

MOTEURS DIESEL ET POLLUTION EN ESPACE CONFINÉ

La pollution par les gaz d'échappement des moteurs thermiques équipant les engins de manutention, les machines d'excavation, d'extraction de matériaux... peut être importante en fonction du site, de la densité du trafic et de la fréquence de fonctionnement.

Cet article fait le point sur les connaissances actuelles dans ce domaine et propose les moyens appropriés pour limiter les effets toxiques des différents polluants. Il est plus particulièrement centré sur les véhicules non routiers équipés de moteurs diesel, il comporte également des informations sur les moteurs à allumage commandé qui équipent certains véhicules routiers ; certaines parties peuvent également être utiles pour la prévention de l'exposition aux gaz d'échappement de poids lourds et véhicules légers.

Les engins de manutention mobiles ou de transport, les machines d'excavation, d'extraction de matériaux, de marouflage, de forage, les engins de forte puissance de traction, de transformation d'énergie... équipés de moteurs thermiques sont couramment utilisés dans l'industrie (*Figures 1, 2*) et dans les travaux publics, du fait de leur autonomie et de leur grande capacité de travail. L'un des inconvénients des moteurs thermiques, qu'ils soient diesel ou à allumage commandé, est la pollution de l'atmosphère par les gaz d'échappement. Bien qu'ils ne contribuent souvent que pour une part limitée à la pollution globale, leurs effets peuvent devenir importants en fonction du site et de la fréquence de fonctionnement ou de la densité de trafic notamment en milieu semi-fermé (ateliers, magasins, entrepôts,

fouilles en grande masse, tranchées importantes, puits, galeries, cabines de péages, parcs de stationnement et souterrains...).

La pollution par le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NO_x), les particules et certains composés organiques affecte les personnes exposées au trafic d'engins à moteur sur les lieux de travail : aussi bien les conducteurs situés à proximité de l'échappement que les travailleurs appelés à séjourner ou circuler dans l'atmosphère polluée.

La présente publication fait le point des connaissances actuelles dans ce domaine, rappelle les principaux polluants émis, évoque les moyens appropriés pour limiter les effets toxiques par la réduction des polluants au niveau des moteurs, par les traitements des gaz à l'échappement et la ventilation.

- Moteur diesel
- Engin
- Espace confiné
- Gaz échappement
- Pollution

► Bruno COURTOIS, Alain LE BRECH,
INRS Département Expertise et conseil technique

► François DIEBOLD,
INRS Département Ingénierie des procédés

► Dominique LAFON,
INRS, Département Études et assistance médicales

DIESEL ENGINES AND POLLUTION IN A CONFINED SPACE

Exhaust fume pollution from internal combustion engines on handling, excavation, material extraction, etc. machines may be heavy depending on the site, traffic density and operating frequency.

This paper reviews current knowledge in this field and proposes suitable means for curtailing the toxic effects of different pollutants. In particular, it focuses on diesel engine-powered off-road vehicles, but also provides information on controlled ignition engines on certain road vehicles. Some sections may also be helpful in prevention of exposure to both heavy lorry and light vehicle exhaust fumes.

- Diesel engine
- Machine
- Confined space
- Exhaust fume
- Pollution

FIGURE 1

Chariot automoteur fonctionnant au gaz
Gas-powered industrial truck



Copyright Yves COUSSON / INRS.

FIGURE 2

Chariot automoteur équipé d'un moteur diesel
Diesel-powered industrial truck



Copyright Yves COUSSON / INRS.

TABLEAU I

Ordre de grandeur des principaux polluants produits par les moteurs thermiques [1]
Order of magnitude of main pollutants emitted by internal combustion engines [1]

	Monoxyde de carbone (CO) (ppm ¹)	Oxydes d'azote (NO _x) (en NO) (ppm)	Dioxyde de soufre (SO ₂) (ppm)	Hydrocarbures (C _x H _y) (ppm)	Aldéhydes (R-CHO) (ppm)	Particules (mg/m ³)
Diesel	300 à 10 000	300 à 2 000	50 à 200	200 à 1 100	10 à 300	20 à 200
Essence	10 000 à 70 000	300 à 2 000	Traces	500 à 10 000	100 à 300	Faible
Gaz	2 000 à 10 000	400 à 1 500	Traces	700 à 5 000	100	Faible

¹ ppm : partie par million soit 1 cm³ du gaz en question dans 1 m³ d'air.

Ce texte s'adresse plus spécialement aux cadres et techniciens des services de prévention ainsi qu'aux responsables de travaux au cours desquels il est fait usage d'engins équipés de moteurs thermiques.

CARACTÉRISTIQUES DES GAZ ÉMIS PAR LES MOTEURS DIESEL ET À ALLUMAGE COMMANDÉ

Deux grands types de moteurs peuvent être utilisés sur des véhicules ou engins, ce sont les moteurs à allumage commandé et les moteurs diesel. Les premiers utilisent une étincelle électrique pour enflammer le mélange air-carburant dans les cylindres ; les carburants utilisés sont soit de l'essence, soit du gaz stocké sous forme liquéfiée (GPL) ou comprimé. Pour les moteurs diesel, c'est la température de l'air

comprimé dans le cylindre qui provoque l'autoinflammation du mélange lors de l'injection du carburant.

L'essence est quasiment inutilisée comme carburant pour des véhicules non routiers. En milieux confinés (creusement de tunnel par exemple), l'essence et les gaz de pétrole ne peuvent être utilisés à cause de leur trop grande inflammabilité qui entraîne des risques d'incendie voire d'explosion. Le gaz est surtout utilisé sur des chariots automoteurs mais également sur des bus ou des véhicules utilisés en agglomération. Une grande majorité des véhicules non routiers utilisent le moteur diesel.

Les moteurs thermiques, diesel, à essence ou à gaz émettent des polluants à l'échappement ; les principaux sont donnés avec un ordre de grandeur de leur concentration dans le *Tableau I*.

Les particules émises par les moteurs diesel sont en quantités 10 à 20 fois supérieures à celles émises par les moteurs à essence. Elles sont compo-

sées d'une fraction solide comprenant du carbone et des cendres, de composés organiques et de particules de sulfate. Les composés organiques sont en grande partie adsorbés sur les particules de carbone. Ils proviennent soit des carburants soit des lubrifiants, leur composition est complexe et varie en fonction du carburant, du moteur et des conditions de fonctionnement. Ils contiennent en particulier des composés aromatiques polycycliques et des dioxines. Les particules se composent de particules élémentaires dont les tailles vont de 3 à 500 nm ; celles-ci s'agglomèrent pour former des chaînes dont la taille peut atteindre environ 30 µm. Les particules les plus fines ne représentent que 1 % en masse mais plus de 90 % en nombre. 50 à 80 % en masse des particules ont des diamètres compris entre 20 et 500 nm [2, 3, 4].

De nombreux paramètres peuvent influencer sur la composition des gaz d'échappement (*Figure 3*) :

- le type de moteur (mode d'injection),
- le réglage et l'entretien du moteur,
- le régime du moteur (ralenti,

FIGURE 3

Engin De chantier Earth moving machine



Copyright Yves COUSSON / INRS.

FIGURE 4

Engin de chantier Earth moving machine



Copyright Yves COUSSON / INRS.

accélération ou décélération, régime transitoire, marche stabilisée ou régime de croisière, pleine charge),
 ■ la chaîne cinématique de l'engin,
 ■ la présence ou non d'un dispositif de dépollution (cf. Chapitre « Dépollution des gaz d'échappement »).

Le seul régime moteur influe de façon importante sur la composition des gaz. Un moteur qui n'a pas atteint sa température de fonctionnement émet plus de polluants qu'un moteur l'ayant atteinte.

Bien qu'il s'agisse d'ordres de grandeur, les chiffres présentés dans le *Tableau 1* permettent les remarques suivantes :

- les moteurs diesel produisent nettement moins de monoxyde de carbone (CO), moins d'hydrocarbures imbrûlés et souvent moins d'oxydes d'azote que les moteurs à essence et à gaz ; leurs émissions de dioxyde de soufre sont généralement plus importantes à cause de la teneur en soufre plus importante des gazoils par rapport aux carburants des moteurs à allumage commandé ;
- les moteurs fonctionnant au gaz de pétrole liquéfié, lorsqu'ils sont correctement réglés, sont moins producteurs de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures que les moteurs diesel à charge égale et beaucoup moins que les moteurs à essence ;
- les moteurs diesel sont plus producteurs de particules que les moteurs à essence et surtout que les moteurs au GPL qui n'en produisent pratiquement pas.

Les considérations ci-dessus, au même titre que les chiffres du *Tableau 1*, peuvent être démentis dans la réalité d'em-

ploi, à cause de l'état d'usure, du réglage ou du mauvais entretien des moteurs utilisés. Ainsi, un moteur diesel usé ou mal réglé, peut produire de fortes émanations de CO et d'aldéhydes par exemple, comparables à celles produites par un moteur à essence. On retiendra l'importance du bon réglage du moteur dans les considérations de pollution atmosphérique (*Figure 4*)

La comparaison de la pollution émise par différents moteurs n'est réellement valable que pour des moteurs de puissances similaires testés selon un cycle de fonctionnement proche des conditions réelles d'utilisation (cf. *Encadré 1*).

La réglementation européenne limite les émissions pour les véhicules mis sur le marché. Celle-ci est différente pour les voitures et véhicules utilitaires légers, les poids lourds et véhicules de transport en commun et enfin les véhicules non routiers. La réglementation concernant les véhicules non routiers est en retard sur celle des véhicules routiers. L'*Encadré 1* résume les principales limitations de pollution concernant les véhicules non routiers ainsi que les poids lourds et véhicules de transport en commun.

EFFETS SUR LA SANTÉ DES ÉMISSIONS

La majorité des engins non routiers possédant des moteurs diesel, ce paragraphe ne traite que de la toxicité de ce

type de moteur. Les effets sur la santé des émissions des moteurs à essence, qui représentent moins de 0,5 % des véhicules non routiers, ne seront pas développés ici. Il ne faudra cependant pas oublier que, dans ce type d'émission, à la différence des moteurs diesel, il y a présence plus importante d'oxyde de carbone. Des informations sur les intoxications oxycarbonées peuvent être retrouvées dans le document de l'INRS TF 140 [6].

Il faudra également se rappeler qu'il y a présence de benzène, produit cancérigène, dans l'essence même, et qu'une exposition à ce produit peut avoir lieu lors du remplissage des réservoirs ou lors de l'évaporation en provenance des réservoirs en cas d'absence d'isolement [7].

Les effets sur la santé des émissions des moteurs diesel ont fait l'objet de très nombreuses études depuis une trentaine d'années [8, 9, 10, 11]. Les connaissances sont issues d'études épidémiologiques, d'expositions humaines contrôlées mais aussi d'études expérimentales chez l'animal ou sur cellules. Jusqu'à la fin des années 90, ces travaux ont essentiellement porté sur le risque de cancérogénicité depuis, d'autres types de risques, tels que les effets immunologiques ou sur la reproduction, donnent lieu à de nouveaux travaux.

L'origine de la grande quantité de travaux sur ce thème s'explique essentiellement par l'importance, en termes de santé publique, de la pollution atmosphérique créée par les émissions des véhicules.

ENCADRÉ 1

RÉGLEMENTATION CONCERNANT LA POLLUTION ÉMISE PAR LES MOTEURS

En Europe

À partir de 1970, une réglementation européenne s'est mise en place afin de limiter la pollution émise par les moteurs. L'objectif de cette réglementation est plus la protection de l'environnement et des populations que celle des personnes au travail. Malgré tout, la diminution de la quantité des polluants émis par les moteurs est favorable à la préservation de la santé et de la sécurité des professionnels susceptibles de les inhaler.

Nous nous intéresserons ici à ce qui concerne les véhicules non routiers et les poids lourds.

■ Véhicules non routiers

La réglementation, concernant les véhicules non routiers, date du 27 février 1998 (Directive 97/68/CE). Elle comprend deux étapes, la première a pris effet depuis 1999, la seconde est entrée en vigueur entre 2001 et 2004. Elle couvre les matériels suivants : puits de forage industriels, compresseurs, engins de chantier, machines de construction des routes, chariots élévateurs, chasse-neige, grues mobiles, équipements d'assistance aéroportuaire au sol. Elle ne s'applique pas aux bateaux, aux locomotives ferroviaires, aux aéronefs et aux groupes électrogènes. Enfin les tracteurs agricoles sont soumis aux mêmes valeurs limites mais les dates d'application sont différentes (cf. Directive 2000/25/CE). La directive 2002/88/CE modifie la directive 97/68/CE en étendant son champ d'application aux moteurs de moins de 19 kW à allumage commandé. Le *Tableau A* donne les limitations d'émission des étapes I et II.

La directive 2004/26/CE modifiant la directive 97/68/CE introduit des normes d'émission plus sévères qui sont alignées sur celles des Etats-Unis. Par ailleurs, les essais devront être réalisés selon une nouvelle procédure prenant mieux en compte les conditions réelles d'utilisation de ce type de moteurs. Le *Tableau B* donne les limitations d'émission prévue par cette directive.

TABLEAU A

Puissance (kW)	Date d'application	CO (g/kWh)	Hydrocarbure (g/kWh)	NO _x (g/kWh)	Particules (g/kWh)
Étape I					
130 - 560	01.1999	5,0	1,3	9,2	0,54
75 - 130	01.1999	5,0	1,3	9,2	0,70
37 - 75	04.1999	6,5	1,3	9,2	0,85
Étape II					
130 - 560	01.2002	3,5	1,0	6,0	0,2
75 - 130	01.2003	5,0	1,0	6,0	0,3
37 - 75	01.2004	5,0	1,3	7,0	0,4
18 - 37	01.2001	5,5	1,5	8,0	0,8

TABLEAU B

Puissance (kW)	Date d'application	CO (g/kWh)	NO _x + Hydrocarbure (g/kWh)	Hydrocarbure (g/kWh)	NO _x (g/kWh)	Particules (g/kWh)
			Étape III A			
130 - 560	31.12.2005	3,5	4,0			0,2
75 - 130	31.12.2006	5,0	4,0			0,3
37 - 75	31.12.2007	5,0	4,7			0,4
19 - 37	31.12.2006	5,5	7,5			0,6
			Étape III B			
130 - 560	31.12.2010	3,5		0,19	2,0	0,02
75 - 130	31.12.2011	5,0		0,19	3,3	0,02
56 - 75	31.12.2011	5,0		0,19	3,3	0,02
37 - 56	31.12.2012	5,0	4,7			0,025
			Étape IV			
130 - 560	31.12.2013	3,5		0,19	0,4	0,025
56 - 130	31.09.2014	5,0		0,19	0,4	0,025

TABLEAU C

	Date et catégorie	méthode de test	CO (g/kWh)	Hydrocarbure (g/kWh)	NO _x (g/kWh)	Particules (g/kWh)	Opacités des fumées (m ⁻¹)
Euro I	1992, < 85 kW	ECE R-49	4,5	1,1	8,0	0,612	
Euro I	1992, < 85 kW	ECE R-49	4,5	1,1	8,0	0,36	
Euro II	10.1996	ECE R-49	4,0	1,1	7,0	0,25	
Euro II	10.1998	ECE R-49	4,0	1,1	7,0	0,15	
Euro III	10.1999 EEVs*	ESC et ELR	1,5	0,25	2,0	0,02	0,15
Euro III	10.2000	ESC et ELR	2,1	0,66	5,0	0,1	0,8
Euro IV	10.2005	ESC et ELR	1,5	0,46	3,5	0,02	0,5
Euro V	10.2008	ESC et ELR	1,5	0,46	2,0	0,02	0,5

* EEVs : Véhicules à très basse émission destinés à réduire la pollution dans les villes

TABLEAU D

	Date et catégorie	méthode de test	CO (g/kWh)	NMHC ^a (g/kWh)	CH ₄ ^b (g/kWh)	NO _x (g/kWh)	Particules ^c (g/kWh)
Euro III	10.1999 EEVs	ETC	3,0	0,40	0,65	2,0	0,02
	10.2000	ETC	5,45	0,78	1,6	5,0	0,16
Euro IV	10.2005	ETC	4,0	0,55	1,1	2,0	0,03
Euro V	10.2008	ETC	4,0	0,55	1,1	2,0	0,03

^a Hydrocarbures autres que le méthane

^b Uniquement pour les moteurs à gaz

^c Non applicable aux moteurs à gaz

Les limites fixées par l'étape III A peuvent être respectées en utilisant des carburants avec des teneurs en soufre comprises entre 1000 et 2000 ppm alors que l'étape III B nécessite l'utilisation de carburant avec une basse teneur en soufre (inférieure à 50 ppm). Actuellement, la teneur maximale en soufre des carburants utilisés dans les véhicules non routiers est fixée par la directive 2003/17/CE modifiant la directive 98/70/CE avec deux échéances :

2 000 ppm au 1^{er} janvier 2000,
1 000 ppm au 1^{er} janvier 2008

Les Etats membres peuvent toutefois fixer des valeurs plus faibles.

Les carburants destinés à être utilisés dans les véhicules routiers doivent respecter des teneurs en soufre nettement inférieures (directive 98/70/CE modifiée par la directive 2003/17/CE) :

350 ppm pour le diesel et 150 ppm pour l'essence depuis le 01/01/2000,
50 ppm pour le diesel et l'essence ainsi qu'introduction et disponibilité d'essence et de diesel avec moins de 10 ppm de soufre au 01/01/2005,
10 ppm pour le diesel et l'essence au 01/01/2009.

Les données proviennent souvent d'études comparatives entre les motorisations essences et diesel.

Le milieu professionnel intervient souvent comme source de données d'observations notamment au travers des populations professionnellement exposées à partir desquelles sont issues la plupart des données épidémiologiques.

De nombreuses synthèses effectuées sur ce sujet par les organismes nationaux ou internationaux ont été publiées dans les années 90. Dans le cadre de cet article, nous nous contenterons de résumer l'état des connaissances issues de ces travaux ainsi que des dernières avancées scientifiques sur ce sujet.

EFFETS AIGUS

L'exposition à des concentrations importantes d'émissions diesel peut entraîner des signes d'irritation des conjonctives ou des voies aériennes supérieures. On pourra observer des

Poids lourds et véhicules de transport en commun

Concernant les moteurs de poids lourds et d'engins de transport en commun, la réglementation européenne a prévu plusieurs étapes pour la limitation de la pollution émise. La première connue sous le nom d'Euro I est applicable depuis 1992, elle a été suivie d'Euro II en 1996. En 1999, la directive 1999/96/CE modifiant la directive 88/77/CE fixe les réglementations Euro III, IV et V, ces deux dernières devant entrer en application respectivement en 2005 et 2008.

Le *Tableau C* résume les limitations d'émission pour les moteurs Diesel et leurs dates d'entrée en vigueur.

A partir de Euro III, les méthodes d'essais des moteurs ont été changées, le test en cycle stationnaire ECE R49 a été remplacé par deux nouveaux tests, un cycle stationnaire (ESC) et un cycle transitoire (ETC). L'opacité des fumées est mesurée par un essai spécifique (ELR).

Pour Euro III, les fabricants peuvent choisir l'un des deux types d'essais ESC ou ETC. Alors que pour Euro IV et Euro V, les moteurs doivent subir les deux types d'essais. Les limitations de pollution suivant le

test ETC sont différentes de celles suivant le test ESC et sont données dans le tableau suivant, elles s'appliquent aux moteurs diesel mais aussi aux moteurs à gaz (*Tableau D*).

Aux États-Unis

La législation américaine a adopté des normes de limitation des émissions polluantes pour les moteurs diesel non routiers dès 1994.

Les normes américaines couvrent les moteurs équipant tous les types de matériel non routier à l'exception des locomotives, du matériel minier et des moteurs de plus de 37 kW équipant les bateaux.

La mise en œuvre de la réglementation s'échelonne sur plusieurs années et se structure en quatre phases. La phase 1 (Tier 1) s'est déroulée sur la période 1996-2000. La phase 2 (Tier 2) plus restrictive s'étend sur la période 2001-2006.

La phase 3 encore plus contraignante (Tier 3) est programmée sur la période 2006-2008 (uniquement pour les moteurs de puissance comprise entre 37 et 560 kW). Une dernière phase (Tier 4) est prévue entre 2008 et 2013. Pour plus d'information sur la législation américaine, il est possible de consulter la référence suivante [5].

larmolements, picotements des yeux accompagnés d'œil rouge, ainsi qu'une irritation de la gorge accompagnée ou non de toux. Céphalées et nausées sont également possibles. Ces signes sont réversibles en quelques heures ou jours. Ils peuvent être dus aux nombreux irritants contenus dans les gaz issus des moteurs diesel (aldéhydes, oxydes d'azote notamment) mais aussi aux particules.

EFFETS CHRONIQUES

Effets cancérigènes

L'effet cancérigène potentiel des émissions diesel est de loin l'effet sur la santé le plus étudié.

Plus de soixante études épidémiologiques ont été consacrées à l'impact des émissions des moteurs sur la cancérogenèse, principalement dans des populations exposées professionnellement aux émissions diesel comme les travailleurs des chemins de fer ou des compagnies de bus, les conducteurs

professionnels (routiers, taxis), les dockers. Globalement, les résultats sont concordants et montrent une augmentation des cancers pulmonaires, dans une moindre mesure, de ceux de la vessie, dans ces populations (conducteurs de bus, cheminots, chauffeurs de poids lourds, dockers...). Le risque relatif² est faible, dans tous les cas inférieur à 2, souvent à 1,5. Le lien causal avec le diesel n'est cependant pas certain. Dans la majorité des études il existe des biais : non prise en compte des facteurs d'exposition confondants tels que l'amiante, mais surtout co-exposition fréquente avec les émissions des moteurs à essence. Le rôle du tabac a cependant pu être écarté dans quelques études.

Deux méta-analyses³ récentes sur des publications de 1975 à 1995 peuvent être citées. Lipsett [12] met en évidence un risque relatif pour le cancer du poumon égal à 1,33 (Intervalle de confiance⁴ (IC) à 95 %, 1,21-1,46). Ce risque est plus élevé pour les conducteurs de camions (1,47, IC 95 % 1,33-1,63) et les cheminots (1,45, IC 95 % 1,08-1,93). Bhatia [13]

identifie pour sa part un risque relatif de 1,33 (IC 95 % 1,24-1,44).

Les études expérimentales ont été extrêmement nombreuses avant 1995. Elles ont été réalisées par inhalation chez plusieurs espèces animales. Les émissions contenaient de 0,35 à 8 mg/m³ de particules. Certaines études ont comparé l'effet des émissions totales à celui des émissions filtrées, c'est-à-dire sans particules mais avec la même phase gazeuse. Celles effectuées chez les hamsters et les singes ont toutes été négatives. Des résultats contradictoires ont été obtenus chez la souris. Les études chez le rat ont montré une augmentation des tumeurs pulmonaires lorsqu'ils étaient exposés durant toute leur vie à des concentrations de particules supérieures à 2 mg/m³. Toutes celles exposant les animaux à des concentrations plus faibles ont été négatives. De même, chaque fois que les particules étaient filtrées, les résultats ont été négatifs. Il est actuellement admis que les particules sont responsables de cette cancérogénicité expérimentale des émissions diesel. Le mécanisme en cause est discuté [11].

Effets allergiques et immunologiques

Depuis une vingtaine d'années, la question du rôle des particules diesel dans l'augmentation constante des cas de rhinites et d'asthmes dans les pays industrialisés s'est posée.

Les études épidémiologiques se sont axées sur les enfants vivant près de grandes artères de circulation. Ces derniers semblent présenter une augmentation de symptômes respiratoires (toux, rhume, asthme...), d'autant plus marquée que le passage des poids lourds est intensif [14, 15]. Ces augmentations surviendraient surtout parmi les enfants sensibilisés aux allergènes communs [16].

Plusieurs études d'exposition contrôlée ont été menées chez des volontaires. Diaz-Sanchez [17], le premier, exposa des volontaires humains à des particules diesel par l'intermédiaire de sprays nasaux. Il montra une augmentation des immunoglobulines IgE, témoins d'une réaction allergique, dans le liquide de lavage nasal.

Depuis, plusieurs études ont été menées. Une des plus récentes montre que l'exposition nasale à un allergène et à des particules diesel diminue la production de cytokines⁵ de type Th1 – impliquée dans la résistance aux

pathogènes intracellulaires ou l'hyper-sensibilité retardée - et augmente celle de type Th2 – impliquée dans les phénomènes allergiques.

L'augmentation de ces dernières est retrouvée dans plusieurs études [18, 19]. De même, il a été montré que l'exposition simultanée à des particules diesel et à un allergène augmente la réponse de type Th2 par rapport à l'exposition à l'allergène seul ou aux particules seules.

Diaz-Sanchez [20] semble également montrer que l'exposition de sujets atopiques⁶ à un nouvel antigène n'entraîne la production d'anticorps anti-IgE que si les sujets ont été précédemment exposés à des particules diesel.

Parallèlement, un certain nombre d'études expérimentales a été effectué sur cultures de cellules humaines (nasales, bronchiques, épithéliales) [21, 22, 23, 24, 25]. Les résultats sont concordants avec les effets observés sur l'homme.

Enfin, plusieurs études ont été conduites sur des souris asthmatiques, que ce soit par inhalation, par voie intranasale ou par voie intratrachéale. Là aussi, l'exposition aux particules entraîne une augmentation de la réponse pulmonaire.

Les particules diesel semblent donc jouer un rôle dans les mécanismes allergiques en potentialisant la réponse aux allergènes. Ceci pourrait être expliqué par le développement d'une réponse de type inflammatoire, ainsi que par une introduction au niveau pulmonaire d'allergènes qui seraient déposés sur les particules diesel. Toutes ces données sont concordantes que ce soit chez l'homme, l'animal ou les modèles cellulaires.

Effets cardiovasculaires

Bien que les études épidémiologiques montrent une augmentation des décès par arrêt cardiovasculaire lors des pics de pollution de particules fines, les études spécifiquement consacrées aux effets des particules diesel sur la fonction cardiovasculaire ont fait l'objet de peu de publications. Le rôle de l'inflammation créée par les particules a pourtant été évoqué.

Une équipe anglaise a voulu le vérifier en réalisant une enquête sur 7 205 sujets, employés municipaux de la ville de Londres [26]. Pour chacun, le fibrinogène (globuline plasmatique intervenant dans la coagulation et dont l'augmentation pourrait entraîner une plus grande sensibilité à la thrombose)

sanguin a été dosé. Parallèlement les données de pollution ont été notées le jour du prélèvement ainsi que les 3 jours précédents.

■ Une corrélation significative a été trouvée entre l'augmentation du fibrinogène et :

■ les concentrations journalières de CO, de NO durant l'ensemble des saisons,

■ les fumées noires [27] et les particules d'un diamètre inférieur à 10 µm (PM 10) uniquement lors de la saison chaude.

Ces résultats vont dans le sens d'un lien entre pathologies cardiovasculaires et pollution atmosphérique d'origine automobile toutes motorisations confondues. De même, les infections respiratoires, favorisées par l'exposition aux particules, au dioxyde d'azote (NO₂), à l'ozone (O₃) et au dioxyde de soufre (SO₂), peuvent également augmenter le taux de fibrinogène plasmatique et exacerber une pathologie cardiovasculaire pré-existante.

Ces résultats ne permettent cependant pas de conclure avec certitude sur un lien particules-pathologies cardiovasculaires.

Effets sur la reproduction et le développement

Certaines études récentes sur l'animal [28, 29] semblent montrer des atteintes possibles au niveau de la spermatogénèse. Ces données sont cependant trop partielles et ne peuvent pas être extrapolées actuellement pour l'homme.

² C'est la mesure d'association entre une maladie et un facteur de risque. C'est le rapport entre le risque dans la population exposée par rapport au risque dans la population non exposée.

³ Procédé d'analyse statistique réunissant plusieurs études afin d'en augmenter la sensibilité.

⁴ Intervalle de confiance = étant donné un paramètre inconnu dans une population, on peut calculer, à partir d'un échantillon, un intervalle de confiance pour ce paramètre. Intervalle de confiance à 95 % : intervalle qui a une probabilité de 0,95 de contenir la vraie valeur inconnue. Il est d'autant plus grand que la taille de l'échantillon est faible.

⁵ Glycoprotéines médiatrices des interactions à courte distance entre les cellules.

⁶ Atopie : prédisposition familiale à certaines affections, telles que le rhume des foins, l'asthme, l'eczéma infantile. Ces affections sont déclenchées par des allergènes habituellement non pathogènes en rapport avec une production exagérée d'IgE.

VALEURS LIMITES ET ÉVALUATION DE L'EXPOSITION AUX GAZ D'ÉCHAPPEMENT

L'évaluation du risque causé par l'exposition aux substances chimiques utilise comme repère des valeurs limites d'exposition professionnelle [30].

L'évaluation du risque lors de l'exposition au gaz d'échappement peut se faire en ne considérant qu'un petit nombre de polluants qui sont, les oxydes d'azote et les particules pour les moteurs diesel, et le monoxyde de carbone et les oxydes d'azote pour les moteurs à allumage commandé. Ces valeurs limites ainsi que celles de quelques aldéhydes sont données dans le tableau suivant.

Substance	VME ⁷	VLE ⁸
Monoxyde de carbone (CO)	50 ppm (55 mg/m ³)	--
Monoxyde d'azote (NO)	25 ppm ⁹ (30 mg/m ³)	--
Dioxyde d'azote	--	3 ppm (6 mg/m ³)
Particules diesel	--	--
Formaldéhyde	0,5 ppm	1 ppm
Acroléine	--	0,1 ppm (0,25 mg/m ³)

Il n'existe pas de valeur limite en France pour les particules diesel, il est cependant possible d'utiliser les valeurs allemandes (cf. Encadré 2).

Les valeurs limites servent de base au préventeur pour évaluer le risque par comparaison à des mesures de concentrations des polluants dans l'atmosphère. La complexité des situations d'atmosphères polluées va nécessiter l'établissement

⁷ VME : Valeur Limite de Moyenne d'Exposition atmosphérique destinée à protéger les salariés des effets à terme, elle est mesurée ou estimée sur la durée d'un poste de travail de 8 heures.

⁸ Valeur Limite d'Exposition atmosphérique destinée à protéger les salariés des effets immédiats ou à court terme, elle est mesurée ou estimée sur une durée maximale de 15 minutes.

⁹ Au niveau européen, le SCOEL (Scientific Committee for Occupational Exposure Limits) a proposé d'abaisser de façon considérable la valeur limite du monoxyde d'azote à 0,2 ppm.

FIGURE 5

Consolidation des parois d'un tunnel par un robot à béton projeté
Tunnel wall consolidation using shotcrete robot



Copyright Bernard FLORET / INRS.

d'une stratégie de prélèvement qui reste une affaire de spécialiste. Cette stratégie doit en effet intégrer des paramètres qui résultent en particulier :

- des variations de la pollution à l'émission au cours du temps ;
- de la configuration du site où évoluent les travailleurs ;
- de l'existence de sources multiples de pollution (moteurs et autres sources) ;
- des conditions de température, d'humidité, des courants d'air ;
- des postes de travail ;
- des techniques de mesures disponibles.

Différentes méthodes, plus ou moins complexes et précises, permettent d'évaluer la concentration ambiante ou l'exposition des personnes aux polluants gazeux des gaz d'échappement. Les dispositifs les plus couramment utilisés pour le monoxyde de carbone et les oxydes d'azote sont des détecteurs électroniques. Il existe également des tubes colorimétriques, simples et peu coûteux, qui permettent une évaluation grossière de la concentration ambiante pour le monoxyde de carbone et les oxydes d'azote. Plus d'information sur

l'utilisation des détecteurs électroniques et des tubes colorimétriques peut être obtenue dans la brochure de l'INRS sur le sujet [31].

L'évaluation de la concentration dans l'air des particules de carbone est plus complexe et nécessite des prélèvements et une analyse en laboratoire (cf. Encadré 2).

CAS SPÉCIFIQUES DE LA POLLUTION PAR LES MOTEURS DIESEL EN ESPACE CONFINÉ

L'emploi des moteurs diesel en espace confiné (galeries souterraines, tunnels, parkings...) est limité en comparaison de leur utilisation en plein air (Figure 5). Cependant, dans ce cas, il pose des problèmes particuliers résultant de la faible ventilation naturelle et du fait que la nature

ÉVALUATION DE L'EXPOSITION
AUX PARTICULES DIESEL

Choix d'un traceur

L'évaluation de l'exposition aux particules diesel n'est pas sans difficulté pour l'hygiéniste du travail, de par la complexité des fumées d'émission des moteurs diesel d'un point de vue chimique. Sans entrer dans une énumération exhaustive des composés chimiques présents dans ces fumées, on admettra que la phase particulaire des fumées est constituée d'agrégats de particules carbonées (carbone « **élémentaire** ») sur lesquelles sont adsorbées des molécules organiques (carbone « **organique** ») telles que des hydrocarbures, des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HPA) et leurs dérivés nitrés, oxygénés. Issus du soufre contenu dans le fioul, sont également présents des sulfates inorganiques, mais en quantité décroissante avec la désulfuration de plus en plus importante des carburants diesel. S'agissant d'évaluer de façon régulière l'exposition aux particules diesel, il n'est pas envisageable de mesurer tous les composés présents et le choix d'un **traceur** s'impose. Sur la base des travaux de différentes équipes, un consensus s'est développé conduisant au choix du « **carbone élémentaire** » (CE) qui représente une fraction massique importante, bien que fluctuante, de la phase particulaire émise. L'utilisation de la fraction organique extractible par solvants s'avérerait en effet beaucoup plus difficile de par la multiplicité des molécules présentes. Par ailleurs, le carbone « **élémentaire** » peut être analysé sans trop de difficulté et plusieurs pays dans le monde ont développé une méthode d'analyse [32, 33, 34]. Cependant, il est important de signaler que le traceur carbone « **élémentaire** » n'est pas un composé chimique identifié mais plutôt une espèce définie par sa méthode d'analyse.

Prélèvement et analyse
des particules diesel

Nous rappellerons ici les principes de la méthode utilisée en France par l'INRS et les Services Prévention des CRAM ; pour plus de précision, le lecteur pourra se reporter à la méthode n° 38 du recueil METROPOL [35].

Les particules émises par les moteurs diesel étant très fines (forte pro-

portion de particules submicroniques), elles sont susceptibles de se déposer dans les alvéoles pulmonaires. Le dispositif de prélèvement doit donc permettre de collecter la fraction alvéolaire de l'aérosol diesel. Un sélecteur du type cyclone couplé à la cassette contenant le filtre de prélèvement est utilisé. Celui-ci devant être exempt de carbone, nous avons donc choisi un filtre en fibres de quartz.

La méthode d'analyse du carbone repose sur la transformation de celui-ci en CO₂ puis dosage de ce gaz. L'appareil d'analyse utilisé est un coulomètre comprenant deux parties distinctes : d'une part, un four permettant la combustion à température variable et sous flux gazeux de l'échantillon (filtre chargé de particules diesel) et, d'autre part, d'une cellule d'absorption du CO₂ formé et son analyse par coulométrie. Pour différencier le carbone « **organique** » du carbone « **élémentaire** », l'analyse est effectuée en deux étapes successives correspondant chacune à une combinaison différente du couple « température/flux gazeux ». La première étape consiste en une désorption thermique du carbone « **organique** » (CO) alors que la seconde est celle qui permet de mesurer le carbone « **élémentaire** » (CE). La somme de CO et de CE est appelée carbone « **total** » (CT).

Valeurs limites d'exposition
professionnelle (VLEP)

En 2003, seuls trois pays européens disposent d'une VLEP : Allemagne [36], Autriche et Suisse [37]. Aux États-Unis, il existait jusqu'en 2002 une valeur limite de l'ACGIH (TLV- TWA) fixée à 0,02 mg/m³ en carbone « **élémentaire** » [38], mais qui a été retirée du tableau des valeurs en proposition (Notice of Intended Changes) pour l'année 2003.

En l'absence de valeur française, l'INRS a choisi de se référer au système des valeurs allemandes qui est le plus complet actuellement en ce qui concerne les particules émises par les moteurs diesel. Ce sont des valeurs **TRK**, c'est-à-dire des valeurs limites **techniques** définissant des concentrations minimales pouvant être atteintes avec les technologies actuelles. Ces **TRK** servent de valeurs « **guide** » pour évaluer l'exposition et prévoir les moyens de protection au poste de travail :

- Mines souterraines (autres que les mines de charbon) et travaux souterrains : 0,3 mg/m³ en carbone « **élémentaire** »
- Autres travaux : 0,1 mg/m³ en carbone « **élémentaire** »

ou 0,15 mg/m³ en carbone « **total** » si CO/CE > 50%

Ces valeurs **TRK** s'appliquent à la fraction alvéolaire de l'aérosol prélevé de sorte que la méthode METROPOL n° 38 permet effectivement de mesurer des concentrations de carbone « **élémentaire** » comparables à ces **TRK**.

Normalisation d'une méthode
de mesurage des particules diesel

Afin de rendre équivalente l'évaluation des expositions aux particules diesel effectuée dans divers pays au niveau de l'Europe, la nécessité de disposer de méthodes de prélèvements et d'analyse donnant des résultats précis et reproductibles est très vite apparue. C'est dans ce sens que plusieurs laboratoires se sont regroupés dans un groupe de travail intitulé « Coordination Européenne sur l'Exposition aux Suies Diesel » (ECDSE) afin de comparer les performances des méthodes de chaque laboratoire. Pour ce faire, cinq circuits inter-laboratoires avec différents types d'échantillons ont été organisés [39, 40, 41]. Les résultats obtenus ont montré que les méthodes d'analyse utilisées pour la détermination des particules diesel sur les lieux de travail respectaient les exigences de la norme européenne EN 482. Parallèlement à ces essais, le groupe ECDSE a rédigé une norme européenne intitulée : « Air des lieux de travail - Dosage des matières particulaires émises par les moteurs diesel - Exigences générales » [42]. Cette norme devrait permettre une meilleure prise en compte de l'évaluation de l'exposition aux particules diesel en mettant à la disposition des laboratoires qui le souhaitent une méthode fiable de mesurage de ces particules.

Résultats de mesurages effectués
en milieu professionnel

Dans le *Tableau E*, nous avons rassemblé les résultats de mesures de concentrations en particules diesel réalisées dans différentes situations de travail par les laboratoires des Caisses Régionales d'Assurance Maladie et de l'INRS. A l'exception des parkings souterrains en phase d'exploitation commerciale et des entrepôts, les autres sites où des mesurages ont été réalisés présentent tous la caractéristique commune de mettre en œuvre des engins de travaux publics : chargeur, tombereau, pelle. Le tableau ci-dessous montre des dépassements de la valeur limite allemande dans le cas des travaux souterrains.

TABLEAU E

Lieu et type d'activité	Poste de travail	C.E. mg/m ³			
		nombre de mesures	mini	maxi	
Tunnel routier A : percement	Foration : ambiance	3	0,159	0,173	
	Marinage : ambiance	5	0,113	0,405	
Tunnel routier B : percement	Marinage : cabine tombereau	10	0,023	0,414	
	Marinage : zone chargement	3	0,367	0,492	
Tunnel TGV : percement	Marinage : cabine tombereau	11	0,279	0,463	
	" cabine chargeur	3	0,340	0,371	
	" cabine pelle	2	0,105	0,291	
	" ambiance	4	0,324	0,465	
Carrière souterraine : confortement	Boulonnage : ambiance	3	0,192	0,393	
	Travail au sol : ambiance	8	0,179	0,334	
Mine de sel : exploitation	Conducteur Chargeur : intérieur cabine	5	0,114	0,533	
	Conducteur autre engin : en cabine	3	0,098	0,158	
	Divers : ambiance de la mine	6	0,032	0,238	
Méto METEOR : percement de galeries	Conducteur d'engin : en cabine	5	0,191	0,325	
Méto EOLE : percement de galeries	Conducteur d'engin : en cabine	19	0,068	0,507	
	Ambiance en galerie	3	0,098	0,613	
Chantiers en souterrains :	Tranchée couverte				
	Bassin de rétention	Conducteur d'engin : en cabine	4	0,263	0,893
	Parking souterrain	Ambiance chantier	4	0,047	0,089
		Conducteur d'engin : en cabine	13	0,050	0,433
	Ambiance chantier	12	0,033	0,427	
Parking souterrain : exploitation	Ambiance du parking	15	0,005	0,039	
Manutention de produits divers en entrepôts de stockage	Cariste (chariot diesel)	21	0,009	0,056	
	ambiance des locaux 1	14	0,011	0,019	
	ambiance des locaux 2	8	0,089	0,191	

du risque due aux gaz d'échappement est quelquefois mal comprise ou sous-estimée. À titre indicatif, la combustion d'un kilogramme de gazole (donc un peu plus d'un litre) requiert 15 kg d'air environ et produit 14 m³ de produits gazeux dont une partie est dangereuse pour la santé.

Lorsque le renouvellement de l'air est insuffisant, le moteur est privé d'une partie de l'oxygène nécessaire à une combustion correcte du carburant. La dangerosité des gaz s'accroît alors sensiblement, notamment à cause de l'augmentation de la teneur en CO.

De plus, le moteur peut aspirer une partie de ses propres gaz d'échappement ou de ceux d'un moteur situé à proximité, ce qui peut résulter du fonctionnement du moteur :

- dans un espace limite non ventilé ou en cul-de-sac,
- avec l'échappement dirigé en sens opposé au sens d'écoulement de l'air de la ventilation (naturelle ou provoquée),
- à proximité de l'échappement d'un ou plusieurs moteurs voisins.

MESURES DE PRÉVENTION

Les mesures de prévention de la pollution des gaz émis par les moteurs diesel sont fondées sur les principes de prévention énoncés dans le code du travail (L230-2) :

- supprimer les risques,
- évaluer les risques qui ne peuvent être évités,
- combattre les risques à la source,
- tenir compte de l'état de l'évolution de la technique,
- remplacer ce qui est dangereux par ce qui n'est pas dangereux ou par ce qui est moins dangereux,
- planifier la prévention en y intégrant la technique, l'organisation du travail, les conditions de travail, les relations sociales et l'influence des facteurs ambiants,
- prendre des mesures de protection collective en leur donnant la priorité sur les mesures de protection individuelle.

Une analyse détaillée des procédés de travail et des modes opératoires permettra de définir les risques prévisibles et de choisir les mesures préventives techniques et organisationnelles. Cette analyse est à faire dès la phase d'élaboration du projet à la fois pour les risques prévisibles en phase exploitation et pour ceux en phase construction.

La première mesure de prévention est la limitation du nombre de moteurs diesel en utilisant des moteurs électriques chaque fois que cela est possible. Cette mesure revêt toute son importance en espace confiné (cf. Chapitre ci-dessus). Pour les travaux en souterrain, il est possible, par exemple :

- d'équiper de moteurs électriques du matériel fixe ou semi-mobile tels que compresseur, pompe à béton, chargeuse, engin de forage,
- d'utiliser de préférence, pour l'extraction et le marinage, des matériels équipés de moteurs électriques tels que machine d'attaque ponctuelle, transporteur à bande, portique,

■ de placer en surface le matériel équipé de moteur diesel.

Pour des travaux en atelier, il est possible par exemple :

■ d'organiser le travail de façon à ne pas avoir à utiliser des moteurs thermiques à l'intérieur,

■ d'utiliser de préférence des chariots automoteurs électriques ou à gaz si des puissances importantes sont requises.

Les autres mesures de prévention consistent à réduire les émissions, à la source ou par épuration des gaz d'échappement et à ventiler l'espace de travail.

RÉDUCTION DES POLLUANTS À LA SOURCE

Les paramètres de construction du moteur

Comme il a été indiqué dans le premier chapitre, les polluants émis par les moteurs diesel sont principalement :

- les oxydes d'azote (NO et NO₂),
- le monoxyde de carbone (CO),
- les hydrocarbures imbrûlés (HC),
- les particules (PT).

Les dispositions réglementaires actuelles, et notamment la mise en œuvre des étapes I et II (voir Encadré 1), ont permis de réduire les émissions polluantes et les réduiront encore. On estime que les émissions d'oxydes d'azote et de particules (PT) d'un moteur de phase II sont respectivement 40 % et 60 % moins élevées que celles d'un moteur produit avant la mise en œuvre de ces dispositions réglementaires.

En matière d'émissions de polluants, c'est le rapport air/carburant (λ) ou son inverse la richesse (r) du mélange carburé qui agit directement sur les émissions de CO, NO_x, HC imbrûlés et particules.

Les motoristes doivent donc agir sur de nombreux paramètres et réglages, dont les effets sont souvent contraires, pour limiter les émissions polluantes de leurs moteurs.

Les paramètres ayant une influence déterminante concernent :

- la définition des lois d'injection,
- l'optimisation des systèmes d'injection,
- la géométrie des chambres de combustion,
- le recyclage des gaz d'échappement (EGR).

Compte tenu de l'influence contradictoire des réglages du moteur sur les divers polluants, seule une **régulation électronique** des paramètres d'action permet d'obtenir le meilleur compromis sur les émissions des polluants.

Ainsi, un calculateur associé à des capteurs indiquant la position de l'accélérateur, la température d'air, de carburant et du liquide de refroidissement, la pression de charge, etc. agit directement sur la quantité injectée, le début d'injection, le recyclage des gaz, la pression de charge, le rapport de boîte de vitesse. La régulation électronique de l'injection et de l'EGR permet de réduire simultanément les émissions de particules et de NO_x par rapport à la régulation mécanique, tout en diminuant la consommation spécifique.

D'un point de vue pratique, les limites imposées par l'étape II (voir Encadré 1) peuvent être obtenues par une régulation électronique du moteur, associée soit à une pompe à injection simple soit à une pompe à injection haute pression (type « common rail »). Le recours à une vanne EGR n'est généralement pas nécessaire à ce stade.

En revanche, les valeurs imposées par l'étape III A imposeront, outre le contrôle électronique de la gestion du moteur, des technologies toujours plus sophistiquées telles que : turbocompresseur à géométrie variable, rampe commune à haute pression, multisoupapes, vanne EGR... L'étape III B, qui introduit une diminution importante des quantités de particules émises, nécessitera l'utilisation de filtres à particules.

Enfin, le respect de l'étape IV imposera un saut technologique important en matière de conception de moteurs diesel avec l'intégration de dispositifs de traitement des gaz d'échappement (post-traitement) permettant de réduire les quantités d'oxydes d'azote émises.

Les caractéristiques du carburant

Les caractéristiques des carburants ont une influence importante sur la nature et la quantité des polluants émis par les moteurs diesel.

En premier lieu, rappelons qu'une mauvaise qualité du carburant peut influencer de façon importante les émissions polluantes et la dégradation du moteur : dérèglement de la pompe à injection, de la vanne EGR...

La qualité du carburant est obtenue par les différents étages de filtration :

pré-filtre et filtre. Il convient par conséquent d'effectuer le remplacement ou l'entretien de ces éléments de façon rigoureuse.

Par ailleurs, la teneur en soufre du carburant est un paramètre très important, responsable de la présence de dioxyde de soufre et d'une augmentation de la teneur en particules dans les gaz d'échappement. Le soufre réduit également l'efficacité, voire empêche le fonctionnement, de nombreux dispositifs antipollution (cf. Chapitre suivant).

L'utilisation de carburants ayant une teneur en soufre aussi basse que possible est donc un moyen de réduire les émissions polluantes des moteurs diesel (particules et SO₂).

Les carburants destinés aux véhicules non routiers peuvent contenir des teneurs en soufre beaucoup plus importantes que ceux destinés aux véhicules routiers (voir encadré sur la réglementation des émissions des moteurs). Un des moyens simples de réduction de la pollution de ce type de véhicule consiste donc à utiliser du carburant destiné aux véhicules routiers plutôt que celui destiné aux véhicules non routiers (en général, du fioul domestique en France en raison du prix).

Il existe également des carburants alternatifs, utilisables pour les moteurs diesel, qui permettent de réduire l'émission de certains polluants. C'est par exemple le cas des émulsions d'eau dans le gasoil qui permettent une réduction des émissions d'oxydes d'azotes et de particules, avec cependant une augmentation des composés organiques imbrûlés [43]. Ce type de carburant est actuellement utilisé pour certaines flottes de bus.

L'entretien des moteurs diesel

Le bon entretien du moteur est un paramètre primordial qui influence directement ses émissions polluantes. En effet, les émissions de gaz et de particules peuvent varier du simple au double entre un moteur bien entretenu et un moteur identique dont l'entretien est négligé. C'est pourquoi aux États-Unis, l'agence de protection de l'environnement préconise d'effectuer des contrôles toutes les 8 000 heures.

Sans rentrer dans le détail de la maintenance d'un moteur, propre à chaque moteur et à chaque constructeur,

il est possible d'indiquer les lignes directrices d'un programme de maintenance bien conçu. Les priorités concernent :

- l'admission : le nettoyage périodique des filtres évitera la réduction anormale du débit d'arrivée d'air et la formation d'un excès de CO. Notamment, lorsque le moteur fonctionne en atmosphère empoussiérée, les canalisations entre l'épurateur d'air et le moteur doivent être étanches. Une attention particulière devra être apportée au turbocompresseur et à l'échangeur d'air si le moteur en est équipé ;

- l'échappement : mesurer la contre-pression échappement. Si celle-ci est trop importante, cela peut être le signe d'un dispositif de traitement des gaz d'échappement inadapté, source de surconsommation et d'un niveau de pollution important. Il peut également être utile de faire un contrôle des émissions polluantes avant et après le dispositif de dépollution lorsque le moteur en est équipé¹⁰ ;

- le système d'injection de gasoil : le réglage de l'injection a une importance primordiale dans l'émission des substances polluantes. Il convient de vérifier en particulier les pressions au niveau de la pompe à injection et des injecteurs, ainsi que le réglage et l'avance de l'injection ;

- le système de refroidissement : outre la vérification du niveau du liquide de refroidissement, il s'agit principalement de s'assurer de la propreté du radiateur, ainsi que du bon état de la courroie et du thermostat du ventilateur ;

- la qualité du carburant et son stockage : un stockage négligé est souvent à l'origine d'une mauvaise qualité du carburant utilisé - vieillissement du carburant, présence d'eau et de résidus divers qui génèrent des problèmes de colmatage des filtres et de dérèglement de l'injection. C'est pourquoi, le plein de carburant doit de préférence s'effectuer en fin de poste de travail, moteur arrêté, pour éviter la condensation due à l'humidité de l'atmosphère. La pénétration de gouttelettes d'eau peut empêcher le bon fonctionnement de la pompe d'injection et produire une oxydation en cas d'immobilisation prolongée du moteur. En outre, les filtres à

carburant doivent être régulièrement nettoyés ou changés. L'entretien des filtres permet d'éviter un dérèglement de l'injection par introduction de fines particules étrangères et d'améliorer la durée de service du mécanisme d'injection ;

- le système de lubrification : une attention particulière devra être apportée à la qualité des huiles utilisées, à leur stockage ainsi qu'à la vérification régulière du niveau d'huile dans le moteur qui doit en toutes circonstances rester entre les niveaux maxi et mini indiqués par la jauge.

DÉPOLLUTION DES GAZ D'ÉCHAPPEMENT

Lorsque les caractéristiques des moteurs thermiques ne permettent pas d'atteindre des niveaux de pollution aussi bas qu'il est nécessaire pour une application donnée, il est possible de leur adjoindre un dispositif de traitement des gaz d'échappement.

De tels dispositifs peuvent être utilisés sur des engins diesel employés pour des travaux souterrains ainsi que sur des véhicules ou engins utilisés en plein air ou dans des bâtiments afin de réduire l'exposition des conducteurs et des personnes qui travaillent à proximité. C'est, par exemple, le cas des chariots automoteurs diesel ou à gaz amenés à pénétrer à l'intérieur de bâtiments.

L'élimination de tous les polluants émis par les moteurs thermiques est difficile du fait de leurs propriétés chimiques différentes. On trouve ainsi des composés (monoxyde de carbone, composés organiques, particules de carbone) qui peuvent être transformés par oxydation en dioxyde de carbone ou en vapeur d'eau alors que les oxydes d'azote doivent être réduits en oxygène et azote. Le domaine de la dépollution des gaz d'échappement est actuellement en pleine évolution.

Le choix d'un système de dépollution doit prendre en compte plusieurs paramètres :

- la nature des polluants dont on souhaite diminuer la concentration,
- le niveau de réduction à atteindre,
- le type de moteur utilisé (diesel ou à allumage commandé),
- l'utilisation qui est faite de l'engin ou du véhicule.

Pour les moteurs diesel, les deux grands types de systèmes de dépollution sont :

- des filtres à particules,
- des filtres catalytiques dits "deux voies" qui permettent de diminuer la concentration des polluants oxydables.

Pour les moteurs à allumage commandé on trouve comme système de dépollution :

- des filtres catalytiques dits "deux voies" qui, comme pour les moteurs diesel, permettent de diminuer la concentration des polluants oxydables,
- des filtres catalytiques dits "trois voies" qui permettent de diminuer simultanément les concentrations en polluants oxydables et en oxydes d'azote.

Il n'existe actuellement pas de système de traitement des gaz d'échappement commercialisé permettant de réduire la quantité d'oxydes d'azote dans les gaz d'échappement des moteurs diesel de véhicules. Des études en cours dans le domaine devraient déboucher dans les années à venir [44].

Pour les moteurs diesel, il existe également des laveurs de gaz d'échappement qui permettent surtout de diminuer leur température, l'effet sur les polluants gazeux étant limité.

Les performances d'un système de dépollution des gaz d'échappement sont d'autant meilleures qu'il est adapté au moteur auquel il est associé. Les systèmes les plus performants sont ceux qui ont été développés spécifiquement pour un moteur donné.

Épurateurs pour moteurs diesel

- **Épurateurs catalytiques "deux voies"** (Figure 6)

Ils sont composés d'un support en céramique sur lequel est déposé un catalyseur métallique. Celui-ci permet une diminution de la température nécessaire pour l'oxydation du monoxyde de carbone et des composés organiques. Le rendement des épurateurs catalytiques pour les différents polluants dépend beaucoup de la température des gaz d'échappement ; pour fonctionner correctement, ils ont besoin d'une température d'au moins 300°C. Au démarrage du moteur froid ou lorsque le régime de fonctionnement est faible, leur efficacité est très mauvaise.

¹⁰ La mesure de la teneur en polluants dans les gaz d'échappement est possible à l'aide d'analyseur de gaz d'échappement. Les ateliers spécialisés dans l'entretien et la réparation des véhicules non routiers sont équipés de tels appareils et peuvent donc effectuer des contrôles de pollution.

La réduction de la teneur en CO obtenue au moyen de tels épurateurs peut atteindre 99 %, celle de la teneur en hydrocarbures et celle de la teneur en aldéhydes 90 %. Ils peuvent également entraîner l'oxydation du monoxyde d'azote et dioxyde de soufre ce qui a pour effet d'augmenter la dangerosité des gaz d'échappement [45]. Le monoxyde d'azote est oxydé en dioxyde d'azote qui est généralement considéré comme plus dangereux [46] même si le monoxyde d'azote entraîne des effets généraux sur l'organisme actuellement en cours d'étude. Le dioxyde de soufre est, lui, oxydé en trioxyde de soufre qui se transforme en acide sulfurique et sulfates par réaction avec la vapeur d'eau.

Généralement, les épurateurs catalytiques permettent également de réduire la masse des particules émises ; cette réduction ne provient pas d'une action sur les particules de carbone mais seulement de l'oxydation des composés organiques adsorbés sur ces dernières [47]. Cependant, dans certaines conditions (charge élevée du moteur et présence de soufre dans le carburant), les épurateurs catalytiques peuvent entraîner une augmentation de la masse des particules émises, résultant de la formation de particules de sulfates par oxydation du dioxyde de soufre [45,48].

Les catalyseurs des épurateurs peuvent être empoisonnés par des additifs ou des impuretés provenant des lubrifiants ou des carburants (phosphore, zinc, métaux lourds, soufre). Le fonctionnement des catalyseurs peut être empêché par des températures trop élevées (> 650°C) [47, 48].

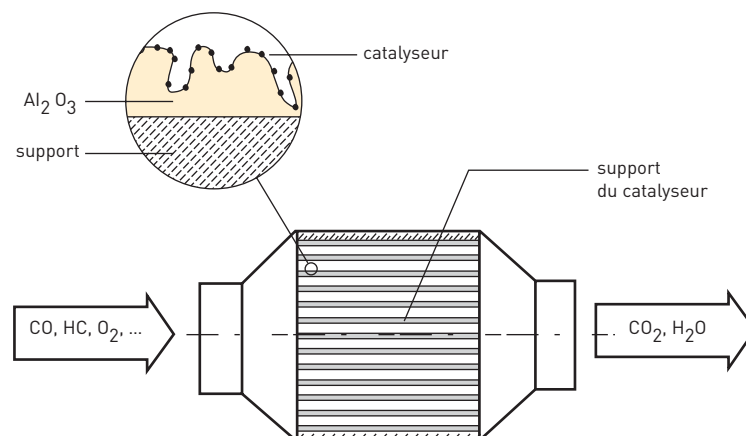
Pour effectivement diminuer la dangerosité des gaz d'échappement, un épurateur catalytique doit être optimisé afin de réduire la formation de dioxyde d'azote et de trioxyde de soufre en fonction des caractéristiques du moteur et de son type d'utilisation. L'utilisation de carburants mais aussi de lubrifiants avec une teneur en soufre aussi basse que possible est particulièrement importante pour l'efficacité de ces épurateurs.

■ Les filtres à particules (Figure 7)

Ils sont destinés à retenir les particules émises par les moteurs diesel. Il existe plusieurs types de filtres disponibles sur le marché.

FIGURE 6

Schéma d'un épurateur catalytique
Diagram of a catalytic converter



■ Les filtres « consommables »

Ils sont constitués de fibres. Les particules sont retenues dans le volume du filtre. Ils permettent de retenir de 80 à 90 % des particules. Pour éviter leur dégradation, la température des gaz d'échappement ne doit pas dépasser une température dépendant de la nature des fibres. Ils sont progressivement colmatés par les particules retenues et doivent être remplacés après un certain temps de fonctionnement du moteur.

■ Les filtres « régénérables »

Le média filtrant est constitué soit d'une céramique (généralement cordiérite ou carbure de silicium) poreuse soit de fibres céramiques^{II} ou métalliques [49 50]. Ces matériaux résistent à des températures suffisamment élevées pour pouvoir être régénérés par combustion des particules de carbone.

Lorsque la température des gaz d'échappement atteint des valeurs élevées (> 600°C) pendant des temps suffisamment longs, la combustion des particules se fait spontanément sans dispositif additionnel. Dans une majorité de cas, de telles températures ne sont pas atteintes pendant des temps suffisants. Il est alors nécessaire d'utiliser un des moyens suivants :

- un système de réchauffage des gaz d'échappement (brûleur à gazoil ou résistances électriques) permettant d'atteindre des températures suffisantes pendant des séquences de régénération du filtre ;
- un catalyseur déposé dans le permettant de diminuer la température de combustion des particules de carbone ;

- un catalyseur ajouté au carburant et qui permet également de diminuer la température de combustion des particules ;
- un filtre catalytique couplé au filtre à particules.

Lorsqu'un moteur n'est utilisé qu'à faible ou moyenne charge, un système de régénération catalytique peut nécessiter un système de réchauffage des gaz d'échappement pour fonctionner correctement.

Il existe également des systèmes de régénération du filtre hors du véhicule. Le filtre est démonté et chauffé dans un four à une température adéquate sous une atmosphère contrôlée. De tels systèmes sont notamment utilisés pour des engins miniers ou de travaux souterrains.

L'efficacité de filtration des particules varie en fonction de la nature du filtre, elle peut dépasser 90 % en masse. Ces filtres ont également une bonne efficacité pour les particules les plus fines [51].

^{II} Ces fibres sont différentes des fibres céramiques réfractaires (FCR), en particulier leur diamètre est de l'ordre 10 µm contre un diamètre moyen de 1 à 3 µm pour les FCR. Les fibres céramiques des filtres à particules ont des diamètres trop importants pour pouvoir atteindre les alvéoles pulmonaires et peuvent par conséquent être considérées comme moins dangereuses que les FCR.

Filtres en céramique avec catalyseur déposé

Ils sont fabriqués avec une céramique poreuse au cœur de laquelle un catalyseur est déposé permettant la combustion des particules de carbones pour des températures des gaz d'échappement d'au moins 350°C environ dépendant de la technologie utilisée.

Ces filtres assurent également une diminution de la teneur des polluants oxydables (monoxyde de carbone, hydrocarbures, aldéhydes) pouvant aller jusqu'à 90 %. L'oxydation de ces polluants gazeux nécessite une température suffisamment élevée, ainsi à bas régime ou peu après la mise marche du moteur froid, l'efficacité est faible voire nulle.

Pour fonctionner, ce type de filtre nécessite des carburants avec de faibles teneurs en soufre, en général moins de 500 ppm, le fonctionnement optimal du filtre s'obtenant lorsque la teneur en soufre n'excède pas 50 ppm. Ce type de filtre nécessite un nettoyage périodique suivant les préconisations du fabricant.

Filtres en céramique avec catalyseur ajouté au carburant

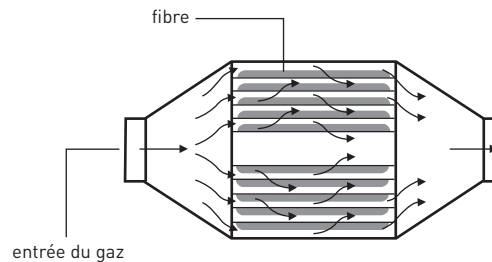
Le catalyseur est ajouté au carburant sous forme liquide soit directement sur le véhicule par l'intermédiaire d'une pompe doseuse lors de chaque remplissage du réservoir soit directement dans la cuve servant à faire les pleins. Les catalyseurs utilisés sont à base de cérium, fer, strontium ou platine. Ils permettent l'abaissement vers 300 à 400°C, dépendant de la nature du catalyseur et de la température nécessaire pour brûler les particules de carbone.

De nombreuses études montrent des réductions variables (généralement de l'ordre de 20 à 80 %) de la teneur en polluants oxydables (monoxyde de carbone, hydrocarbures, aldéhydes). Les émissions d'oxyde d'azote sont peu affectées. Une étude de l'ADEME portant sur des poids lourds équipés de ce type de filtre montre une diminution d'environ 90 % des émissions de particules par kilomètre parcouru, une diminution des hydrocarbures imbrûlés mais une augmentation des émissions d'aldéhydes et de la consommation de carburant d'environ 4 % [52].

L'utilisation d'un catalyseur ajouté au carburant entraîne l'émission d'une petite partie de ce catalyseur dans les gaz d'échappement sous forme de fines

FIGURE 7

Schéma d'un filtre à particules à cartouches concentriques Diagram of a concentric cartridge particle filter



particules. Ces émissions ainsi que leurs risques pour la santé ont été plus particulièrement étudiés dans le cas d'additifs à base de cérium [53]. Compte tenu de ce qui est connu de ses effets sur la santé et du faible niveau d'exposition causée par son utilisation comme additif dans le carburant d'automobile, les risques pour la santé peuvent être considérés comme négligeables. L'étude conclut cependant que l'évaluation ne peut être considérée comme totalement fiable à cause des connaissances actuellement limitées sur les propriétés toxicologiques du cérium.

Ces filtres tolèrent des carburants avec des teneurs en soufre plus importantes que les filtres avec des catalyseurs déposés. Ils nécessitent également un nettoyage périodique suivant les préconisations du fabricant.

Le couplage d'un filtre et d'un épurateur catalytique

Un tel système se compose d'un épurateur catalytique suivi d'un filtre à particules. L'épurateur permet l'oxydation du CO, des composés organiques ainsi que d'une partie du monoxyde d'azote. Le dioxyde d'azote formé va permettre l'oxydation des particules de carbone retenues dans le filtre à particules. Un tel dispositif permet d'obtenir une bonne efficacité vis-à-vis des particules et du monoxyde de carbone mais entraîne une augmentation des émissions de dioxyde d'azote [47].

■ Les électrofiltres

On trouve également sur le marché des filtres à particules fonctionnant sur le principe de l'électrofiltre. Les gaz et les particules circulent entre deux électrodes entre lesquelles est maintenue une différence de potentiel élevée.

Sous l'effet de celles-ci, les particules s'agglomèrent, se chargent négativement et sont attirées par l'électrode positive sur laquelle elles viennent se coller. Certains types d'électrofiltres utilisent également des dispositifs additionnels pour retenir les particules agglomérées (cyclone ou filtre). Ces filtres ont une efficacité pouvant dépasser les 90 %. La saturation du filtre n'entraîne pas de perte de charge. Ces filtres doivent être nettoyés régulièrement pour conserver leur efficacité [54, 55].

■ Les laveurs de gaz

Les bacs de barbotage ont été les premiers dispositifs utilisés pour lutter contre la pollution des moteurs diesel, notamment dans les mines de charbon. Le barbotage des gaz d'échappement présente l'avantage d'éliminer les étincelles, les particules et de refroidir les gaz.

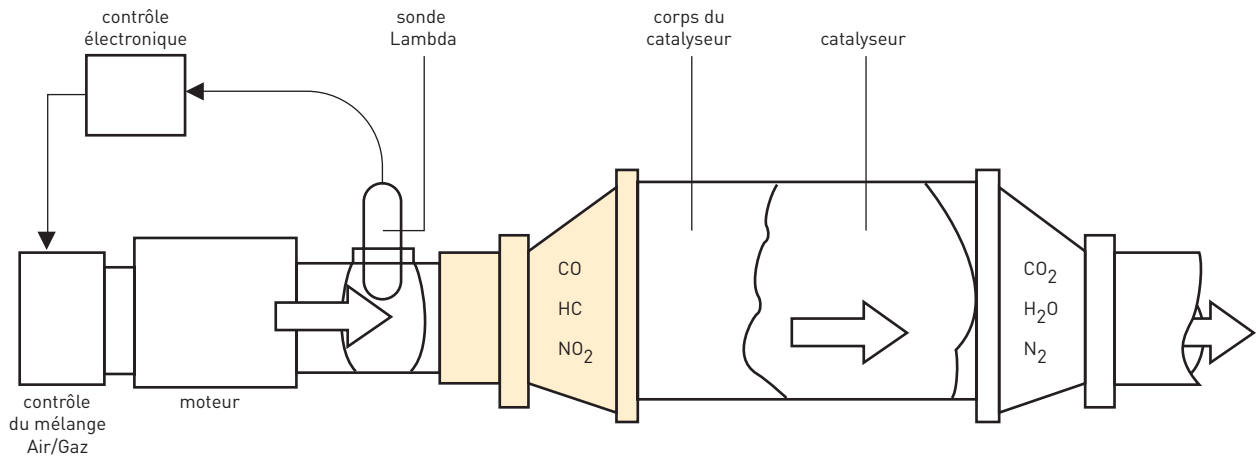
En ce qui concerne l'élimination des polluants gazeux, les bacs de barbotage sont pratiquement inefficaces. Seuls les aldéhydes et les dérivés sulfureux sont partiellement éliminés. La solubilité des aldéhydes diminue quand la température s'élève, on peut alors atteindre une saturation de la solution et l'évaporation progressive de l'eau peut conduire à un relargage de ceux-ci.

Le monoxyde de carbone et le monoxyde d'azote ne sont pas éliminés. Le dioxyde d'azote est transformé en monoxyde de d'azote et en acide nitrique.

En conclusion, les bacs de barbotage n'ont, d'une part, qu'une efficacité très limitée face aux polluants émis par les moteurs diesel. D'autre part, ils occupent des volumes importants et il est

FIGURE 8

Schéma d'un épurateurs catalytiques « trois voies » pour moteur à allumage commandé
 Diagram of a "3-way" catalytic converter for controlled ignition engines



nécessaire d'en renouveler fréquemment l'eau (environ 2 fois par poste).

Épurateurs catalytiques pour moteurs à allumage commandé

On trouve des épurateurs catalytiques « deux voies » similaires à ceux utilisés sur les moteurs diesel et des épurateurs catalytiques « trois voies » (Figure 8).

Ces derniers, en plus de l'oxydation du CO et des composés organiques, permettent la réaction entre les oxydes d'azote et le monoxyde de carbone pour former de l'azote et du dioxyde de carbone. Pour que l'épurateur soit efficace à la fois sur les composés oxydables et les oxydes d'azote, la composition du mélange air / carburant doit être maintenue dans une fourchette étroite conduisant à une proportion optimisée entre les hydrocarbures, le monoxyde de carbone et les oxydes d'azote, permettant au catalyseur de faire réagir les molécules entre elles. Le contrôle du mélange air / carburant se fait au niveau de l'injection électronique à l'entrée du moteur grâce à une sonde (appelée sonde lambda) analysant la composition des gaz en sortie du moteur.

À noter que, du fait de leur principe de fonctionnement, l'efficacité des épurateurs 3 voies sur le monoxyde de carbone est généralement moins bonne que celle des épurateurs 3 voies.

TABLEAU II

Niveaux de pollution émis par un chariot selon le type de moteur et d'épurateur utilisés
 Levels of pollution emitted by an industrial truck according to engine and converter type used

	Équipement	HC (g/kwh)	CO (g/kwh)	NOx (g/kwh)	Particules (g/kwh)
Moteur à gaz de 41 kw (ancienne génération)	Sans	1,58	2,05	20,71	-
	Épurateur 2 voies	0,32	0,04	20,85	-
	Épurateur 3 voies	0,03	0,14	1,26	-
Moteur à gaz de 41 kw (nouvelle génération)	Épurateur 2 voies	0,31	0,01	10,65	-
	Épurateur 3 voies	0,06	0,43	0,31	-
Moteur diesel de 43 kw (ancienne génération)	Sans	0,38	1,01	7,41	0,62
	Filtre à particules	0,38	1,01	7,41	0,03
	Épurateur 2 voies	0,19	0,20	4,45	0,62
Moteur diesel de 43 kw (nouvelle génération)	Sans	0,14	0,61	5,18	0,14

(Données Fenwick-Linde).

Exemple de résultats obtenus avec des systèmes de dépollution des gaz d'échappement

Le Tableau II donne les niveaux de pollution obtenus sur un chariot élévateur équipé soit d'un moteur à gaz soit d'un moteur diesel, avec et sans équipements de réduction de la pollution. On constate que le chariot équipé d'un moteur à gaz sans dispositif de dépollution est plus polluant, sauf pour les particules, que celui équipé de moteur diesel. La configuration qui permet d'obtenir la pollution la plus basse pour pratiquement tous les polluants

est le chariot avec le moteur à gaz et un épurateur catalytique à trois voies.

Ventilation

Cas général

L'assainissement de l'atmosphère de travail peut consister à appliquer l'un des deux grands principes de ventilation suivants :

- ventilation locale par aspiration au plus près de la source d'émission avant que les gaz d'échappement ne soient dispersés dans l'atmosphère et inhalés par les travailleurs,

- ventilation générale qui consiste à diluer les polluants par apport d'air neuf et par balayage du local.

Lorsque la pollution provient de véhicules en mouvement, le captage des gaz d'échappement à la source n'est généralement pas possible et c'est la ventilation générale qui doit être utilisée. Celle-ci admet une pollution résiduelle et a pour but d'abaisser la concentration des substances toxiques en dessous des seuils considérés comme dangereux pour l'homme (valeurs limites d'exposition) et de maintenir la concentration en oxygène à un niveau convenable. Par contre, lorsque des moteurs sont utilisés à poste fixe (moteurs industriels ou véhicules immobiles pour cause d'entretien ou de contrôle, par exemple), on préférera la ventilation par aspiration localisée, le captage directement au niveau du tuyau de l'échappement étant généralement possible. Il peut cependant exister des cas où, pour des raisons de contrôle technique ou de réglage de moteurs, le dispositif de captage ne peut être directement connecté sur le tuyau de l'échappement. Une étude de l'INRS (non publiée) a montré que, dans le cas du contrôle technique des véhicules légers, un tel dispositif de captage doit être placé à moins de 30 cm de la sortie des gaz d'échappement et avoir un débit d'aspiration d'au moins 1 000 m³/h.

La ventilation générale des locaux où fonctionnent des moteurs diesel est souvent délicate à réaliser et admet le mélange des polluants avec l'atmosphère. L'installation doit répondre aux principes énoncés ci-dessous [56] :

- s'assurer que la ventilation locale est techniquement impossible,
- compenser les sorties d'air par des entrées d'air pour assurer l'efficacité de la ventilation tout en évitant les effets de dépression, les courants d'air, les mouvements tourbillonnaires déplaçant les zones polluées vers les zones propres, l'inconfort du personnel...
- positionner correctement les ouvertures d'entrées et de sorties d'air pour éviter que les travailleurs soient placés entre les sources de pollution et l'extraction, pour tendre vers un écoulement général des zones propres vers les zones polluées...

En théorie, le débit d'air à mettre en œuvre dans une installation de ventilation générale peut être estimé par la relation :

$$Q = K D / (C - C_0)$$

FIGURE 9

Chantier de construction d'un passage en souterrain d'une autoroute Motorway underpass construction site



Copyright Yves COUSSON / INRS.

Q : débit de ventilation générale.
D : débit d'émission de polluants dans le cas de véhicules circulant dans un local.

Il peut être déterminé à partir des caractéristiques des moteurs données par le fabricant (attention à ce que les émissions réelles ne soient pas plus fortes que celles données par le constructeur à cause du vieillissement du moteur ou d'un entretien insuffisant). Des mesures de concentration en polluants dans les gaz d'échappement peuvent également être utilisées.

C : concentration en polluant tolérée dans l'ambiance du local.

C₀ : concentration en polluants dans l'air neuf (souvent nulle).

K : facteur de sécurité. Il prend en compte l'uniformité de la répartition du débit d'air, la position des personnes par rapport aux zones d'émission, la non-uniformité du débit des polluants. L'évaluation du facteur K est difficile ; sa valeur peut varier de 3 à 10 en fonction des facteurs ci-dessus.

En dehors de cas très simples, la ventilation est une affaire de spécialistes. Elle ne peut être improvisée et doit être étudiée chaque fois que la configuration des lieux change.

Particularités des travaux en souterrain (Figure 9)

Lors de travaux souterrains, la ventilation sert également à évacuer d'autres

polluants que les gaz d'échappement :

- poussières provoquées par la perforation et le marinage,
- dégagements de gaz contenus dans certaines roches : hydrogène sulfuré, radon...
- gaz et poussières émis lors de creusement à l'explosif.

Les principes de base à mettre en œuvre lors de travaux souterrains sont les suivants :

- le premier principe consiste à chercher à supprimer ou à limiter au mieux, sur les différents sites, l'émission de substances polluantes en prévoyant des techniques appropriées d'excavation, de marinage, de soutènement... ;
- le deuxième principe est de favoriser le captage de tous les produits dégagés au plus près de la source, afin qu'ils ne se répandent pas dans l'atmosphère du chantier ;
- enfin, en dernier lieu, il convient de diluer les polluants résiduels non captés ou neutralisés à la source, afin de maintenir leur concentration au-dessous des seuils admissibles.

Pour ces types de travaux, il existe à la fois des dispositions réglementaires qui fixent des minima en matière de ventilation, mais également des recommandations émises par l'Assurance maladie et des organisations professionnelles.

■ Textes réglementaires

Citons en premier lieu les dispositions du décret du 8 janvier 1965 (texte spécifique aux opérations de BTP) dont le titre 5 traite des travaux souterrains.

Les articles 83 à 89 traitent spécifiquement de la ventilation et introduisent les valeurs suivantes :

- ventilation au front de taille :
25 litres/seconde/homme
(soit 90 m³/heure/homme),
- en cas d'utilisation d'explosifs
prévoir une ventilation d'au moins
200 litres/seconde/m² de section.

Par ailleurs, les articles suivants du code du travail sont applicables :

Art. R. 232-5-12 : *Dans les puits, conduites de gaz, carneaux, conduits de fumée, cuves, réservoirs, citernes, fosses, galeries et dans les lieux où il n'est pas possible d'assurer de manière permanente le respect des dispositions de la présente sous-section, les travaux ne doivent être entrepris qu'après vérification de l'absence de risque pour l'hygiène et la sécurité des travailleurs et, le cas échéant, après assainissement de l'atmosphère et vidange du contenu.*

Pendant l'exécution des travaux la ventilation doit être réalisée, selon le cas, suivant les prescriptions définies à l'article R. 232-5-3 ou à l'article R. 232-5-6, de manière à maintenir la salubrité de l'atmosphère et à en assurer un balayage permanent, sans préjudice des dispositions du décret no 65-48 du 8 janvier 1965.

Art. R. 232-5-6 : *Pour chaque local à pollution spécifique, la ventilation doit être réalisée et son débit déterminé en fonction de la nature et de la quantité des polluants ainsi que, le cas échéant, de la quantité de chaleur à évacuer, sans que le débit minimal d'air neuf puisse être inférieur aux valeurs fixées à l'article R. 232-5-3.*

Lorsque l'air provient de locaux à pollution non spécifique, il doit être tenu compte du nombre total d'occupants des locaux desservis pour déterminer le débit minimal d'entrée d'air neuf.

En ce qui concerne les **industries extractives**, l'utilisation des moteurs thermiques dans tous les travaux souterrains des mines et carrières doit répondre aux dispositions du décret 87-501 du 1^{er} juillet 1987 qui constitue le titre « Moteurs thermiques » du règlement général des industries extractives institué par le décret n°80-331 du 7 mai 1980.

■ Recommandations

■ Recommandation de la CNAMTS (R 352) :

La Caisse nationale de l'assurance maladie des travailleurs salariés (CNAMTS) a publié la recommandation R 352 relative aux travaux de creusement en souterrain de galeries, de puits ou de grandes excavations [57]. Cette recommandation définit les règles minimales à respecter dans un projet de ventilation destiné à traiter les polluants émis par les activités d'un chantier souterrain.

Nous nous bornerons ici à rappeler les valeurs de base recommandées pour le dimensionnement du circuit de ventilation :

- pour la dilution des gaz émis par les moteurs thermiques : 50 l/s/CV au minimum (litre/seconde/cheval-vapeur),
- pour l'évacuation et le captage des poussières, des gaz de tirs et des gaz contenus dans les terrains : 300 l/s/m² (litres/seconde/m² de section d'ouvrage excavée) au minimum. Cette valeur est donc supérieure à celle prévue dans le décret du 8 janvier 1965 (qui est de 200 l/s/m² au minimum). Elle s'appuie sur l'expérience acquise et est nécessaire pour permettre un fonctionnement efficace de l'installation et parer aux aléas de chantier.

Les deux débits ne sont pas cumulatifs. C'est le débit le plus important qui est retenu.

Par ailleurs, deux autres principes importants sont à prendre en compte :

- respecter, entre le front et la canalisation aspirante, la distance de 5.logS (distance en mètre, S = section excavée en m²), distance déterminée de façon empirique et confirmée par l'expérience,
- au droit des emplacements de travail situés en zones empoussiérées, faire en sorte que la vitesse du courant d'air de la ventilation soit au moins égale à 0,30 m/s.

■ Recommandation de l'AFTES :

L'association française de travaux en souterrain (AFTES) a publié en 2003 une recommandation relative à la ventilation des ouvrages souterrains en cours de construction [58]. Celle-ci complète la recommandation de la CNAMTS et a pour objectif de servir de guide de conception de système de ventilation d'un chantier souterrain, à savoir, l'ensemble de dispositions et d'appareillages permettant de respecter le niveau de salubrité de l'atmosphère par la limitation des concentrations des différentes

substances polluantes, en vue de préserver la santé des personnes sur les lieux de travail.

■ Recommandation de la CRAMIF

La Caisse régionale d'assurance maladie d'Ile de France (CRAMIF) a publié une recommandation (recommandation CRAMIF n° 17) relative aux travaux souterrains autres que les galeries linéaires [59]. En effet, les travaux tels que chantiers de parking en sous-sol sous immeuble existant ou chantiers de multigaleries à formes complexes présentent des configurations différentes des cas traités par la recommandation R 352 de la CNAMTS.

Il convient par conséquent de se reporter à cette recommandation lors de l'étude puis de la réalisation de chantiers de ce type.

Remerciements :

Nous remercions la société John Deere pour ses conseils et pour les illustrations fournies ainsi que la société Fenwick-Linde pour les données qu'elles nous a procurées.

Reçu le : 10/05/2005

Accepté le : 10/10/2005

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Moteurs diesel et pollution atmosphérique en espace confiné, ND 1704, INRS, Paris, 1988.
- [2] Diesel fuel and exhaust emissions. Environmental Health Criteria 171, World Health Organisation, Geneva 1996.
- [3] Some characteristics of diesel gasoline particulate emissions. Proceeding of the HEI workshop Improving Estimates of diesel and other emissions for epidemiological studies. Baltimore, Maryland, December 4 to 6 2002.
- [4] W. Addy Majewski Diesel particulate Matter, DieselNet Technology Guide, Ecopoint Inc. 2002 www.dieselnet.com.
- [5] Emission standards. USA : Nonroad diesel engines. 2004, <http://www.dieselnet.com/standards.html>.
- [6] C. RICHARD, R. ALARY, C. DELAUNAY, A. LEPRINCE - Intoxications oxycarbonées professionnelles : résultats d'une enquête. DMT-TF 140. INRS, Paris 2005.
- [7] GAUDIN R., DUCOS P., FRANCIN J.M., MARSAN P., ROBERT A., NICOT T., LEFEVRE C., LEFEBVRE M. - Exposition au benzène chez les mécaniciens. Évaluation atmosphérique et surveillance biologique. Cahiers de notes documentaires-Hygiène et sécurité du travail, n°188, 3^{ème} trimestre 2002, pp27-36.
- [8] Health Effects Institute (HEI). Diesel exhaust: a critical analysis of emissions, exposure, and health effects. A special report of the Institute's diesel working group, Cambridge, 1995, 294 p.
- [9] LAFON D. - Toxicité des émissions des moteurs diesel et des moteurs essence. INERIS, rapport pour le ministère de l'environnement, 1993.
- [10] I.A.R.C, International Agency for Research on Cancer. Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Diesel and gasoline engine exhausts and some nitroarenes. Vol 46, IARC Lyon France, 1989.
- [11] Société Française de Santé Publique, La pollution atmosphérique d'origine automobile et la santé publique, bilan de 15 ans de recherché de santé publique, collection Santé et société, n°4, mai 1996, 251 p.
- [12] LIPSETT M., CAMPLEMAN S. - Occupational exposure to diesel exhaust and lung cancer: a meta-analysis. Am. J. Public Health, 1999, 80(7), pp. 1009-1017.
- [13] BHATIA R., LOPIPERO P. et al. - Diesel exhaust exposure and lung cancer. Epidemiology, 1998, 9(1), pp. 84-91.
- [14] VAN VLIET P., KNAPE M., DE HARTOG J., et al. - Motor vehicle exhaust and chronic respiratory symptoms in children living near freeways. Environ. Res., 1997, 74(2), pp. 122-132.
- [15] BRUNEKREEFF B., JANSSEN N.A., DE HARTOG J., et al. - Air pollution from truck traffic and lung function in children living near motorways. Epidemiology, 1997, 8(3), pp. 298-303.
- [16] BRUNEKREEFF B., JANSSEN N.A., VAN VLIET P., et al. - Traffic related air pollution and its effect on respiratory health of children living near motorways. Presented at: PM 2000: Particulate matter and health-the scientific basis for regulatory decision-making. Sponsored by the Air and Waste Management Association, January 24-28, 2000.
- [17] DIAZ-SANCHEZ D., DOTSON A.R., TAKENAKA H., et al. - Diesel exhaust particles induce local IgE production in vivo and alter the pattern of IgE messenger RNA isoforms. J. Clin. Invest., 1994, 94(4), pp. 1417-1425.
- [18] DIAZ-SANCHEZ D., TSIEN A., FLEMING J., et al. - Combined diesel exhaust particulate and ragweed allergen challenge markedly enhances human in vivo nasal ragweed-specific IgE and skews cytokine production to a T helper cell 2-type pattern. J. Immunol., 1997, 158, pp. 2406-2413.
- [19] SALVI S.S., NORDENHALL C., BLOMBERG A., et al. - Acute exposure to diesel exhaust increases IL-8 and GRO-alpha production in healthy human airways. Am. J. Respir. Crit. Care Med., 2000, 161(2), pp. 550-557.
- [20] DIAZ-SANCHEZ D., GARCIA M.P., WANG M., et al. - Nasal challenge with diesel exhaust particles can induce sensitization to a neoallergen in the human mucosa. J. Allergy Clin. Immunol., 1999, 104(6), pp. 1183-1188.
- [21] STEERENBERG P.A., ZONNENBERG J.A.J., DORMANS J.A.M.A., et al. - Diesel exhaust particles induced release of interleukin 6 and 8 by (primed) human bronchial epithelial cells (BEAS 2B) in vitro. Exp. Lung. Res., 1998, 24, pp. 85-100.
- [22] OHTOSHI T., TAKIZAWA H., OKAZAKI H., et al. - Diesel exhaust particles stimulate human airway epithelial cells to produce cytokines relevant to airway inflammation in vitro. J. Allergy Clin. Immunol., 1998, 101, pp. 778-785.
- [23] BAYRAM H., DEVALIA J.L., SAPSFORD R.J., et al. - The effect of diesel exhaust particles on cell function and release of inflammatory mediators from human bronchial epithelial cells in vitro. Am. J. Respir. Cell Mol. Biol., 1998, 18, pp. 441-448.
- [24] BAYRAM H., DEVALIA J.L., KHAIR O., et al. - Comparison of ciliary activity and inflammatory mediator release from bronchial epithelial cells of nonatopic nonasthmatic subjects and atopic asthmatic patients and the effects of diesel exhaust particles in vitro. J. Allergy Clin. Immunol., 1998, 102(5), pp. 771-782.
- [25] DEVALIA J.L., BAYRAM H., ABDELAZIZ M.M., et al. - Differences between cytokine release from bronchial epithelial cells of asthmatic patients and nonasthmatic subjects: effect of exposure to diesel exhaust particles. Int. Arch. Allergy Immunol., 1999, 118, pp. 437-439.
- [26] HASHIMOTO S., GON Y., TAKESHITA I., et al. - Diesel exhaust particles activate p38 MAP kinase to produce interleukin 8 and RANTES by human bronchial epithelial cells and N-acetylcysteine attenuates p38 MAP kinase activation [In Process Citation]. Am. J. Respir. Crit. Care Med., 2000, 161(1), pp. 280-285.
- [27] PEKKANEN J., BRUNNER E.J., ANDERSON H.R., et al. - Daily concentrations of air pollution and plasma fibrinogen in London. Occup. Environ. Med., 2000, 57, pp. 818-822.
- [28] Air ambient - Détermination d'un indice de fumée noire NF X43-005 AFNOR, Paris, novembre 1995.
- [29] WATANABE N., OONUKE Y. - Inhalation of diesel engine exhaust affects spermatogenesis in growing male rats. Environmental Health Perspectives, 1999, 107(7), pp. 539-544.
- [30] YOSHIDA S., SAGAI M., OSHIO S., UMEDA T., et al. - Exposure to diesel exhaust affects the male reproductive system of mice. International Journal of Andrology, 1999, 22, pp. 307-315.
- [31] Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France, ND 2098, INRS, Paris, 2005.
- [32] La détection des gaz et vapeurs dans l'atmosphère des locaux de travail, ED 894, INRS, Paris, 2002.
- [33] Verfahren zur Bestimmung von organischen Stoffen im Feinstaub - Anwendbar für partikelförmige Dieselmotoremissionen. (Procédé de détermination de substances organiques dans la poussière fine - applicable aux particules émises par les moteurs diesel) ZH 1/120.44. Berufsgenossenschaften anerkannte Analysenverfahren zur Feststellung der Konzentration krebserzeugender Arbeitstoffe in der Luft am Arbeitsplatz. Cologne, Carl Heymanns, 1995.

[33] National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH): Elemental Carbon (diesel exhaust) 5040. In NIOSH Manual of Analytical Methods, 4th. Ed. Cincinnati, Ohio: 1996.

[34] M. GRENIER, K. BUTLER. Méthode d'échantillonnage et d'analyse des poussières combustibles respirables. Ressources naturelles Canada Rapport de division MMSL 96-029 (TR), CANMET, Laboratoire des Sciences Minières et Minérales.

[35] Évaluation de l'exposition professionnelle. Méthodes de prélèvement et d'analyse de l'air. METROPOL. Méthode 0038. INRS, CD-ROM 4 ou site <http://www.inrs.fr> rubrique base de données.

[36] TRK-Werte, TRGS 900 (2001): Threshold Limit Values. Publications of the Federal Institute for Occupational Safety and Health (BAuA), Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven.

[37] SUVA (2001) Publication n° 1903: Occupational Exposure Limits 2001.

[38] Threshold Limit Values for Chemical Substances in the Work Environment, 2002. Notice of Intended Changes (for 2002). American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), Cincinnati, Ohio.

[39] GUILLEMIN M., CACHIER H., CHINI C., DABILL D., DAHMANN D., DIEBOLD F., FISCHER A., FRICKE H.H., GROVES J.A., HEBISCH R., HOUPILLART M., ISRAEL G., MATTENKLOTT M., MOLDENHAUER W., SANDINO J.P., SCHLUMS C., SUTTER E., TUCEK E. International Round Robin Tests on the measurement of carbon in diesel exhaust particulates. International Archives of Occupational and Environmental Health, 70, 161-172 (1997).

[40] GUILLEMIN M., PERRET V., DABILL D., GROSJEAN R., DAHMANN D., HEBISCH R. Further Round - Robin Tests to improve the comparability between laboratories of the measurement of carbon in diesel soot and in environmental samples. International Archives of Occupational and Environmental Health, 74, 139-147 (2001).

[41] HEBISCH R., DABILL D., DAHMANN D., DIEBOLD F., GEIREGAT F., GROSJEAN R., MATTENKLOTT M., PERRET V., GUILLEMIN M. Sampling and analysis of carbon in diesel exhaust particulates - an international comparison. International Archives of Occupational and Environmental Health, 76, 137-142 (2003).

[42] Air des lieux de travail - Dosage des matières particulaires émises par les moteurs diesel - Exigences générales NF EN 14530, 2004.

[43] Water in diesel combustion. DieselNet Technical Guide. Ecopoint Inc. 2002 www.dieselNet.com

[44] Exhaust emission controls available to reduce emissions from nonroad diesel engines. Manufacturer of Emissions Controls Association. Washington, 2003, 18p, www.meca.org

[45] A. MAYER, VERT : Curtailing emissions of diesel engines in tunnel sites. DieselNet Technical Report. April 1998 14 pp www.dieselNet.com

[46] LAUWERYS R. - Gaz et vapeurs irritants et asphyxiants. Toxicologie industrielle et intoxications professionnelles. 3^e éd. Paris, Masson, 1990 pp. 382-422.

[47] G. H. SCHNAKENBERG JR, A. D. Bugarski Review of technology available to the underground mining industry for control of diesel emissions. IC 9462, NIOSH, Cincinnati, 2002, 22pp www.cdc.gov/niosh

[48] J.P.A. NEEFT, M. MAKKEE, J.A. MOULIJN, Diesel particulate emission control, Fuel Processing Technology 47 (1996) pp 1-69.

[49] Wall-Flow Monoliths, DieselNet Technology Guide Ecopoint Inc. 2003 www.dieselNet.com

[50] Ceramic fibbers and cartridges, DieselNet Technology Guide Ecopoint Inc. 2001 www.dieselNet.com

[51] A. MAYER, U. MATTER, J. CZERWINSKI, N. HEEB, Effectiveness of particle traps on construction site engines : VERT final measurements DieselNet Technical Report. March 1999 16 p. www.dieselNet.com

[52] Les filtres à particules pour poids lourds : une solution performante. Synthèse des mesures d'émissions de polluants et de consommations de carburant. Retour d'expérience et préconisations. Données et Références. ADEME - Valbonne Nov. 2002.

[53] M. G. COSTANTINI and al. Evaluation of human health risk from cerium added fuel. Health Effects Institute. Communication 9, Boston, August 2001, 57p. www.healtheffects.org

[54] J.P.A NEEFT, M. MAKKEE, J.A. MOULIJN Diesel particulate emission control. Fuel Processing Technology 47 (1996) p.1-69.

[55] P. KUKLA Ultrafine PM control without performance penalties. Presented august 25th , DEER 2003, Rhode Island USA.

[56] Guide pratique de ventilation 0 - Principes généraux de ventilation, ED 695, INRS, Paris, 1989.

[57] Travaux de creusement en souterrain de galeries, de puits ou de grandes excavations. Mise en oeuvre de dispositifs de ventilation mécanique. R 352, INRS, Paris, 1991.

[58] Recommandations relatives à la Ventilation des ouvrages souterrains en cours de construction. Tunnels et ouvrages souterrains n°176 mars/avril 2003.

[59] Travaux souterrains autres que galeries linéaires. Recommandations CRAMIF n°17, cdu : 624.19, avril 2000.