carburants de substitution ne sont pas

franchement moins polluants que l'essence. Parfois, ils permettent de réduire les émissions de tel ou tel polluant ; en revanche ils produisent une augmentation des émissions d'autres polluants toxiques, mais non réglementés. De plus, la transformation de véhicules en circulation pour qu'ils puissent utiliser un carburant de substitution entraîne des risques d'augmentation des émissions parce que les techniques de transformation ne sont pas satisfaisantes du point de vue technique et qu'il est quasiment impossible de vérifier la qualité des moteurs une fois transformés et de leurs émissions dans la réalité. On peut donc dire d'une manière générale que les carburants de substitution ne peuvent être considérés comme des MTD en ce qui concerne les polluants réglementés. En d'autres termes, les réductions d'émissions que permettent d'obtenir les carburants de substitution pourraient aussi être obtenues par une amélioration de la combustion de l'essence et d'un traitement aval. Les recherches scientifiques actuellement en cours et les efforts faits pour promouvoir les carburants de substitution sont inspirées essentiellement par des considérations de sécurité énergétique (par exemple le gaz naturel) et la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre provenant des transports. Dans tous les cas, avant d'utiliser des carburants de substitution dans les moteurs à allumage commandé, il faut se demander si cela permettra d'émettre moins de polluants réglementés et de polluants non réglementés et s'il est possible de vérifier les émissions réelles des véhicules transformés.

4. Futurs types de véhicules

36. **Véhicules à essence** : Le catalyseur trifonctionnel restera le meilleur moyen de limiter les émissions à l'avenir. Aujourd'hui, il existe des catalyseurs trifonctionnels plus performants, grâce à un meilleur étalement des couches, et l'étalonnage des moteurs est de meilleure qualité. Les changements les plus significatifs devraient concerner les moteurs à injection directe avec l'arrivée de la norme Euro 6c, plus sévère, qui devrait nécessiter l'utilisation de filtres à particules essence (éventuellement associés à des catalyseurs trifonctionnels) pour plusieurs types de véhicules. Pour satisfaire à la norme Euro 6c en ce qui concerne la masse et le nombre de particules émises, les moteurs à injection directe pourraient être équipés d'injecteurs piézoélectriques haute

pression à injection multiple et à pulvérisation guidée de nouvelle génération. Pour limiter les NO_x , on pourrait soit utiliser un catalyseur avec une combustion stœchiométrique, soit des filtres à NO_x avec réglage pauvre. Outre qu'ils seront soumis à des normes plus sévères en matière d'émissions, les futurs véhicules à essence seront aussi soumis à des normes plus sévères en ce qui concerne les émissions par évaporation, comme le montre la version révisée de la nouvelle législation européenne actuellement en cours d'élaboration [5]. Cette version révisée vise à améliorer la réduction des émissions par évaporation dans des conditions de conduite réelle.

37. **Véhicules hybrides et électriques** : Les véhicules hybrides ont pour principal objectif de réduire la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre mais des études ont montré que certains types de véhicules hybrides permettent aussi d'obtenir des réductions impressionnantes de polluants atmosphériques. Ils commencent à être très demandés dans plusieurs pays de la région de la CEE. Les véhicules électriques à pile à combustible représentent aussi une avancée technique qui devrait permettre d'aboutir à une réduction significative des gaz à effet de serre et des polluants atmosphériques à l'avenir. À l'heure actuelle, ces nouveaux types de véhicules pénètrent timidement le marché à des degrés divers [6], selon la source d'énergie utilisée, en raison de contraintes à la fois techniques, économiques, et d'infrastructure. En ce qui concerne les véhicules électriques, ils ne pourront gagner des parts de marché que lorsque les batteries seront devenues compétitives tant du point de vue technique que du point de vue de leur coût, et que les contraintes liées à la production et à la distribution d'hydrogène auront été surmontées.

C. Allumage par compression (diesel) des véhicules utilitaires légers

38. Dans un moteur à allumage par compression, le carburant s'enflamme sous l'effet de la pression et la température monte dans la chambre à combustion sous l'effet de la compression [2]. Les véhicules routiers dotés de moteurs à allumage par compression sont essentiellement alimentés au gazole et produisent généralement d'importantes émissions d'oxyde d'azote et de particules. Celles-

ci contiennent un pourcentage élevé de carbone noir et sont liées à d'importantes émissions de particules.

1. MTD applicables aux véhicules neufs (systèmes courants de réduction des émissions d'échappement)

39. Dans le moteur diesel type d'un véhicule de fabrication récente, on trouve un système d'injection à rampe haute pression à impulsions multiples, une culasse multisoupapes et un dispositif de recirculation des gaz d'échappement (RGE). L'approche du traitement des NO_x varie selon les modèles. On trouve notamment les systèmes suivants : a) traitement des NO_x au niveau du moteur uniquement (pas de traitement aval des NO_x) ; b) mise en œuvre d'un piège à NO_x ; et c) réduction catalytique sélective (RCS) avec injection d'urée dans le système d'échappement. Un filtre à particules diesel est utilisé pour maintenir la masse et le nombre de particules dans les limites réglementaires.

40. Il convient de noter que, jusqu'à la première génération de véhicules conformes à la norme Euro 6 mis sur le marché en 2014, les émissions de NO_x dans les conditions réelles de fonctionnement atteignaient des niveaux sensiblement supérieurs aux limites fixées. Les conditions d'utilisation en situation réelle couvrent une plage de fonctionnement nettement plus large que les cycles d'essai de la procédure de réception. Dans ces conditions hors cycle, l'économie de carburant est privilégiée au détriment de la réduction des émissions. Pour faire baisser les émissions de NO_x dans une plage de fonctionnement plus large, le moteur et les systèmes de traitement aval des NO_x devront être réétalonnés. En particulier, la cartographie de recyclage des gaz d'échappement (EGR) devra être élargie aux niveaux du régime moteur et de la charge moteur, et/ou l'injection d'urée devra être augmentée dans les systèmes RCS. Enfin, une meilleure gestion thermique pourra s'avérer nécessaire pour que le pot catalytique atteigne plus rapidement un niveau de fonctionnement optimal au démarrage. Des essais dans ce domaine ont montré que la combinaison de mesures au niveau du moteur, du recyclage des gaz d'échappement et de la réduction catalytique sélective peut ramener les émissions de NO_x en fonctionnement réel sous les seuils fixés par la norme Euro 6 dans une large plage de fonctionnement.

2. MTD applicables au parc existant (véhicules en circulation)

41. Le parc existant de véhicules utilitaires légers fonctionnant au diesel se prête bien aux mesures de réduction des émissions parce que, pour les NO_x en particulier, il est avéré que ces véhicules dépassent largement les limites de la procédure de réception dans les conditions réelles de fonctionnement [7] [8]. Ceci s'explique par le fait que le système antipollution est réglé de telle sorte que la réduction des émissions n'intervient que dans la plage de fonctionnement correspondant au type de conduite que prévoit la procédure de réception.

42. Malheureusement, les possibilités de réduction des émissions sur ces véhicules, surtout les plus anciens, sont limitées. Les techniques antipollution d'adaptation (du type RCS par exemple) se heurtent à divers problèmes techniques et à des difficultés tenant à l'encombrement qui rendent difficile leur application à grande échelle (par exemple dans le cadre d'un programme d'adaptation des véhicules d'une municipalité). Pour ce qui concerne les véhicules plus récents (ceux du parc existant), plusieurs techniques existantes offrent la possibilité d'abaisser les taux d'émissions dans une mesure appréciable, même dans les conditions réelles de fonctionnement, à condition de procéder à un étalonnage ou à un réglage appropriés. S'agissant de la possibilité de remplacer le gazole par d'autres types de carburant, seul le gazole renouvelable offre la perspective d'une diminution réaliste (quoique relativement modeste) des émissions. Si d'autres types de carburant (tels que le gaz naturel) offrent théoriquement des perspectives en termes de réduction des émissions, ils ne prêtent pas à une adaptation généralisée des véhicules en circulation en raison des modifications excessives qu'ils entraîneraient et de difficultés diverses – techniques, financières ou autres – qu'ils susciteraient, ainsi que du faible niveau de réduction des émissions que l'on peut en attendre (le cas de l'agrogazole).

43. Compte tenu de ce qui précède, l'éventail des mesures de réduction des émissions pouvant être envisagées pour le parc existant de véhicules utilitaires légers roulant au gazole se limite principalement aux mesures non techniques ci-après.

44. **Restriction d'accès et/ou retrait total de la circulation :**

Restreindre l'accès des centres villes aux véhicules utilitaires légers roulant au gazole et circonscrire des zones environnementales protégées peut présenter d'importants avantages pour l'environnement. Dans les régions où les voitures roulant au gazole constituent une proportion importante du parc automobile, les mesures visant à les retirer de la circulation sont de loin l'approche la plus efficace pour faire baisser la pollution atmosphérique urbaine. L'expérience montre que les dispositifs favorisant un remplacement accéléré, associés à une offre financière incitative, sont très efficaces pour retirer des types particuliers de véhicules de la circulation et les remplacer par des véhicules moins polluants. Dans le cas des véhicules utilitaires légers roulant au gazole, une telle mesure pourrait faciliter leur remplacement par des véhicules ayant l'essence ou le gaz naturel pour carburant, ou par d'autres véhicules moins polluants.

45. **Inspection et entretien :** Les contrôles périodiques en vigueur ne comportent habituellement pas de tests permettant de mesurer les émissions de NO_x et ne sont en outre pas suffisamment fiables pour déceler un filtre à particules défaillant. Il y a donc matière à progression dans ce domaine. Les techniques de mesure que permettent les systèmes d'autodiagnostic semblent fiables. Cependant, en l'état actuel des choses, ils n'auront guère d'efficacité que dans la lutte contre les émissions de particules. En effet, étant donné la conception des systèmes antipollution qui fait que les taux élevés d'émissions de NO_x correspondant aux conditions réelles de conduite ne sont pas pris en compte, les systèmes d'autodiagnostic ne trouveront rien à signaler.

3. Futurs types de véhicules

46. **Systèmes antipollution types des moteurs diesel :** On escompte que les systèmes antipollution par défaut des futurs véhicules utilitaires légers au gazole seront une combinaison de techniques faisant appel au recyclage des gaz d'échappement, aux catalyseurs d'oxydation, à la réduction catalytique sélective (ou au piège à NO_x pour les plus petits véhicules), et aux filtres à particules. Le contrôle des émissions de NO_x des moteurs diesel en situation de conduite réelle exigera une nouvelle stratégie généralisée d'étalonnage et de contrôle. Le contrôle du fonctionnement des différents éléments grâce au système d'autodiagnostic sera garant d'un fonctionnement efficace dans la durée.

Bien que la norme Euro 6 ne contienne aucune disposition concernant le contrôle d'éventuelles fuites d'ammoniac (telles qu'en connaissent parfois les véhicules utilitaires lourds), on peut affirmer que l'installation d'un catalyseur en aval du catalyseur RCS s'imposera pour éviter les fuites d'ammoniac lorsque le dispositif RCS est utilisé. Il se peut que cela nécessite d'adopter de nouvelles règles.

47. **Carburants et systèmes de propulsion de remplacement :**

À l'avenir, le gaz naturel comprimé (GNC) pourra être utilisé en remplacement du gazole, non seulement en raison de l'abaissement des émissions devant en découler, mais aussi parce qu'il est perçu comme le moyen de diversifier le mix énergétique, et donc de réduire le niveau de dépendance à l'égard du pétrole. Les agrocarburants de deuxième génération sont actuellement à l'étude, mais la littérature en la matière ne contient guère d'informations sur les avantages qui pourraient en être retirés en termes de réduction des émissions, si ce n'est en ce qui concerne les gaz à effet de serre. Pour les véhicules hybrides à moteur diesel, le potentiel de commercialisation semble prometteur.

D. Allumage par compression (diesel) des véhicules utilitaires lourds

48. À l'instar des véhicules utilitaires légers, les moteurs à allumage par compression des véhicules utilitaires lourds sont à ce jour majoritairement alimentés au gazole et constituent en général une source importante d'émissions de NO_x et de particules. De plus, les émissions provenant du carter des véhicules anciens aggravent les émissions de COV et de particules.

1. **MTD applicables aux véhicules neufs (systèmes courants de réduction des émissions d'échappement)**

49. Pour s'assurer du respect des normes les plus récentes en matière d'émissions, on dispose à la fois de possibilités d'action au niveau du moteur et de techniques de traitement aval des gaz d'échappement, que l'on considère comme les meilleures techniques disponibles pour les véhicules neufs. Les actions essentielles au niveau du moteur concernent notamment le recyclage des gaz d'échappement, l'injection sous haute pression avec un contrôle précis de l'alimentation, et des

processus optimisés d'échange d'air. Le traitement en aval consiste en une combinaison de techniques faisant appel aux catalyseurs d'oxydation pour la réduction du monoxyde de carbone et des hydrocarbures, à la RCS pour la réduction des NO_x, au DPF pour la réduction des particules et aux catalyseurs pour fuites d'ammoniac pour éliminer les émissions excessives de NH₃ résultant de la RCS. Tant la norme Euro 6 (Union européenne) que la norme US2010 (États-Unis) exigent de telles mesures avancées de réduction des émissions pour maintenir celles-ci sous les seuils applicables aux véhicules utilitaires lourds.

2. MTD applicables au parc existant (véhicules en circulation)

50. Le parc existant de véhicules utilitaires lourds se prête bien aux mesures de réduction des émissions. S'agissant en particulier des véhicules qu'utilisent les autorités publiques ou appartenant à des flottes captives (les autobus circulant en ville et les camions de transport des immondices, par exemple), l'application de mesures telles que le montage ultérieur de dispositifs antipollution et la conversion à d'autres types de carburant est envisageable. Les recommandations de MTD ci-après peuvent s'appliquer aux véhicules utilitaires lourds du parc existant.
51. **Adaptation ultérieure de dispositifs RCS et de filtres à particules** : Installer après coup des dispositifs de traitement aval des gaz d'échappement est une mesure rentable pouvant produire des avantages importants pour l'environnement. La RCS (pour les NO_x) et le filtre à particules, en particulier, semblent être les meilleures techniques disponibles pour la réduction des émissions dans le parc existant des véhicules utilitaires lourds. La RCS et le filtre à particules peuvent être mis en œuvre conjointement pour produire un effet utile combiné sur les niveaux de NO_x et de particules, pour un coût comparatif avantageux par rapport à une installation séparée des deux dispositifs. Plusieurs exemples dans le monde ont apporté la preuve de l'utilité de tels dispositifs pour la réduction des émissions de NO_x et de particules tant en ce qui concerne les poids lourds long-courriers que les autobus urbains.
52. **Autres dispositifs antipollution pour installation ultérieure** : Le catalyseur d'oxydation peut-être mis en œuvre en combinaison avec un piège à NO_x et un dispositif de réduction catalytique sélective. Installé seul, il peut être considéré comme une MTD, surtout dans le cadre d'applications à grande échelle, compte tenu de sa plus grande tolérance au soufre contenu dans le carburant par rapport au filtre à particules, et dans les cas où d'autres facteurs techniques (par exemple les possibilités de régénération) excluent d'avoir recours à un piège à NO_x. Un dispositif de ventilation à carter fermé peut être considéré comme une MTD pour la réduction des émissions du carter moteur des véhicules anciens. Il faut savoir que si le carter d'un vieux moteur diesel n'est pas fermé, il peut contribuer à hauteur de 25 % au total des émissions de COV et de particules, d'où l'intérêt d'un tel dispositif. Celui-ci peut être combiné à un catalyseur d'oxydation ou à un filtre à particules. Le recyclage des gaz d'échappement, en revanche, offre un potentiel plus limité en raison des difficultés techniques que pose l'incorporation d'un tel dispositif dans un moteur existant.
53. **Changement de carburant** : La conversion au gaz naturel (le plus souvent sous la forme de gaz comprimé) est possible (par exemple dans les autobus urbains), mais elle est difficile à mettre en œuvre en raison de complications techniques (qui tiennent entre autres aux réservoirs) et des coûts initiaux élevés. Parmi les autres possibilités, seul le gazole renouvelable est à même de produire une réduction mesurable quoique modeste des émissions, surtout des émissions de particules. D'autres possibilités comme le diméthyle éther (DME) ou le gazole émulsifié ne sont pour l'heure pas recommandées en raison de diverses limites d'ordre technique, financier ou autre. Le DME en particulier semble prometteur, si les problèmes de coût liés à sa production peuvent être résolus. L'agrogazole de première génération est peu efficace en termes de réduction des émissions compte tenu des proportions aujourd'hui autorisées par la loi. Les agrogazoles de deuxième génération offriront peut-être des possibilités de combustion moins polluante, mais cela reste à démontrer pour certains carburants du marché.
54. **Hybridation** : Le remplacement d'un vieux véhicule utilitaire par un nouvel utilitaire hybride peut entraîner dans une certaine mesure une diminution des émissions et donner lieu parallèlement à une économie appréciable de carburant. L'hybridation peut être considérée comme une MTD, surtout en ce qui concerne les autobus circulant en milieu urbain. En plus de leur contribution à la baisse générale des émissions au niveau d'une ville, les autobus

circulant en milieu urbain offrent l'avantage d'une moindre exposition des passagers à la pollution lorsqu'ils attendent à l'arrêt et/ou lorsque les autobus démarrent. Les principales limites à l'utilisation d'autobus hybrides tiennent aux coûts initiaux élevés, mais l'amélioration du rendement des carburants pourrait offrir un meilleur rapport coût-bénéfice à long terme. Des questions subsistent également en ce qui concerne le rendement à long terme des batteries des systèmes hybrides. Les camions de type hybride n'ont pas encore atteint le niveau de la production de masse.

3. Futurs types de véhicules

55. **Systèmes courants de réduction des émissions d'échappement des véhicules à moteur diesel :** Une combinaison de techniques faisant appel au recyclage des gaz d'échappement, aux catalyseurs d'oxydation, à la réduction catalytique sélective et aux filtres à particules devrait constituer dans l'avenir le système courant de réduction des émissions d'échappement des véhicules utilitaires lourds au gazole. Les optimisations ultérieures du système et le contrôle du fonctionnement des différents éléments grâce au système d'autodiagnostic garantiront le fonctionnement efficace à long terme des différents sous-systèmes.
56. **Carburants et systèmes de propulsion de remplacement :** Il est possible que le diméthyle éther puisse un jour remplacer le gazole (ce qui apporterait une solution efficace aux émissions de particules et simplifierait la lutte contre les émissions de NO_x), mais il faudra d'abord résoudre le problème de la production et de la distribution. D'autres types de carburants renouvelables de remplacement peuvent également prétendre à devenir à terme des MTD pour les poids lourds long-courriers. S'agissant des systèmes de propulsion de remplacement, on peut certainement s'attendre à une plus large diversification, surtout en ce qui concerne les autobus hybrides circulant en milieu urbain, à combiner le cas échéant avec un carburant de remplacement comme le gaz naturel, par exemple, pour un abaissement accru des émissions. Les autobus à motorisation intégralement électrique sont également une possibilité, dans la mesure où l'on voit maintenant apparaître des systèmes à recharge rapide ou sans câble. Il existe aussi de petites flottes d'autobus prototypes à hydrogène à pile à combustible qui circulent déjà dans différentes régions du monde [9], mais

les technologies faisant appel à l'hydrogène ne pourront vraiment se développer que lorsque la production et la distribution d'hydrogène seront devenues économiquement rentables. Quant aux poids lourds long-courriers, il est peu probable qu'ils puissent vraiment tirer parti du concept de propulsion hybride, mais le développement de cette technologie se poursuit pour ce qui concerne les camions de livraison.

E. Émissions de particules dues à l'usure et à l'abrasion d'éléments des véhicules routiers

57. Les particules émises du fait de l'usure et de l'abrasion de certains éléments des véhicules contribuent sensiblement aux émissions totales de particules [10]. Les mesures destinées à l'amélioration de la qualité de l'air devraient prendre en compte à la fois les émissions primaires (nouvelle matière pulvérulente produite) et la remise en suspension des poussières (accumulées sur le revêtement routier) à chaque passage de véhicule [11]. À noter à ce sujet que le balayage des routes a donné des résultats mitigés en termes de réduction de la remise en suspension des poussières, mais n'est d'aucun secours du tout en ce qui concerne les émissions primaires.
58. **Mesures de réduction :** Sur la base de l'expérience pratique et des témoignages limités dont on peut disposer, les mesures ci-après sont supposées réduire les effets néfastes des poussières résultant de l'usure [12] : a) réduction au minimum des sources d'émission (par exemple action au niveau des types de revêtement et des produits de sablage, application d'un enrochement plus grossier et résistant à l'usure, modification du type de revêtement, corrections apportées aux pneumatiques (plus grande résistance à l'usure), mise à l'écart des pneus cloutés) ; b) réduction au minimum de la dispersion dans l'air (toutefois, pour l'heure, les expériences faites dans le cadre d'essais sur route humide et avec des matériaux censés empêcher la dispersion des poussières restent limitées). Les mesures ciblées sur la circulation routière, telles que la limitation de la circulation, la limitation de la part du transport routier dans la circulation et l'abaissement des vitesses autorisées peuvent également contribuer à faire baisser les émissions de poussières dues à l'usure et leur dispersion dans l'air. Un freinage progressif et des accélérations moins brutales contribuent également à amoindrir l'usure.

59. **Mesures au niveau des freins :** L'usure des freins est due à la décélération forcée des véhicules routiers, durant laquelle la garniture des freins est soumise à une production de chaleur importante résultant de la friction. L'usure des freins, tout comme celle des pneumatiques, peut libérer des métaux lourds toxiques. L'une des mesures envisageables pour réduire les émissions de ce type consiste à modifier la composition des freins (les disques de freins céramique, par exemple, produisent moins d'émissions). Un système de freinage à captation de particules a récemment été mis au point, grâce à quoi les particules produites par les sabots de frein sont récupérées. Le freinage avec récupération d'énergie est de plus en plus répandu dans les modèles de véhicules les plus récents. Grâce à ce système, un freinage léger à modéré est obtenu par la résistance d'un générateur couplé aux roues. Cela permet de récupérer une partie de l'énergie cinétique pour recharger la batterie du véhicule et économiser le carburant. Parallèlement, ce système permet de réduire l'usure des plaquettes de freins.

F. Moteurs à essence des engins mobiles non routiers

60. Les engins mobiles non routiers à essence appartiennent à une catégorie très disparate qui comprend des engins portatifs et non portatifs (pour le ménage, le jardinage, l'agriculture et la foresterie), couvrant un large éventail en termes de dimensions et de puissance [13] [3]. Les principaux polluants émis par ces engins sont les composés organiques volatils (COV) et le monoxyde de carbone (CO) [14]. Les COV sont le résultat d'une combustion incomplète et de pertes par balayage, dues en majeure partie à l'utilisation très répandue du moteur à deux temps dans cette catégorie d'engins. Les émissions de particules provenant d'engins de ce type sont également une source de préoccupation (excès d'hydrocarbures). Sont surtout concernées les personnes qui sont au contact direct de l'échappement, à commencer par celles qui manient les engins.

1. MTD applicables aux engins neufs (systèmes courants de réduction des émissions)

61. La réduction des émissions des engins mobiles non routiers à essence est moins avancée que pour les moteurs à essence des véhicules routiers

en raison de facteurs limitatifs qui tiennent aux contraintes d'espace, à la température maximale de fonctionnement, au bruit et à la durée de vie totale limitée. De tels engins doivent parfois pouvoir fonctionner dans différentes positions. En raison de leur puissance massique élevée et de l'absence de carter d'huile moteur, les moteurs à deux temps sont un choix idéal dans cette catégorie d'engins.

62. Les systèmes antipollution de cette catégorie sont essentiellement centrés sur la réduction des pertes par balayage des moteurs à deux temps. Les techniques utilisées à cet effet consistent notamment à améliorer la gestion de la combustion et du mouvement du mélange (injection directe, injection par ondes de compression, balayage stratifié), etc. Ce sont les techniques les plus courantes appliquées sur les petits engins portatifs comme les tronçonneuses. Une stratégie différente consiste à remplacer le moteur à deux temps par un moteur à quatre temps, en particulier lorsqu'il s'agit de machines au sol, comme les tondeuses à gazon ou les rouleaux compacteurs. Une autre solution envisageable pour certaines applications (par exemple dans le cas des tondeuses à gazon) consiste à remplacer le moteur à essence par un moteur électrique.

63. La réduction des émissions par traitement catalytique en aval est un choix moins fréquent dans les petits engins à essence de cette catégorie (par rapport à des engins plus conséquents) et elle est limitée par un certain nombre de facteurs. Le fonctionnement de moteurs à mélange riche permettant de réduire la température des gaz d'échappement limite l'efficacité du traitement aval par oxydation. De plus, les catalyseurs d'oxydation peuvent faire monter la température des gaz d'échappement au-delà d'un seuil admissible ou de confort. C'est pourquoi les systèmes antipollution catalytiques ne sont en usage que sur certains types de machines.

2. MTD applicables aux engins existants (en service)

64. Le caractère particulier des engins non routiers à essence et des pratiques antipollution à leur appliquer font qu'il faut recourir à des techniques individuelles pour tenter de remédier aux émissions des engins existants. Les mesures ci-après correspondent par conséquent aux MTD de cette catégorie particulière.

65. **Remplacement** : Les machines de cette catégorie peuvent avoir une durée de vie très brève (de cinq à six ans) et sont relativement peu onéreuses. Par conséquent, le remplacement pur et simple de l'engin par un autre d'une génération plus récente peut être considéré comme une MTD, sachant que le nouvel équipement sera conforme aux dernières réglementations en matière d'émissions.

66. **Lubrifiant de bonne qualité** : Il est important d'utiliser un lubrifiant de bonne qualité (approuvé par le constructeur) et à faible teneur en additifs (exempte de calcium et de soufre notamment), surtout pour les moteurs à deux temps. Cela renforce en outre l'efficacité et le bon fonctionnement dans la durée d'un éventuel traitement catalytique en aval. Une très bonne lubrification est essentielle pour lubrifier le moteur d'outils à positions multiples tels que taille-haies, tronçonneuses et autres machines de tronçonnage. L'emploi d'une huile de bonne qualité, avec ou sans catalyseur, prend donc une importance croissante. Une MTD en la matière peut être de recommander le type d'huile préconisé par le constructeur de préférence à des huiles de substitution moins chères.

67. **Essence non aromatique (alkylat)** : Les émissions qui se produisent au démarrage ou en cours de fonctionnement (lorsque l'engin est chaud) peuvent être réduites en utilisant une essence exempte de composés aromatiques, de benzène et d'oléfines. Ce type de carburant est appelé « essence alkylat » en raison de sa haute teneur en paraffines ramifiées (alkylats). De plus, le système relativement simple d'alimentation en carburant des petits engins entraîne une évaporation relativement forte du carburant ; l'utilisation d'essence exempte de composés aromatiques et de benzène réduit par conséquent les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), le benzène et autres composants toxiques (notamment mutagènes) des polluants libérés par voie d'évaporation.

3. Futurs types d'engins

68. Les nouveaux types d'engins conçus pour répondre à la prochaine norme antipollution (phase III) pourront tirer parti des solutions technologiques plus avancées ci-après.

69. **Améliorations au niveau de la combustion** : La technologie des moteurs à quatre temps continuera d'être dominante et fera sans doute aussi son

apparition sur les engins plus petits. On voit aussi apparaître des moteurs mixtes, dans lesquels la lubrification se fait comme dans les moteurs à deux temps (grâce au mélange carburant/huile), la combustion s'effectuant en mode quatre temps pour éviter les pertes par balayage. Le balayage stratifié, dans lequel de l'air moins carburé est utilisé pour balayer les gaz d'échappement du cylindre, est également un concept applicable aux moteurs à deux temps.

70. **Systèmes antiévaporation** : Les pertes dues à l'évaporation contribuent sensiblement aux émissions totales de COV produites par les engins de cette catégorie. Cela s'explique principalement par leur système relativement simple d'alimentation en carburant qui produit une plus forte évaporation. L'usage de réservoirs et de tuyaux à faible perméabilité constituent par conséquent une MTD pour la réduction des émissions dues à l'évaporation. Alors que la technologie de réduction des émissions existe et que les règlements en vigueur aux États-Unis poussent à réduire le phénomène d'évaporation, rien dans les règlements en vigueur en Europe ne va pour l'instant dans ce sens.

G. Engins mobiles à moteur diesel non routiers et destinés au réseau ferré

71. Les engins mobiles non routiers à moteur diesel appartiennent à une catégorie de sources mobiles qui posent des problèmes de pollution comparables à ceux qui touchent les véhicules utilitaires lourds, à savoir d'importantes émissions de NO_x et de particules, et de COV (et de particules) émis par le carter moteur des véhicules anciens. Ces émissions sont particulièrement préoccupantes dans les milieux écologiquement sensibles tels que les tunnels, les mines, etc.

1. MTD applicables aux engins neufs (systèmes courants de réduction des émissions d'échappement)

72. Le respect des normes les plus récentes en matière de réduction des émissions se vérifie au moyen de mesures de contrôle qui constituent les MTD pour les engins récents. La configuration type d'un système de réduction des émissions conforme à la phase IV/niveau 4 se compose d'un moteur diesel

à injection directe, avec turbocompresseur et échangeur thermique intermédiaire. Le recyclage des gaz d'échappement sera parfois présent, mais la réduction catalytique sélective sera normalement suffisante pour faire baisser les émissions de NO_x sous le niveau requis. Un catalyseur d'oxydation pour moteurs diesel pourra le cas échéant être mis en œuvre pour oxyder un éventuel excès de NH_3 et éviter un dépassement de la valeur limite réglementaire de 25 parts par million (ppm). Pour la réduction des émissions de particules, on a habituellement recours à un catalyseur d'oxydation pour moteurs diesel ou un catalyseur d'oxydation de particules. De manière générale, les filtres à particules à parois filtrantes ne sont pas nécessaires pour rester sous les limites correspondant à la phase IV/niveau 4.

2. MTD applicables au parc existant (engins et machines en service)

73. Les engins mobiles non routiers ont une longue durée de vie. Il faut par conséquent envisager différentes mesures techniques pour réduire les émissions du parc existant. Les recommandations de MTD ci-après peuvent être envisagées à cet effet.
74. **Adaptation ultérieure de dispositifs RCS et de filtres à particules** : L'adaptation ultérieure de dispositifs antipollution est une pratique courante en ce qui concerne les engins mobiles non routiers, et elle donne de très bons résultats en termes de réduction des émissions pour autant que les dispositifs utilisés soient d'un type homologué. La réduction catalytique sélective (pour les NO_x) et les filtres à particules (pour les particules), ou une combinaison des deux, correspondent à un usage courant permettant de faire baisser sensiblement les émissions, chose qu'il importe de faire dans les milieux sensibles tels que les tunnels, les mines, etc.
75. **Autres dispositifs antipollution pour installation ultérieure** : Les catalyseurs d'oxydation pour moteurs diesel peuvent être mis en œuvre en combinaison avec des filtres à particules et des dispositifs de réduction catalytique sélective. Utilisés seuls, ils peuvent être considérés comme une MTD, surtout dans le cadre d'applications à grande échelle, car ils résistent mieux que les filtres à particules au soufre contenu dans les carburants et peuvent être mis en œuvre là où d'autres facteurs techniques (tels que les possibilités de régénération) excluraient d'utiliser des filtres à particules. Les systèmes antipollution à ventilation du carter moteur peuvent être envisagés comme MTD pour lutter contre les émissions provenant du carter moteur des engins non routiers à moteur diesel et peuvent être combinés avec un catalyseur d'oxydation ou un filtre à particules. Les dispositifs de recyclage des gaz d'échappement, en revanche, n'offrent que peu de possibilités en raison des difficultés techniques que pose leur incorporation aux engins existants.
76. **Changement de carburant** : Parmi les carburants de remplacement envisageables, seul le gazole renouvelable peut être proposé pour les engins existants. Les réductions d'émissions rendues possibles par ce biais sont cependant modestes. D'autres types de carburant, tels que le gaz naturel, le diméthyle éther et le gazole émulsifié, en dépit des quelques avantages qu'ils offrent en termes de diminution des émissions et des gaz à effet de serre, ne sont pas à recommander en vue d'une application à grande échelle en l'état actuel des choses en raison de diverses limites techniques, économiques ou autres. L'agrogazole de première génération est peu efficace en termes de réduction des émissions compte tenu des proportions aujourd'hui autorisées par la loi.
77. **Hybridation** : Le fait de remplacer de vieux engins mobiles non routiers par des équipements hybrides neufs peut amener une réduction des émissions et, parallèlement, une économie de carburant. La technologie n'a toutefois pas encore atteint le niveau de la production de masse, et les expériences faites en la matière restent très limitées. En tout état de cause, c'est une option prometteuse à l'avenir pour certaines catégories d'engins, comme les engins de manutention portuaire. L'utilisation qui en est faite aujourd'hui donne des résultats mitigés tant en ce qui concerne la lutte contre la pollution que la consommation de carburant, lesquelles dépendent très largement de la concordance entre la stratégie de fonctionnement hybride et le cycle d'essai. Les principales contraintes concernant cette catégorie de source sont un surcoût à l'achat, la récupération et le retour sur investissement, l'économie réelle de carburant et les technologies concurrentes.
78. En plus des techniques antipollution susmentionnées pour le parc existant, la remotorisation (c'est-à-dire le simple remplacement du moteur par un moteur neuf) peut également être une stratégie efficace dans certains cas. En

raison de la durée de vie habituellement longue de certains engins mobiles non routiers, l'option de la remotorisation permet d'installer un nouveau moteur (équipé ou non d'un dispositif de réduction des émissions d'échappement) répondant à des normes d'émissions nettement plus strictes, et permettant parfois une économie de carburant et des coûts d'entretien moindres. La remotorisation est particulièrement courante pour les anciennes locomotives à moteur diesel (remplacement du moteur par des groupes diesel) et peut être élargie à d'autres types de machines, surtout lorsque le coût du moteur ne représente qu'un pourcentage relativement faible du coût total de la machine (le cas des grues, par exemple).

3. Engins et machines futurs

79. **Réduction des émissions des engins de conception diesel** : La principale nouveauté attendue de la phase V [15] à venir concerne l'introduction de filtres à particules à parois filtrantes destinés à filtrer les particules et à en réduire le nombre. En principe, on devrait ainsi pouvoir aligner la lutte antipollution concernant les engins non routiers sur les normes les plus récentes en matière de réduction des émissions des véhicules routiers (normes Euro 6). La mesure des émissions (au moyen d'un système portatif de mesure des émissions) pendant le fonctionnement des engins, comme le prévoit la réglementation, sera garante de l'efficacité de la lutte antipollution en fonctionnement normal. D'autres gains en termes de réduction des émissions peuvent être obtenus par une application plus répandue du recyclage des gaz d'échappement, l'optimisation de la réduction catalytique sélective et la combinaison éventuelle du dispositif RCS et du filtre à particules dans un même ensemble.
80. **Carburants et systèmes de propulsion de remplacement** : Il est certainement plus difficile de faire adopter ces carburants et systèmes de propulsion par le marché des engins mobiles non routiers (par opposition aux véhicules routiers), car la motorisation diesel est de loin préférable pour ce type d'engins en raison de son efficacité élevée, de sa durabilité et de ses caractéristiques de couple moteur. En tout état de cause, ceux de ces concepts qui semblent présenter un potentiel pour l'avenir sont le gaz naturel, le filtre à particules et les engins hybrides dans certaines applications spécifiques (par exemple dans les engins de manutention

portuaire). Pour l'heure, l'expérience acquise dans chacun de ces cas reste très limitée.

H. Bateaux à moteur diesel (navigation intérieure)

81. Les bateaux et autres engins à moteur diesel sont parmi les types d'équipements de transport qui ont la plus longue durée de vie, laquelle peut parfois dépasser trente années. Qui plus est, d'année en année, seul un très petit pourcentage de ces bateaux vont à la démolition et sont remplacés. Compte tenu de cette réalité, il est donc à prévoir que les mesures antipollution concernant les bateaux neufs ne produiront que très lentement leurs effets et, logiquement, les mesures ciblant les bateaux existants et les types de carburant actuellement en usage devraient avoir des effets plus sensibles. On trouvera ci-après les principales mesures de réduction des NO_x et des émissions de particules concernant les bateaux à moteur diesel. Les émissions de SO_x peuvent être réduites avec un carburant à faible teneur en soufre.
82. **Réduction des émissions de NO_x au moyen de dispositifs embarqués de traitement antipollution en aval** : Les systèmes de réduction catalytique sélective, qui sont conceptuellement similaires à ceux utilisés dans les véhicules routiers à moteur diesel, peuvent être installés après coup sur les bateaux existants ou être appliqués aux bateaux neufs pour une réduction efficace des émissions de NO_x. La réduction des émissions sera cependant moins sensible en cas de faible charge (<25 %) et de navigation à vitesse réduite.
83. **Réduction des émissions de particules au moyen de dispositifs embarqués de traitement antipollution en aval** : Les épurateurs sont surtout connus pour leur capacité de réduction des émissions de SO_x, mais ils sont utiles également pour lutter contre les émissions de particules. Dans les bateaux neufs en particulier, ils ont valeur de MTD (à combiner le cas échéant avec un dispositif de réduction catalytique sélective pour une diminution accrue des NO_x). Une installation après coup est possible, mais elle peut se heurter à des contraintes techniques de mise en œuvre (contraintes d'espace, poids, et contraintes liées au besoin de stabilité du bateau). Quant aux filtres à particules, ils ne correspondent pas à une technologie d'utilisation courante sur les bateaux. Ils ne sont pas au point commercialement parlant, et rien ne garantit que l'effet sur les émissions de

particules sera du même niveau que dans les engins mobiles non routiers. Leur potentiel futur pourrait toutefois se révéler plus prometteur, surtout en navigation intérieure où l'on utilise un carburant à faible teneur en soufre.

84. **Carburants de remplacement** : L'un des moyens de réduire à la fois les émissions de NO_x et de particules pourrait être d'abandonner le gazole au profit du gaz naturel liquéfié (GNL). Cela permettrait en outre d'éliminer la majeure partie des émissions de carbone noir (celle qui importe du point de vue écologique) et de rendre les exploitants moins dépendants à l'égard des combustibles fossiles. Toutefois, étant donné les modifications majeures que nécessiterait un tel changement, celui-ci, pour être économiquement rentable, se justifierait surtout pour les bateaux de construction récente. La disponibilité de ce type de carburant est actuellement considérée comme le principal obstacle à une utilisation plus répandue. Les émissions de méthane dues à la combustion de gaz naturel dans les bateaux doivent également retenir l'attention [1].

I. Navires

85. Les navires (destinés à la navigation dans les eaux maritimes nationales ou internationales) utilisent des moteurs diesel de même type que les bateaux pour la navigation intérieure, encore qu'ils soient de plus grandes dimensions. Les mêmes dispositifs embarqués de traitement antipollution en aval peuvent donc être utilisés pour réduire les émissions de NO_x et de particules, tout comme une conversion au GNL peut également être envisagée. On trouvera ci-après quelques questions complémentaires en rapport avec les navires et les techniques de réduction des émissions s'y rapportant.
86. **Zones de contrôle des émissions** : Les zones de contrôle des émissions sont des zones côtières spécialement désignées, où les problèmes de qualité de l'air se posent avec une acuité particulière et à l'intérieur desquelles les navires sont tenus au respect d'exigences strictes en matière d'émissions. Jusqu'ici, ces exigences ont concerné les zones de contrôle des émissions de soufre, qui imposent l'utilisation de carburants à teneur nettement plus faible en soufre, et les zones de contrôle des émissions d'azote, qui imposent aux navires de construction récente (ou ayant fait l'objet d'une remotorisation majeure) une réduction nettement

plus forte de leurs émissions de NO_x. En Europe, la mer Baltique et la mer du Nord sont des zones de contrôle des émissions de SO_x, tandis qu'aux Amériques, les restrictions, qui concernent les zones côtières de l'Amérique du Nord, des États-Unis et des Caraïbes, portent à la fois sur les SO_x et les NO_x. Les mesures de contrôle des émissions qu'imposent les zones en question peuvent être considérées comme des MTD. Elles concernent des types de carburants particuliers ayant une teneur maximale en soufre et/ou des technologies embarquées de réduction des émissions, telles que la réduction catalytique sélective et les épurateurs. Ces derniers ont été mis en œuvre avec succès pour permettre aux navires au fioul lourd de pénétrer dans les zones de contrôle des émissions. Un élargissement de ces zones de contrôle pourrait permettre d'engranger davantage de bénéfices en termes de lutte antipollution.

87. **Restrictions concernant la teneur en soufre** : Les cibles finalement fixées pour la teneur équivalente en soufre des carburants sont des solutions de 0,5 % m/m maximum hors des zones de contrôle des émissions et de 0,1 % m/m maximum à l'intérieur de ces zones, avec une application graduelle pour chaque type de carburant. Un tel abaissement de la teneur en soufre peut être atteint en recourant à certains types de carburant ou en procédant à la remotorisation des navires de telle façon qu'ils soient alimentés par un carburant de remplacement comme le gaz naturel, ou encore en procédant à l'installation d'épurateurs. Dans chacun de ces cas, on se heurtera à des contraintes économiques, techniques ou d'accessibilité. N'importe laquelle de ces options techniques est intéressante pour réduire les niveaux d'émissions de SO_x, et le choix à faire en définitive dépendra du type de navire et de son mode opérationnel.
88. **Initiatives portuaires** : Plusieurs ports dans le monde ont mis au point un système en vertu duquel les navires à quai sont alimentés en énergie par des unités à terre et non par leurs propres moteurs. Cette pratique profite à l'environnement local en ce sens que l'air ambiant est ainsi débarrassé de tout un ensemble de polluants. Le besoin de spécifications universelles concernant l'apport d'énergie gêne l'élargissement de ce système à un plus grand nombre de ports. Les réductions d'émissions au niveau national pouvant être obtenues à l'aide de telles mesures dépendent du mix énergétique et des technologies mises en œuvre pour la production d'électricité. D'autres systèmes incitatifs en vigueur

dans les ports concernent la limitation de la vitesse de navigation, la réduction des manœuvres, etc.

J. Aéronefs

89. La combustion en régime basses émissions de NO_x et les améliorations portant sur la conception des aéronefs sont deux des techniques de réduction des émissions que les constructeurs peuvent mettre en œuvre sur chaque type d'aéronef. L'abaissement des émissions de NO_x à la source est obtenu par la combustion d'un prémélange pauvre et l'utilisation d'une chambre de combustion à basses émissions, notamment par une conception appropriée du type d'injecteur et du revêtement thermique, et une gestion dynamique de la combustion et des conditions de fonctionnement, avec une limitation de la température de pointe et de la durée pendant laquelle cette température est atteinte. Les améliorations apportées au niveau de la conception des aéronefs concernent la diminution du poids de base des aéronefs, les progrès en termes d'aérodynamique et le fonctionnement spécifique général des moteurs, ainsi que la conception des aéronefs volant à faible altitude et à vitesse réduite. Dans ce dernier cas, il faut prêter attention aux répercussions négatives possibles sur la consommation de carburant et sur les coûts de fonctionnement.

K. Tramways électriques, métros et trolleybus

90. Les tramways électriques, les métros et les trolleybus ne produisent ni gaz d'échappement ni émissions dues à l'évaporation. Ils sont cependant une source d'émissions de métaux lourds qui sont dues à l'usure des pièces et plus particulièrement à la friction sur les rails et les lignes d'alimentation électrique. Les émissions d'étincelles qui se produisent sur les lignes d'alimentation concourent elles aussi aux émissions de métaux lourds. Les émissions produites par le glissement et les émissions d'étincelles des caténaires sur les lignes d'alimentation électrique n'ont pratiquement pas été étudiées, et leur apport à l'inventaire des émissions n'est habituellement pas pris en compte. Plusieurs études réalisées aux États-Unis et en Europe ont apporté la preuve de

concentrations élevées de carbone et de plusieurs métaux dans les stations de métro [16] [17]. De plus, il ne faut pas oublier que la production d'électricité est également associée à de sérieux problèmes de pollution sur le site des centrales électriques, en fonction du mix énergétique des pays concernés.

91. L'utilisation de systèmes de transport public est en soi une mesure efficace pour lutter contre la pollution atmosphérique et améliorer la qualité de l'air dans les villes en ce sens qu'elle favorise des moyens de transport non polluants pouvant accueillir des passagers en grand nombre, de préférence aux voitures particulières et aux autobus à moteur diesel. On trouvera ci-après une liste indicative des mesures complémentaires concernant l'utilisation de ces systèmes de transport public visant à renforcer la protection de l'environnement et l'efficacité énergétique et à améliorer la qualité de l'air :
- a) **Mesures ciblant les flottes de véhicules et les réseaux de transport** : Modernisation du parc existant et optimisation de la gestion des flottes de véhicules, accroissement de la vitesse des moyens de transport public par la création de voies de circulation réservées et l'application de mesures de régulation de la circulation, inspection et entretien des rails et autres installations fixes, etc. ;
 - b) **Mesures à caractère général** : Mesures destinées à rendre attractifs les moyens de transport public (par l'adoption de politiques favorisant le stationnement à proximité des stations et d'abaissement des tarifs de transport, l'expansion des réseaux et la création de nouveaux itinéraires), accent mis sur le transport intermodal et réduction de la durée des déplacements, mise en œuvre de systèmes sophistiqués de gestion de la circulation ;
 - c) **Mesures techniques** : Réduire la friction en agissant sur la conception des équipements et en favorisant certaines matières, éliminer la production d'étincelles soit par des mesures mécaniques, soit plus probablement par des mesures électriques.



V.
Mise en œuvre et mesures
non techniques

92. La mise en œuvre et les mesures non techniques viennent en appui aux mesures techniques destinées à faire baisser davantage les émissions. La mise en œuvre correcte des mesures, en particulier, revêt une importance cruciale pour contrôler le fonctionnement des véhicules et des engins en service. Les mesures non techniques peuvent appuyer ou faciliter les adaptations postérieures d'équipements associées à des MTD, accélérer l'introduction de nouvelles MTD (véhicules, moteurs) et de carburants moins polluants, réduire la circulation et/ou promouvoir la transition vers des modes de transport plus respectueux de l'environnement tels que le chemin de fer, le transport maritime, le transport par voie fluviale et les transports combinés. S'agissant de la circulation en milieu urbain, les mesures non techniques sont également ciblées sur une meilleure intégration de l'utilisation des sols et des moyens de transport et sur la création d'infrastructures et d'installations favorisant une mobilité peu polluante (bicyclettes, transports publics, etc.). Là où cela s'y prêtait, certaines mesures non techniques ont été citées au chapitre précédent.
93. On trouvera ci-après une brève description des pratiques d'inspection et d'entretien faisant figure de mesures clefs pour la mise en œuvre, ainsi que certaines mesures non techniques d'application courante. L'application de mesures non techniques peut différer dans la pratique et être combinée avec un financement spécifique et des systèmes incitatifs (structurels, financiers ou à visées restrictives), à des droits et des taxes, à des exemptions ou des allègements de taxes, à des subventions, etc.
94. **Inspections renforcées et programmes d'entretien :** Les inspections et l'entretien des équipements sont l'un des moyens de surveiller le niveau des émissions, la consommation de carburant et la sécurité des véhicules en y remédiant si nécessaire, et d'agir sur ceux qui ne sont pas en conformité avec les normes fixant des limites spécifiques en matière d'émissions. Ces tâches s'effectuent à l'aide de contrôles visuels et de mesures des émissions et par la mise en œuvre de divers moyens ou instruments techniques. Les normes de performance de base en matière d'inspection et d'entretien comprennent généralement les essais à vide, les essais portant sur les émissions d'échappement et les contrôles destinés à vérifier que les éléments critiques de réduction des émissions sont présents et fonctionnels. Les normes de performance plus poussées concernent notamment les essais portant sur les émissions d'échappement et les essais de purge du système de contrôle des émissions par évaporation, et l'inspection visuelle du catalyseur et du limiteur de débit du carburant. Le système d'autodiagnostic est un système informatisé qui surveille en permanence les senseurs électroniques, le système de réduction des émissions et le convertisseur catalytique, et qui vérifie leur bon fonctionnement. Les instruments de télédétection peuvent également être utilisés pour mesurer les émissions contenues dans le flux de gaz d'échappement.
95. **Zones écologiquement sensibles :** La principale finalité d'une zone écologiquement sensible (ou zone à émissions limitées) est l'amélioration de la qualité de l'air par l'accélération du remplacement naturel du parc de véhicules. Il s'agit habituellement d'une zone clairement délimitée où s'appliquent des restrictions d'accès spécifiques ayant pour but de réduire les émissions produites par les véhicules et d'améliorer la qualité de l'air. Les règlements en vigueur dans de telles zones peuvent concerner notamment des restrictions d'accès aux véhicules ne respectant pas les normes en matière d'émissions et/ou des restrictions d'accès certains jours ou aux heures de pointe, selon leur immatriculation. Les véhicules circulant dans ces zones alors qu'ils contreviennent aux règles prescrites encourrent habituellement des amendes.
96. **Programmes accélérés de mise à la casse :** Les véhicules de type ancien et spécialement polluants qui ont été mis en service alors que les normes de réduction des émissions étaient moins strictes et dont les systèmes antipollution sont dégradés sont souvent responsables d'un volume total d'émissions qui est disproportionné. Les programmes accélérés de mise à la casse visent les véhicules de type ancien qu'il s'agit de retirer de la circulation par le biais d'un système d'incitation destiné à en convaincre les propriétaires. Il est vraisemblable que de tels programmes se révèlent profitables pour l'environnement dans la mesure où les véhicules moins anciens répondent à des normes plus strictes en matière d'émissions et permettent de faire de plus importantes économies de carburant. Le remplacement pur et simple d'un véhicule peut être la meilleure option lorsqu'il est proche de sa fin de vie utile ou s'il a été construit avant l'entrée en vigueur de normes strictes en matière d'émissions.
97. **Transfert modal en faveur des transports publics :** Les politiques et les systèmes incitatifs qui prônent un transfert modal en faveur de moyens de transport public moins polluants sont une mesure efficace pour la réduction de la pollution atmosphérique et l'amélioration de la qualité de l'air dans les villes (favorisant par exemple l'abandon des voitures particulières et des autobus à moteur diesel au profit de moyens de transport de grande capacité utilisant l'énergie électrique comme les tramways, métros et trolleybus, ou encore les autobus utilisant des carburants ou des systèmes de propulsion moins polluants, etc.).

Bibliographie

1. Giannis Papadimitriou et autres auteurs, « Best Available Techniques for Mobile Sources in support of a Guidance Document to the Gothenburg Protocol of the LRTAP Convention », Final Technical Report for European Commission Directorate General for Environment (13 mars 2015). Consultable à l'adresse http://emisia.com/sites/default/files/BAT_Final.pdf. Ce rapport a également été présenté en tant que document d'information au Groupe de travail des stratégies et de l'examen à sa cinquante-troisième session et peut être consulté sur la page Web relative à la réunion ([http://www.unece.org/index.php?id=35605#/>/](http://www.unece.org/index.php?id=35605#/)).
2. Leonidas Ntziachristos et Maria Cristina Galassi, « Emission factors for new and upcoming technologies in road transport », JRC Scientific and Policy Reports, Report EUR 26952 EN (Ispra, Italie, Institut de l'énergie et des transports, juillet 2014).
3. IHS Global Insight, Assessment of the Effectiveness of Scrapping Schemes for Vehicles: Economic, Environmental, and Safety Impacts, Final Report for the European Commission Directorate General for Enterprise and Industry, Automotive Industry (mars 2010).
4. Organisation de coopération et de développement économiques et Programme des Nations Unies pour l'environnement, Older Gasoline Vehicles in Developing Countries and Economies in Transition: Their Importance and the Policy Options for Addressing Them (Paris, Organisation de coopération et de développement économiques, 1999).
5. Anwar Gary Haq, Giorgio Martini et Giorgos Mellios, « Estimating the Costs and Benefits of Introducing a New European Evaporative Emissions Test Procedure: final report », JRC Scientific and Policy Reports, Report EUR 26057 EN (Ispra, Italie, Institut de l'énergie et des transports, 2013).
6. International Council on Clean Transportation, European Vehicle Market Statistics: Pocketbook 2014 (Berlin, novembre 2014).
7. David C. Carslaw et autres auteurs, « Recent evidence concerning higher NO_x emissions from passenger cars and light duty vehicles », Atmospheric Environment, vol. 45, no 39 (décembre 2011).
8. Vicente Franco et autres auteurs, « Real world exhaust emissions from modern diesel cars: a meta-analysis of PEMS emissions data from EU (Euro 6) and US (tier 2 bin 5/ulev ii) diesel passenger cars » (Berlin, International Council on Clean Transportation, 2014). Consultable à l'adresse <http://www.theicct.org/real-world-exhaust-emissions-modern-diesel-cars>.
9. L. Eudy, K. Chandler et C. Gikakis, « Fuel Cell Buses in U.S. Transit Fleets: Summary of Experiences and Current Status », Technical Report NREL/TP-560-41967 (Golden, Colorado, États-Unis, National Renewable Energy Laboratory, septembre 2007). Consultable à l'adresse <http://www.nrel.gov/hydrogen/pdfs/41967.pdf>.
10. Agence européenne pour l'environnement, EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013, EEA Technical report no 12/2013, technical chapter 1.A.3.b.vi-vii Road vehicle tyre and brake wear, road surface wear (Luxembourg, Bureau des publications de l'Union européenne, 2013).
11. Hugo A. C. Denier van der Gon et autres auteurs, « The Policy Relevance of Wear Emissions from Road Transport, Now and in the Future – An International Workshop Report and Consensus Statement », Journal of the Air & Waste Management Association, vol. 63, no 2 (novembre 2013).
12. Janne Berger et Bruce Denby, « A generalized model for traffic induced road dust emissions. Model description and evaluation », Atmospheric Environment, vol. 45, no 22 (juillet 2011).
13. Union européenne, Centre commun de recherche de la Commission européenne, « 2007 Technical Review of the NRMM Directive 1997/68/EC as amended by Directives 2002/88/EC and 2004/26/EC » (Ispra, Italie, Institut de l'environnement et du développement durable, septembre 2008).
14. Agence européenne pour l'environnement, Guide EMEP-AEE (Programme concerté de surveillance continue et d'évaluation/Agence européenne pour l'environnement) des inventaires des émissions de polluants atmosphériques 2013, EEA Technical report no 12/2013, Technical chapter 1.A.4 Non-road mobile sources and machinery.

15. Commission européenne, « Proposition de règlement du Parlement européen et du Conseil relatif aux exigences concernant les limites d'émissions et la réception par type pour les moteurs à combustion interne destinés aux engins mobiles non routiers », COM(2014) 581 texte final (Bruxelles, 25 septembre 2014). Consultable à l'adresse <http://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2014/EN/1-2014-581-EN-F1-1.Pdf>.
16. Winnie Kam et autres auteurs, « A comparative assessment of PM2.5 exposures in light-rail, subway, freeway, and surface streets environments in Los Angeles and estimated lung cancer risk », *Environmental Science: Processes and Impacts*, vol. 15, no 1 (janvier 2013).
17. Winnie Kam et autres auteurs, « Chemical Characterization of Coarse and Fine Particulate Matter (PM) in Underground and Ground-Level Rail Systems of Los Angeles Metro », *Environmental Science and Technology*, vol. 45, no 15 (août 2011).

Document d'orientation sur les techniques de lutte contre les émissions pour les sources mobiles dans le cadre de la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance

À sa trente-cinquième session (Genève, 2-4 mai 2016), l'Organe exécutif a adopté le document d'orientation sur les techniques de lutte contre les émissions pour les sources mobiles, comme contenu dans ce document. Il remplace le 1999 document d'orientation sur les techniques de lutte contre les émissions provenant de certaines sources mobiles.

Le document a pour objectif de fournir aux Parties à la Convention des orientations quant aux moyens de déterminer les meilleures options envisageables pour réduire les émissions provenant de sources mobiles, compte tenu en particulier des meilleures techniques disponibles, de manière à les aider à s'acquitter des obligations découlant du Protocole de 1999 relatif à la réduction de l'acidification, de l'eutrophisation et de l'ozone troposphérique.

Information Service
United Nations Economic Commission for Europe

Palais des Nations
CH-1211 Geneva 10, Switzerland
Telephone: +41 (0) 22 917 44 44
Fax: +41 (0) 22 917 05 05
E-mail: info.ece@unece.org
Website: www.unece.org