

Calcul des émissions de polluants des véhicules automobiles en tunnel





Calcul des émissions de polluants des véhicules automobiles en tunnel

novembre 2012

AVERTISSEMENT

Les documents d'information ont pour but de fournir une information sur une technique ou un problème nouveau ou insuffisamment traité par ailleurs. Le lecteur pourra y trouver des repères susceptibles de l'aider dans son activité. Le contenu et les éventuelles conclusions présentés ne doivent pas être considérés comme des recommandations du CETU. Bien que le maximum soit fait pour s'assurer de la fiabilité des sources utilisées, la responsabilité du CETU ou des auteurs du document ne saurait être engagée.

Centre d'Etudes des Tunnels

25, avenue François Mitterrand

Case n°1

69674 BRON - FRANCE

Tél. 33 (0)4 72 14 34 00

Fax. 33 (0)4 72 14 34 30

cetu@developpement-durable.gouv.fr

www.cetu.developpement-durable.gouv.fr

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	5
1 Caractéristiques du parc automobile français	6
1.1. Comment connaître les caractéristiques du parc automobile français ?	6
1.2. La réglementation des émissions	6
1.3. Principales caractéristiques du parc automobile français	7
2 Méthode de calcul des émissions à l'échappement des véhicules légers	9
2.1 Principe de calcul des émissions à l'échappement des VL	9
2.2 Intégration des effets de la pente	9
2.3 Émissions unitaires des véhicules légers euro 4	10
2.4 Facteur de passage de la norme euro 4 aux autres normes	11
2.5 Prise en compte des effets de l'altitude	13
3 Méthode de calcul des émissions à l'échappement des poids lourds	14
3.1 Principe de calcul des émissions à l'échappement des PL	14
3.2 Intégration des effets de la pente	14
3.3 Intégration des effets du tonnage	14
3.4 Émissions unitaires des PL de type euro 4 et de PTAC supérieur à 34 tonnes	15
3.5 Facteur de passage de la norme euro 4 aux autres normes	16
3.6 Prise en compte des effets de l'altitude	17
4 Cas particulier des émissions de particules hors échappement	18
4.1 Taille des particules	18
4.2 Facteurs d'émission en masse des particules hors échappement	18
4.3 Lien entre concentration en masse des particules et opacité	19
4.4 Ce qu'il faut retenir concernant les émissions hors échappement des particules	19
5 Synthèse du principe de calcul des émissions en tunnel	20
5.1 Émissions des VL	20
5.2 Émissions des PL	21
Conclusion	22
Bibliographie	22
Annexe : cas des émissions à 0 km/h	23

INTRODUCTION

Ce document actualise et remplace le document CETU d'avril 2002 : "Calcul des émissions de polluants des véhicules automobiles en tunnel" [1]. Cette évolution est rendue nécessaire par le renouvellement du parc automobile et les effets de la réglementation européenne sur les émissions des nouveaux véhicules. Les véhicules obéissant aux normes euro 5, non intégrés dans le précédent document, commencent en effet à pénétrer le marché français tandis que les niveaux réglementaires d'émission de la norme euro 6, qui concerneront les véhicules neufs dès 2015, sont déjà connus.

D'une manière générale, les données présentées dans ce document ont été établies à partir d'une synthèse des informations les plus récentes et jugées les plus fiables et représentatives :

- les données d'émissions proposées sont déduites d'études effectuées dans le cadre de différents programmes européens auxquels participent l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, la France, la Grèce, le Royaume-Uni, la Suisse, etc. Il s'agit essentiellement de résultats issus des travaux liés à Copert 4 [2], Artemis [3] et ceux du TÜG (Autriche) communiqués dans le cadre du Comité de l'exploitation des tunnels routiers de l'AIPCR [4] ;
- les données d'évolution du parc automobile français sont issues des travaux de l'INRETS¹ ([5] et [6]).

La démarche de calcul proposée reste semblable à celle de l'édition d'avril 2002 [1]. Les polluants concernés demeurent les trois polluants les plus représentatifs de la pollution d'origine automobile : le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NOx) et les fumées ou particules (particulate matter, PM), même si l'un d'entre eux, le CO, a un rôle de moins en moins déterminant.

Il subsiste dans cette démarche des incertitudes liées à l'utilisation de plusieurs hypothèses simplificatrices. En particulier, l'influence exacte des étapes futures de la réglementation sur les émissions ne peut pas être prise en compte. Par ailleurs, les véhicules, tels qu'ils se présentent sur la route, ont un certain âge à l'intérieur de l'étape de réglementation à laquelle ils appartiennent, et des conditions d'entretien et d'utilisation variables qui influent sur leurs émissions.

Ces incertitudes ne sont pas propres aux calculs des émissions en tunnel. Elles sont valables pour tout calcul d'émissions produites par le trafic routier et s'ajoutent à celles liées à la connaissance du trafic (composition et vitesse notamment). Les éléments proposés suffisent néanmoins à répondre à l'objectif de fournir les données nécessaires à la quantification des émissions pour le dimensionnement de la ventilation des tunnels routiers dans l'état actuel des connaissances.

Le plan du document est le suivant :

- présentation du parc automobile français VL et PL et de son évolution en fonction de la réglementation européenne sur les émissions ;
- méthode de calcul des émissions des VL ;
- méthode de calcul des émissions des PL ;
- cas particulier des émissions de particules hors échappement ;
- synthèse du principe de calcul des émissions en tunnel ;
- annexe relative aux émissions à 0 km/h.

¹ l'INRETS a été intégré dans l'IFSTTAR, Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux

CARACTÉRISTIQUES DU PARC AUTOMOBILE FRANÇAIS

1.1 COMMENT CONNAÎTRE LES CARACTÉRISTIQUES DU PARC AUTOMOBILE FRANÇAIS ?

La connaissance du parc automobile permet de classer les différents véhicules selon :

- leur type : poids lourds (PL), véhicules légers (VL) au sein desquels sont distingués les véhicules utilitaires (VUL) et les véhicules particuliers (VP), deux-roues, bus, etc.
- leur cylindrée ;
- leur carburant : essence, diesel, électrique, gaz naturel, etc.
- leur âge : par ce paramètre, peut être connue la norme anti-pollution à laquelle ils obéissent (Cf. chapitre 1.2).

Ces caractéristiques sont autant d'éléments qui influencent les émissions à l'échappement des véhicules et qui justifient de connaître la structure du parc automobile. En France, cette connaissance du parc automobile repose essentiellement sur des travaux de l'INRETS qui visent, à partir des données du parc statique, à déterminer celles du parc roulant.

Le parc statique désigne l'ensemble des véhicules qui existent. Il peut être estimé à partir des immatriculations de véhicules neufs recensés au fichier central automobile, couplées à des lois de survie permettant d'apprécier le rythme de mise à la casse d'une classe d'âge de véhicules en fonction du temps.

Le passage du parc statique au parc roulant s'effectue pour sa part par l'application de fonctions d'utilisation des véhicules qui permettent d'estimer le kilométrage annuel parcouru par une catégorie en fonction de son âge. Ces fonctions ont été établies sur la base d'enquêtes statistiques.

L'essentiel des travaux de l'INRETS s'appuie sur des méthodes développées par B. Bourdeau dans le cadre d'une thèse sur l'évolution du parc automobile français ([5]). Ils font régulièrement l'objet d'améliorations et de mises à jour ([6]).

1.2 LA RÉGLEMENTATION DES ÉMISSIONS

La limitation des émissions à l'échappement des véhicules repose sur trois principaux leviers :

- des actions sur les carburants, pour limiter leur teneur en polluants ;
- des actions sur les véhicules ;
- des actions sur les conditions de circulation des véhicules (régulation de vitesse par exemple).

Concernant les carburants, on peut noter que :

- la teneur en masse du soufre dans le gazole est passée de 0,05 % en 1997 à 0,001 % en 2009, soit 10 grammes par tonne de carburant ;
- la teneur en volume de benzène dans l'essence est passée de 5 à 1 % en 2000 ;
- l'essence plombée est interdite depuis le 1er janvier 2000.

Normes	NOx (g/kWh)	CO (g/kWh)	HC (g/kWh)	particules (g/kWh)
euro 1 (1993)	9	4,9	1,23	0,36
euro 2 (1996)	7	4	1,1	0,15
euro 3 (2001)	5	2,1	0,66	0,13
euro 4 (2006)	3,5	1,5	0,46	0,02
euro 5 (2009)	2	1,5	0,46	0,02
euro 6 (2014)	0,4	1,5	0,13	0,01

Tableau 1 : historique de la réglementation des émissions à l'échappement des poids lourds

Valeurs limites d'émissions en g/km		CO	HC (hydrocarbures)	HC non méthaniques	HC+NOx	NOx	Particules
euro 1 1992	essence	2,72	-	-	0,97	-	-
	diesel	2,72	-	-	0,97	-	0,140
euro 2 1996	essence	2,2	-	-	0,5	-	-
	diesel	1	-	-	0,7	-	0,08
euro 3 2000	essence	2,3	0,2	-	-	0,15	-
	diesel	0,64	-	-	0,56	0,5	0,05
euro 4 2005	essence	1	0,1	-	-	0,08	-
	diesel	0,5	-	-	0,3	0,25	0,025
euro** 5 2010	essence	1	0,1	0,068	-	0,06	0,005*
	diesel	0,5	-	-	0,23	0,18	0,005
euro 6 2015	essence	1	0,1	0,068	-	0,06	0,005*
	diesel	0,5	-	-	0,17	0,08	0,005

* pour moteur à injection directe d'essence

** janvier 2011 pour tous les véhicules (fin 2009 pour les nouveaux modèles)

Tableau 2 : historique de la réglementation des émissions à l'échappement des véhicules particuliers

Concernant la réglementation s'appliquant à l'échappement des véhicules, les premières normes ont été mises en place dès le début des années 1970. Elles se sont nettement durcies depuis 1992 et depuis cette date s'appellent normes "euro". Ces normes s'appliquent aux véhicules neufs et distinguent les poids lourds (PL), les véhicules particuliers (VP), les véhicules utilitaires légers (VUL) et les deux-roues motorisés.

Les différentes normes euro ont conduit les constructeurs automobile à rechercher des procédés permettant de réduire les émissions à l'échappement.

La norme euro 1 a par exemple favorisé l'apparition des pots catalytiques sur les véhicules particuliers à essence à partir de 1992 tandis que les filtres à particules sur les véhicules diesel se sont généralisés avec la norme euro 5.

Ces normes sont données dans le *tableau 1* pour les PL et dans le *tableau 2* pour les VP. Elles correspondent à des valeurs limites d'émissions imposées sur un cycle de conduite normalisé traduisant des conditions de circulation variées.

1.3

PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUE DU PARC AUTOMOBILE FRANÇAIS

En préalable, il est utile de préciser que les études d'évolution du parc automobile n'intègrent pas, pour l'heure, de développement fort de technologies alternatives aux véhicules essence ou diesel. Quant à l'effet sur les émissions de l'augmentation de la part des biocarburants dans les carburants classiques, il n'est pas encore bien connu.

Dans la mesure où l'objectif final est un calcul d'émissions, ce calcul sera tout au plus majorant si jamais une rupture technologique franche venait à se produire, sachant qu'a priori cette dernière s'orienterait vers des véhicules moins polluants.

Par ailleurs, il n'est pas fait état dans la suite du document des véhicules deux-roues motorisés et des bus dont la présence dans le parc roulant reste limitée.

1.3.1 Les véhicules particuliers

Les données de l'INRETS [6] permettent de caractériser les kilomètres parcourus annuellement par les véhicules particuliers (Cf. tableaux 3 et 4).

Il en ressort qu'au fil des ans, le renouvellement du parc conduit à la disparition de la circulation des véhicules les plus polluants au profit des véhicules obéissant aux normes les plus récentes :

- en 2015, plus de 49 % des kilomètres parcourus par les VL diesel et plus de 35 % des kilomètres parcourus par les VL essence le seront par des VL qui obéissent à la norme euro 5 ;
- en 2020, les normes euro 5 et 6 représenteront en cumul plus de 82 % des kilomètres parcourus par les VL diesel et plus de 70 % des kilomètres parcourus par les VL essence.

	2000	2005	2010	2015	2020	2025
Pré-euro	25,2 %	6,2 %	1,2 %	0,2 %	0%	0%
euro 1	34,6 %	13,4 %	3,5 %	0,7 %	0,1 %	0%
euro 2	40,2 %	24,8 %	9,3 %	2,4 %	0,5 %	0,05 %
euro 3	0%	55,6 %	34,0 %	12,9 %	3,5 %	0,75 %
euro 4	0%	0%	52,0 %	34,1 %	13,7 %	3,9 %
euro 5	0%	0%	0,00%	49,7 %	34,5 %	14,4 %
euro 6	0%	0%	0,00%	0,00%	47,7 %	80,9 %

Tableau 3 : répartition des kilomètres parcourus par les VL diesel (hors VUL) par norme d'émission selon l'année (d'après l'exploitation des données de parc INRETS)

Norme	2000	2005	2010	2015	2020	2025
Pré-euro	33,2 %	10,6 %	2,7 %	0,3 %	0%	0%
euro 1	28,8 %	16,3 %	6,4 %	1,9 %	0,2 %	0%
euro 2	38,0 %	33,3 %	18,2 %	6,9 %	1,9 %	0,1 %
euro 3	0%	39,8 %	36,4 %	20,0 %	7,5 %	1,9 %
euro 4	0%	0%	36,3 %	35,4 %	20,0 %	7,6 %
euro 5	0%	0%	0%	35,5 %	56,9 %	65,0 %
euro 6	0%	0%	0%	0,00%	13,5 %	25,4 %

Tableau 4² : répartition des kilomètres parcourus par les VL essence (hors VUL) par norme d'émission selon l'année (d'après l'exploitation des données de parc INRETS)

Il apparaît également que le renouvellement du parc se fait au profit des véhicules diesel. Ceci est en effet visible dans la structure du parc roulant des véhicules particuliers qui se caractérise par une part croissante des kilomètres parcourus en véhicule diesel : 52 % en 2000 contre 78 % en 2010 et des prévisions de l'ordre de 90 % pour 2020.

	2000	2005	2010	2015	2020	2025
Part des km effectués en diesel	52 %	65 %	78 %	86 %	92 %	95 %

Tableau 5 : part des kilomètres parcourus par les VL diesel au sein de la catégorie VL selon l'année (d'après l'exploitation des données de parc INRETS). Les VUL ne sont pas inclus aux VL dans ce calcul.

1.3.2 Les poids lourds

Les données de l'INRETS [6] permettent de caractériser les kilomètres parcourus annuellement par les poids lourds en fonction de leur poids total autorisé en charge, PTAC (Cf. tableau 6). Il en ressort qu'au fil des ans, la part des poids lourds à fort tonnage, c'est à dire d'un PTAC supérieur à 34 tonnes, tend à augmenter.

Le renouvellement des poids lourds conduit par ailleurs progressivement à la disparition de la circulation des véhicules les plus polluants au profit des véhicules obéissant aux normes les plus récentes (Cf. tableau 7) :

- en 2015, plus de 58 % des kilomètres parcourus par les PL le seront par des PL obéissant à la norme euro 5 ;
- en 2020, 59 % des kilomètres parcourus par les PL le seront par des PL obéissant à la norme euro 6.

Les poids lourds de la catégorie euro 5 se répartissent en fait selon deux technologies distinctes selon les choix faits par les constructeurs :

- la technologie dite SCR (Selective Catalytic Reduction) majoritairement utilisée en Europe (75% du parc roulant) repose sur un catalyseur ainsi qu'un additif à base d'urée ;
- la technologie dite EGR (Exhaust Gas Recirculation), refroidit les gaz produits et les utilise pour abaisser la température de combustion et ainsi limiter la production d'oxydes d'azote.

	2000	2005	2010	2015	2020	2025
<7,5t	3,6 %	2,3 %	1,8 %	1,6 %	1,4 %	1,2 %
7,5-12t	10,7 %	9,2 %	8,2 %	7,4 %	6,4 %	5,3 %
12-14t	3,2 %	2,0 %	1,6 %	1,3 %	1,1 %	1,0 %
14-20t	18,8 %	18,1 %	16,9 %	15,2 %	13,1 %	11,1 %
20-28t	6,5 %	6,4 %	6,0 %	5,3 %	4,6 %	3,8 %
28-34t	1,0 %	0,9 %	0,8 %	0,7 %	0,7 %	0,5 %
>34t	56,2 %	61,1 %	64,7 %	68,5 %	72,7 %	77,1 %

Tableau 6 : répartition des kilomètres parcourus par les PL en fonction de leur tonnage et selon l'année (d'après l'exploitation des données de parc INRETS)

Norme	2000	2005	2010	2015	2020	2025
Pré-euro	25,0 %	4,6 %	0,2 %	0%	0%	0%
euro 1	21,8 %	8,1 %	1,5 %	0,05 %	0%	0%
euro 2	53,2 %	35,6 %	13,2 %	2,0 %	0,05 %	0%
euro 3	0%	51,7 %	35,6 %	13,4 %	1,95 %	0,05%
euro 4	0%	0 %	49,5 %	25,9 %	9,2 %	0,95%
euro 5	0%	0 %	0 %	58,65 %	29,8 %	9,9 %
euro 6	0%	0 %	0 %	0 %	59,0 %	89,1 %

Tableau 7 : répartition des kilomètres parcourus par les PL par norme d'émission selon l'année (d'après l'exploitation des données de parc INRETS)

MÉTHODE DE CALCUL DES ÉMISSIONS À L'ÉCHAPPEMENT DES VÉHICULES LÉGERS

2.1

PRINCIPE DE CALCUL DES ÉMISSIONS À L'ÉCHAPPEMENT DES VL

Le principe de calcul de l'émission unitaire d'un véhicule moyen essence ou diesel pour une année donnée peut être exprimé comme suit :

$$(1) \quad e_{VL} = \sum_{i=0}^6 \alpha_i \cdot e_i$$

avec :

e_{VL} émission unitaire d'un VL essence ou diesel moyen pour une année donnée et des conditions données (vitesse et pente de la route) ;

α_i pourcentage de VL essence ou diesel au sein du parc roulant obéissant à la norme euro i pour l'année considérée. La valeur pour $i=0$ désigne les véhicules obéissant à la norme antérieure à la norme euro 1 (pré-euro) ;

e_i émission unitaire d'un VL essence ou diesel moyen en termes de cylindrée obéissant à la norme euro i pour des conditions données (vitesse et pente de la route).

Pour la réalisation de ce calcul, il est donc nécessaire de connaître :

- au sein des parcs roulants essence et diesel, pour chaque année, la répartition des véhicules selon la norme à laquelle ils obéissent : ces informations figurent dans les *tableaux 3 et 4* ;
- les émissions unitaires d'un VL essence et d'un VL diesel moyen en termes de cylindrée pour chacune des normes euro.

Pour simplifier ce dernier point et limiter les paramètres à utiliser, **la méthode ici décrite prévoit de s'appuyer sur les émissions unitaires des véhicules de type euro 4 et d'accéder :**

- aux normes euro 5 et 6 par un facteur de passage reposant sur l'évolution prévue de ces normes par rapport à la norme euro 4 ; les normes euro 5 et 6 n'ayant en effet pas fait l'objet de simulation sur banc à rouleaux, si bien qu'il n'existe pas de facteurs d'émissions consolidés pour ces dernières.
- aux normes euro 3 et antérieures par un facteur de passage issu de la comparaison des émissions entre les véhicules obéissant à ces normes et ceux obéissant à la norme euro 4. Cette comparaison est réalisée à l'aide de la méthodologie Copert 4 (*Cf. chapitre 2.4*).

En application de la formule (1), le principe de calcul de l'émission unitaire d'un véhicule moyen essence ou diesel pour une année donnée devient :

$$(2) \quad e_{VL} = e_4 \sum_{i=0}^6 \alpha_i \cdot f_i$$

avec :

e_4 émission unitaire d'un VL essence ou diesel moyen en termes de cylindrée obéissant à la norme euro 4 (*Cf. chapitre 2.3*) pour des conditions données (vitesse et pente de la route) ;

f_i facteur de passage de la norme euro 4 à la norme euro i (*Cf. chapitre 2.4*). Ce facteur est fonction de la vitesse considérée.

2.2

INTÉGRATION DES EFFETS DE LA PENTE

Dans la méthodologie Copert 4, l'effet de la pente est négligé ou du moins, les flux de circulation sont considérés à double sens avec l'hypothèse que les sur-émissions dans le sens montant sur une route sont compensées par les sous-émissions du sens descendant.

Cette hypothèse n'est pas applicable en tunnel. En effet, il est utile pour un tunnel bitube de distinguer les émissions entre le tube montant et le tube descendant pour ajuster au mieux les besoins en ventilation sanitaire propres à chaque tube.

Pour l'intégration des effets de la pente, la méthode ici décrite prévoit d'utiliser la méthodologie donnée par l'AIPCR [4]. Cette dernière s'appuie sur des facteurs d'émission des VL qui varient en fonction de la pente. Dans les données présentées au *chapitre 2.3*, l'effet de la pente observé sur les facteurs AIPCR est appliqué aux résultats obtenus pour une pente nulle avec Copert 4.

2.3 ÉMISSIONS UNITAIRES DES VÉHICULES LÉGERS EURO 4

Pour une même norme euro, la méthodologie Copert 4 propose des facteurs d'émission pour une décomposition fine du parc roulant de véhicules légers, et notamment³ :

- 3 classes de véhicules essence : cylindrée inférieure à 1,4 l, cylindrée comprise entre 1,4 l et 2 l et cylindrée supérieure à 2 l ;
- 2 classes de véhicules diesel : cylindrée inférieure à 2 l et cylindrée supérieure à 2 l ;
- 2 classes de véhicules utilitaires légers (VUL) : VUL diesel et VUL essence.

Pour simplifier la méthodologie Copert 4, sont proposées ici seulement deux séries de facteurs d'émission pour la norme euro 4 :

- les émissions d'un véhicule léger essence en fonction de sa vitesse et de la pente de la route ;
- les émissions d'un véhicule léger diesel en fonction de sa vitesse et de la pente de la route.

Ces émissions sont calculées en exploitant la méthodologie Copert 4 à l'aide d'une feuille de calcul développée par le CETE Normandie-Centre [7]. Les émissions calculées sont en fait, celles :

- d'un véhicule essence fictif intégrant la représentation au sein du parc roulant des véhicules de cylindrée inférieure à 1,4 l, de cylindrée comprise entre 1,4 l et 2 l et de cylindrée supérieure à 2 l. La décomposition appliquée entre ces trois catégories est celle observée sur les VL essence euro 4 en 2010, année où la norme euro 4 est la plus représentée. On considère par ailleurs qu'il n'y a aucun VUL essence mais qu'ils sont tous diesel. En effet, d'après les données de l'INRETS ([5] et [6]), en 2010, près de 99% des kilomètres parcourus par les VUL le sont par des VUL diesel ;
- d'un véhicule diesel fictif intégrant la représentation au sein du parc roulant des véhicules de cylindrée inférieure à 2 l et de cylindrée supérieure à 2 l. La décomposition proposée est celle observée sur les VL diesel euro 4 en 2010, année où la norme euro 4 est la plus représentée. On considère qui plus est que 23 % des kilomètres parcourus par les véhicules légers le sont par des VUL, chiffre communément utilisé dans les études de pollution.

Les données d'émissions correspondantes sont synthétisées dans les *tableaux 8 à 12*, étant entendu que les émissions de fumées des véhicules à essence sont considérées comme négligeables. L'effet de la pente est introduit comme indiqué au *chapitre 2.2*. Pour la conversion des résultats de la méthode Copert exprimés en g/km, ont été utilisées les hypothèses suivantes :

- un facteur de conversion des particules en fumées à l'échappement tel que $1\text{g/h} = 4,7\text{ m}^2/\text{h}$ de fumées (Cf. *chapitre 4.3*). Ce facteur est celui proposé par l'AIPCR ([4]) ;
- des masses volumiques de (28/24,5) kg/m^3 pour le CO , (30/24,5) kg/m^3 pour le NO et (46/24,5) kg/m^3 pour le NO_2 : ces masses volumiques sont celles à la température de 25 °C et à la pression d'1 atm, elles sont obtenues par le quotient des masses molaires des gaz considérés par le volume molaire d'un gaz aux conditions de température et de pression indiquées précédemment (24,5 l) ;
- un ratio NO/NO_2 de 10 en volume à l'échappement, ou encore $\text{NOx}/\text{NO}_2 = 11$ ([8]).

Avec ces hypothèses, 1 g de NOx correspond à environ 0,78 l. Le ratio NO/NO_2 proposé peut être jugé élevé au regard de la tendance récente observée sur les émissions à l'échappement des véhicules. En effet, les nouvelles technologies utilisées pour les moteurs (catalyseur d'oxydation rendu obligatoire pour les VL diesel depuis la norme euro 2, et aujourd'hui renforcement de la catalyse d'oxydation pour aider à la régénération de certaines technologies de filtres à particules) tendent à augmenter les émissions de NO_2 , rendant le ratio NO/NO_2 plus faible. Toutefois, avec un ratio NO/NO_2 très sous-estimé par rapport à la réalité de 1 en volume, 1 g de NOx correspondrait encore à environ 0,65 l. L'effet du ratio NO/NO_2 est finalement peu perceptible. Pour le calcul des émissions de NOx , le choix est fait de retenir un ratio volumique de 10, ce qui va dans le sens d'une majoration des émissions. Ceci ne préjuge pas de la valeur du rapport NO/NO_2 à retenir pour juger de l'acceptabilité des conditions atmosphériques dans un tunnel et à son voisinage.

³ Copert 4 propose aussi des facteurs d'émissions pour les technologies GPL et hybrides dont la présence au sein du parc reste marginale.

	- 6%	- 4%	- 2%	0%	2%	4%	6%
10 km/h	1,39	1,39	1,39	1,39	1,61	1,83	2,16
20 km/h	3,02	3,02	3,02	3,02	3,63	4,23	5,14
30 km/h	4,23	4,23	4,55	4,90	5,95	6,35	11,60
40 km/h	3,97	4,24	5,42	7,13	8,93	13,83	22,17
50 km/h	5,25	6,25	7,50	9,82	13,62	21,34	38,83
60 km/h	8,86	9,77	10,80	13,18	20,34	30,55	75,47
70 km/h	11,16	12,43	14,53	17,68	27,20	43,52	106,76
80 km/h	10,79	14,07	18,73	23,90	34,29	63,01	124,24
90 km/h	12,41	18,00	25,23	32,82	46,48	96,62	204,03
100 km/h	22,89	28,79	36,47	46,55	73,41	162,13	360,82
110 km/h	48,05	50,00	54,79	69,93	129,32	282,63	928,01

Tableau 8 : émissions de monoxyde de carbone en l/h d'un VL essence obéissant à la norme euro 4, en fonction de la vitesse et de la pente (d'après Copert 4 et des données de parc INRETS)

	- 6%	- 4%	- 2%	- 0%	2%	4%	6%
10 km/h	0,64	0,64	0,64	0,76	0,82	0,88	0,92
20 km/h	0,99	0,99	1,01	1,28	1,42	2,00	2,77
30 km/h	1,14	1,14	1,26	1,59	2,36	3,43	4,06
40 km/h	1,14	1,14	1,31	1,75	3,10	4,02	4,73
50 km/h	0,97	0,97	1,14	1,78	3,10	3,87	4,54
60 km/h	0,74	0,74	0,92	1,73	2,68	3,34	4,01
70 km/h	0,54	0,54	0,73	1,65	2,24	2,76	3,40
80 km/h	0,45	0,45	0,68	1,56	2,06	2,62	3,20
90 km/h	0,37	0,37	0,84	1,49	1,96	2,50	3,03
100 km/h	0,33	0,38	1,01	1,48	1,98	2,48	2,97
110 km/h	0,30	0,42	1,11	1,55	2,07	2,55	3,01

Tableau 9 : émissions d'oxydes d'azote en l/h d'un VL essence obéissant à la norme euro 4, en fonction de la vitesse et de la pente (d'après Copert 4 et des données de parc INRETS)

	- 6%	- 4%	- 2%	0%	2%	4%	6%
10 km/h	1,13	1,13	1,13	2,96	4,91	6,93	9,30
20 km/h	0,88	0,88	1,11	4,14	7,01	2,70	1,45
30 km/h	0,65	0,65	1,23	4,42	1,88	1,07	1,08
40 km/h	0,51	0,35	1,07	4,32	0,84	0,85	0,86
50 km/h	0,73	0,73	1,31	4,19	1,21	1,23	1,23
60 km/h	1,48	1,48	3,49	4,29	2,47	2,50	2,73
70 km/h	2,93	2,93	10,84	4,82	4,92	4,98	6,64
80 km/h	3,60	3,60	21,77	5,95	6,07	7,19	9,79
90 km/h	4,72	4,72	34,95	7,86	8,02	11,32	15,14
100 km/h	6,38	6,38	12,05	10,71	12,76	18,29	24,11
110 km/h	8,68	12,44	14,37	14,66	21,02	29,51	38,19

Tableau 10 : émissions de monoxyde de carbone en l/h d'un VL diesel obéissant à la norme euro 4, en fonction de la vitesse et de la pente (d'après Copert 4 et les données de parc INRETS)

	- 6%	- 4%	- 2%	0%	2%	4%	6%
10 km/h	4,43	4,43	4,43	7,64	10,25	12,51	14,85
20 km/h	5,29	5,29	5,95	12,80	17,37	21,59	29,24
30 km/h	5,38	5,38	7,68	16,17	22,28	31,68	44,20
40 km/h	5,42	5,42	8,21	18,47	28,23	42,73	62,15
50 km/h	5,58	5,58	7,72	20,41	34,67	56,54	81,58
60 km/h	5,49	5,49	8,91	22,69	43,60	71,92	101,44
70 km/h	5,00	5,00	10,53	26,03	51,60	82,62	111,99
80 km/h	4,70	4,70	13,19	31,13	61,67	94,06	125,30
90 km/h	4,47	4,47	15,73	38,70	73,02	106,06	139,48
100 km/h	4,30	4,30	19,92	49,46	85,64	120,55	156,24
110 km/h	4,27	5,19	27,27	64,10	102,17	140,31	179,23

Tableau 11 : émissions d'oxydes d'azote en l/h d'un VL diesel obéissant à la norme euro 4, en fonction de la vitesse et de la pente (d'après Copert 4 et les données de parc INRETS)

	- 6%	- 4%	- 2%	0%	2%	4%	6%
10 km/h	1,11	1,11	1,11	2,01	2,76	3,41	4,09
20 km/h	1,32	1,32	1,53	3,44	4,71	5,90	7,68
30 km/h	1,37	1,37	2,03	4,46	6,23	8,43	11,21
40 km/h	1,40	1,13	2,22	5,26	7,79	11,10	15,27
50 km/h	1,49	1,49	2,16	6,00	9,60	14,60	19,88
60 km/h	1,51	1,51	2,59	6,88	12,05	18,39	24,20
70 km/h	1,45	1,45	3,28	8,06	14,44	21,51	26,15
80 km/h	1,42	1,42	4,31	9,73	17,30	23,86	28,50
90 km/h	1,41	1,41	5,44	12,06	20,58	26,20	31,01
100 km/h	1,40	1,40	7,03	15,23	23,38	28,88	33,88
110 km/h	1,42	1,79	9,41	19,41	26,66	32,40	37,68

Tableau 12 : émissions de fumées en m²/h d'un VL diesel obéissant à la norme euro 4, en fonction de la vitesse et de la pente (d'après Copert 4 et les données de parc INRETS)

2.4 FACTEUR DE PASSAGE DE LA NORME EURO 4 AUX AUTRES NORMES

Comme indiqué au chapitre 2.1, la méthode ici décrite s'appuie sur les émissions liées à la norme euro 4 et accède :

- aux normes euro 5 et 6 par un facteur de passage reposant sur l'évolution prévue de ces normes par rapport à la norme euro 4 ;

- aux normes euro 3 et antérieures par un facteur de passage issu de la comparaison des émissions d'une norme à l'autre. Cette comparaison est réalisée à l'aide de la méthodologie Copert 4.

Les facteurs de passage proposés sont indiqués dans le *tableau 13*. Ils correspondent aux ratios Euro n / Euro 4 obtenus dans la méthodologie Copert 4. Ils sont pour certains fonction de la vitesse considérée.

Dans le cas des émissions de particules des véhicules diesel, l'utilisation du filtre à particules constitue un saut technologique qui permet d'aller au-delà de la réglementation. Cela conduit à proposer un facteur de réduction plus important que celui prévu par la réglementation.

Le facteur proposé correspond à celui donné par la méthodologie Copert 4 suite à plusieurs expérimentations sur des véhicules équipés de filtres à particules. La méthodologie Copert 4 propose également des facteurs d'émissions de particules pour les véhicules essence mais ces dernières sont négligeables par rapport aux émissions hors échappement (*Cf. Chapitre 4*).

	euro 6	euro 5	euro 4	euro 3	euro 2	euro 1	Pré euro
CO VL Diesel	1	1	1	1,15	2,34	$-2,9 \cdot 10^{-4}v^2 + 3,3 \cdot 10^{-2}v + 2$	$-1,24 \cdot 10^{-3}v^2 + 0,15v + 1,92$
CO VL Essence	1	1	1	$10,2v^{-0,34}$	$182v^{-0,91}$	$593v^{-0,97}$	$6820v^{-1,45}$
NOx VL Diesel	0,32	0,72	1	1,34	1,34	$-2,9 \cdot 10^{-6}v^3 + 5,2 \cdot 10^{-4}v^2 - 0,025v + 1,6$	$8,6 \cdot 10^{-5}v^2 - 0,0145v + 1,84$
NOx VL Essence	0,75	0,75	1	$1,93 \cdot 10^{-2}v + 0,74$	$2 \cdot 10^{-3}v^2 - 9,8 \cdot 10^{-2}v + 6,5$	$8,05 \cdot 10^{-3}v^2 - 0,526v + 16,245$	$1,56 \cdot 10^{-2}v^2 - 0,21v + 16,4$
PM VL Diesel	0,05	0,05	1	$1,2 \cdot 10^{-4}v^2 - 8,5 \cdot 10^{-3}v + 1,2$	$1,5 \cdot 10^{-4}v^2 - 1,5 \cdot 10^{-2}v + 1,95$	$2,9 \cdot 10^{-4}v^2 - 2,1 \cdot 10^{-2}v + 2,25$	$-1,6 \cdot 10^{-2}v + 7,2$

Tableau 13 : facteurs de passage des émissions de la norme euro 4 des VL diesel et essence vers les autres normes

2.5 PRISE EN COMPTE DES EFFETS DE L'ALTITUDE

En conformité avec la méthode AIPCR 2011 [11], l'altitude est considérée comme n'ayant pas d'influence notable, en-dessous de 2000 mètres, sur les émissions d'oxydes d'azote et de particules des véhicules diesel et essence ainsi que sur les émissions de monoxyde de carbone des véhicules diesel.

En revanche, pour les émissions de monoxyde de carbone des véhicules essence, l'AIPCR propose une multiplication par 2 à 2000 mètres d'altitude. Nous supposons que ce facteur dû à l'altitude vaut 1 au niveau de la mer et qu'il croît linéairement avec l'altitude.

MÉTHODE DE CALCUL DES ÉMISSIONS À L'ÉCHAPPEMENT DES POIDS LOURDS

3.1 PRINCIPE DE CALCUL DES ÉMISSIONS À L'ÉCHAPPEMENT DES PL

Le principe de calcul de l'émission unitaire d'un PL est le même que celui d'un VL. La méthode proposée reste **une méthode simplifiée basée sur les émissions unitaires des PL de type euro 4**. Dans le cas des PL, il convient toutefois d'ajouter un facteur lié à l'influence du tonnage.

Le principe de calcul de l'émission unitaire d'un PL pour une année donnée est donc :

$$e_{PL} = g \cdot e_4 \sum_{i=0}^6 \alpha_i \cdot f_i$$

avec

e_{PL} émission unitaire d'un PL pour une année donnée et des conditions données (vitesse et pente de la route) ;

g facteur traduisant l'influence du tonnage des PL (Cf. chapitre 3.3)

e_4 émission unitaire d'un PL de PTAC supérieur à 34 tonnes obéissant à la norme euro 4 (Cf. chapitre 3.4) pour des conditions données (vitesse et pente de la route) ;

α_i pourcentage de PL au sein du parc roulant obéissant à la norme euro i pour l'année considérée. La valeur pour $i=0$ désigne les PL obéissant à la norme antérieure à la norme euro 1 ;

f_i facteur de passage de la norme euro 4 à la norme euro i (Cf. chapitre 3.5).

3.2 INTÉGRATION DES EFFETS DE LA PENTE

A la différence des VL, l'effet de la pente est déjà intégré dans la méthodologie Copert.

3.3 INTÉGRATION DES EFFETS DU TONNAGE

Les émissions de base (Cf. Chapitre 3.4) ont été calculées pour un poids lourd de PTAC supérieur à 34 tonnes dans la mesure où cette catégorie est la plus représentée dans le parc roulant (Cf. tableau 6).

Pour connaître les émissions relatives à des poids lourds de tonnage différent (10 tonnes, 20 tonnes ou 30 tonnes), les facteurs correctifs indiqués dans le *tableau 14* peuvent être appliqués. Ils correspondent au ratio observé entre les émissions d'un PL du tonnage indiqué et d'un PL de PTAC supérieur à 34 tonnes. Ces ratios ont été déterminés à partir des émissions calculées à l'aide de la méthodologie Copert 4.

tonnage	10 t	20 t	30 t	> 34 t
facteur correctif g	0.45	0.73	0.91	1

Tableau 14 : influence du poids des PL sur les émissions

ÉMISSIONS UNITAIRES DES PL DE TYPE EURO 4 ET DE PTAC SUPÉRIEUR À 34 TONNES

Les émissions unitaires des PL de type euro 4 et de PTAC supérieur à 34 tonnes ont été calculées en exploitant la méthodologie Copert 4 à l'aide d'une feuille de calcul développée par le CETE Normandie Centre [7].

Les résultats correspondants sont synthétisés dans les *tableaux 15 à 17*. Les hypothèses de conversion des résultats de Copert exprimés en g/km sont les mêmes que celles utilisées pour les VL.

	-6%	-4%	-2%	0%	2%	4%	6%
10 km/h	13,25	15,97	20,58	27,47	32,84	33,23	39,28
20 km/h	11,30	14,83	20,63	29,94	39,4	49,71	57,92
30 km/h	7,65	11,93	19,32	33,64	48,03	60,72	77,89
40 km/h	5,17	9,27	17,59	37,18	55,69	72,21	97,89
50 km/h	3,48	6,94	15,77	40,49	62,56	84,76	117,68
60 km/h	2,24	4,87	14,01	43,58	68,82	93,64	127,49
70 km/h	1,27	3,00	12,36	46,5	74,61	88,72	127,49
80 km/h	0,48	1,28	10,85	49,27	80,03	82,39	127,49
86 km/h	0,06	0,3	10,02	50,87	83,13	82,39	127,49

Tableau 15 : émissions de monoxyde de carbone en l/h d'un PL de PTAC supérieur à 34 tonnes obéissant à la norme Euro 4, en fonction de la vitesse et de la pente (d'après Copert 4 et des données de parc INRETS)

	-6%	-4%	-2%	0%	2%	4%	6%
10 km/h	30,93	41,86	58,5	91,6	121,21	163,21	196,63
20 km/h	29,2	46,41	78,93	129,86	203,49	269,93	344,01
30 km/h	21,82	41,54	80,42	160,54	268,7	370,08	473,93
40 km/h	15,77	34,61	75,94	187,66	330,63	465,68	599,75
50 km/h	11,12	27,35	72,29	212,73	394,93	557,91	716,4
60 km/h	7,42	20,20	70,07	236,51	459,20	647,49	764,66
70 km/h	4,34	13,28	63,72	259,45	512,91	734,91	764,66
80 km/h	1,68	6,59	41,49	281,83	537,44	760,77	764,66
86 km/h	0,24	2,67	13,32	295,08	527,37	760,77	764,66

Tableau 16 : émissions d'oxydes d'azote en l/h d'un PL de PTAC supérieur à 34 tonnes obéissant à la norme Euro 4, en fonction de la vitesse et de la pente (d'après Copert 4 et des données de parc INRETS)

	-6%	-4%	-2%	0%	2%	4%	6%
10 km/h	2,62	3,19	3,65	4,85	5,93	7,21	8,57
20 km/h	2,76	3,48	4,83	6,61	9,46	11,75	12,97
30 km/h	2,69	3,43	4,85	7,72	11,91	14,76	15,67
40 km/h	2,56	3,26	4,61	8,62	14,10	16,93	17,74
50 km/h	2,43	3,02	4,54	9,44	16,38	18,51	18,86
60 km/h	2,31	2,76	4,65	10,27	18,63	19,33	18,57
70 km/h	2,19	2,50	4,51	11,14	20,24	18,75	18,57
80 km/h	2,08	2,25	3,22	12,08	20,15	18,16	18,57
86 km/h	2,02	2,11	1,38	12,69	18,64	18,16	18,57

Tableau 17 : émissions de fumées en m³/h d'un PL de PTAC supérieur à 34 tonnes obéissant à la norme Euro 4, en fonction de la vitesse et de la pente (d'après Copert 4 et des données de parc INRETS)

La méthodologie Copert 4 ne permet pas de calculer les émissions pour des PL de tonnage élevé pour des vitesses supérieures à :

- 86 km/h pour une pente de -6%, -4%, -2%, 0% et 2 % ;
- 73 km/h pour une pente de 4% ;
- 55 km/h pour une pente de 6%.

Une fois ces vitesses maximales atteintes, les émissions ont été supposées constantes. Les cellules correspondantes ont été grisées dans les tableaux 15 à 17.

La méthodologie Copert ne donnant pas les émissions pour une vitesse inférieure à 12 km/h, nous supposons que :

$$\text{émissions}_{12\text{km/h}} = \text{émissions}_{10\text{km/h}}$$

3.5 FACTEUR DE PASSAGE DE LA NORME EURO 4 AUX AUTRES NORMES

Comme indiqué au chapitre 3.1, la méthode ici décrite ne s'appuie que sur les émissions liées à la norme euro 4 et accède aux autres normes par des facteurs de passage calculés à l'aide de la méthodologie Copert 4.

Les facteurs de passage proposés sont indiqués dans les tableaux 18 à 21. Ils correspondent au ratio Euro n / Euro 4.

Pour les normes Euro 6, 5 et 3, le comportement variable des émissions en fonction de la pente et de la vitesse oblige à différencier les différentes pentes rencontrées et à introduire des facteurs qui varient avec la vitesse.

	CO	NOx	PM
Pré euro	2,7	2,35	12
Euro 1	2,3	1,7	9,5
Euro 2	2	1,8	5
Euro 4	1	1	1

Tableau 19 : facteurs de passage des émissions de la norme euro 4 des PL vers les normes euro 2, euro 1 et pré-euro.

	CO	NOx	PM
Pente -6%	1	0,58	0,1
Pente -4%	1	$3 \cdot 10^{-5} v^2 - 3,3 \cdot 10^{-3} v + 0,62$	0,1
Pente -2%	1	0,40	0,1
Pente 0%	1	$5,4 v^{-1,12}$	0,1
Pente 2%	1	$3 \cdot 10^{-4} v + 0,037$	0,1
Pente 4%	1	$5 \cdot 10^{-9} v^4 - 1,1 \cdot 10^{-6} v^3 + 9,5 \cdot 10^{-5} v^2 - 3,2 \cdot 10^{-3} v + 0,085$	0,1
Pente 6%	1	$7 \cdot 10^{-5} v^2 - 0,0037 v + 0,09$	0,1

Tableau 18 : facteurs de passage des émissions de la norme euro 4 des PL vers la norme euro 6

	CO	NOx	PM
Pente -6%	1,5	1,5	$4,38 \cdot 10^{-4} v^2 - 0,0573 v + 2$
Pente -4%	$4,54 \cdot 10^{-4} v^2 - 0,025 v + 1,675$	$3 \cdot 10^{-6} v^3 - 0,0004 v^2 + 0,0107 v + 1,46$	$2,8 \cdot 10^{-4} v^2 - 0,042 v + 1,82$
Pente -2%	$-2,3 \cdot 10^{-4} v^2 + 0,023 v + 1,19$	1,5	$2,7 \cdot 10^{-4} v^2 - 0,04235 v + 2$
Pente 0%	$-4,65 \cdot 10^{-7} v^4 + 9,11 \cdot 10^{-5} v^3 - 0,0062 v^2 + 0,173 v + 0,1$	$-0,0154 v + 1,57$	$-9,8 \cdot 10^{-6} v^3 + 0,0017 v^2 - 0,0927 v + 2,5$
Pente 2%	$-4,98 \cdot 10^{-7} v^4 + 9,7 \cdot 10^{-5} v^3 - 0,0067 v^2 + 0,195 v - 0,012$	$9,8 v^{0,808}$	$1,44 \cdot 10^{-4} v^2 - 0,02 v + 1,53$
Pente 4%	1,95	$5,33 \cdot 10^{-7} v^4 - 1,135 \cdot 10^{-4} v^3 + 8,47 \cdot 10^{-3} v^2 - 0,2575 v + 3$	$2,86 \cdot 10^{-4} v^2 - 0,0325 v + 1,67$
Pente 6%	$-0,0107 v + 1,9$	$4,463 \cdot 10^{-7} v^4 - 8,02 \cdot 10^{-5} v^3 + 5,2 \cdot 10^{-3} v^2 - 0,14 v + 1,66$	$-0,0144 v + 1,34$

Tableau 20 : facteurs de passage des émissions de la norme euro 4 des PL vers la norme euro 5

	CO	NOx	PM
Pente -6%	$0,1 v^{1,305}$	$0,2045 v^{0,895}$	$0,04 v + 8,5$
Pente -4%	$0,3 v^{0,863}$	$7,95 \cdot 10^{-5} v^3 - 0,0081 v^2 + 0,22v + 0,78$	$0,05 v + 6,8$
Pente -2%	$0,04 v + 1,7$	$2,2 \cdot 10^{-6} v^4 - 0,000362 v^3 + 0,0199 v^2 - 0,411v + 4,2$	$0,00486 v^2 - 0,365 v + 11,8$
Pente 0%	$0,0125 v + 1,5$	$-0,0034 v + 1,65$	$9 v^{0,1832}$
Pente 2%	1,65	$-0,0045 v + 1,7$	$1,2 \cdot 10^{-3} v^2 - 0,1283 v + 6,5$
Pente 4%	$0,955 v^{0,184}$	1,45	$2 \cdot 10^{-3} v^2 - 0,1433 v + 5,65$
Pente 6%	$-0,0112v + 1,5$	$-1,05 \cdot 10^{-5} v^3 + 0,001 v^2 - 0,029v + 1,7$	$0,0476 v + 2,74$

Tableau 21 : facteurs de passage des émissions de la norme euro 4 des PL vers la norme euro 3

3.6 PRISE EN COMPTE DES EFFETS DE L'ALTITUDE

En conformité avec la méthode AIPCR 2011, l'altitude est considérée comme n'ayant pas d'influence notable sur les émissions à l'échappement des poids lourds en dessous de 2000 mètres.

CAS PARTICULIER DES ÉMISSIONS DE PARTICULES HORS ÉCHAPPEMENT

En complément aux émissions à l'échappement, il faut, dans le cas des particules, intégrer des émissions hors échappement qui correspondent aux particules issues notamment :

- de l'usure de certaines pièces mécaniques ;
- de l'usure de la route ;
- des phénomènes de remise en suspension.

4.1 TAILLE DES PARTICULES

A l'échappement, les particules peuvent être assimilées à des particules de diamètre inférieur à 2,5 µm (PM_{2,5}). Pour un moteur diesel de type injection directe première génération, on constate en effet que la répartition en nombre des particules suit une loi log-normale typique centrée à 100 nm (0,1 µm) [9].

Les particules hors échappement sont quant à elles beaucoup plus grosses.

Il est donc utile, dans ce dernier cas, de distinguer les PM_{2,5} des PM₁₀. Il n'est pas utile d'aller au-delà des PM₁₀ puisqu'il n'y a pas de réglementation pour des diamètres supérieurs à 10 µm, même si les particules hors échappement sont constituées d'éléments dont le diamètre peut largement dépasser 10 µm.

4.2 FACTEURS D'ÉMISSION EN MASSE DES PARTICULES HORS ÉCHAPPEMENT

La méthodologie Copert 4 inclut un calcul des émissions hors échappement des particules issues des pneumatiques, des garnitures de frein et de la surface de la route. Elle ne prend en compte ni l'usure des embrayages ni les apports dus aux lubrifiants, aux glissières de sécurité, aux fondants routiers et à la remise en suspension.

La méthode AIPCR ([4] et [11]) propose également des facteurs d'émissions hors échappement pour les PM₁₀, mais ils sont très élevés et atteignent par exemple 1500 mg/km pour un poids lourd. Par ailleurs, la méthode de l'AIPCR privilégie les résultats relatifs aux PM_{2,5} compte tenu de leur participation prépondérante aux problèmes de visibilité (Cf. chapitre 4.3).

Compte tenu de ces éléments, il est proposé, pour les PM₁₀, de mettre en œuvre les facteurs d'émissions hors échappement proposés par le document "**Sélection des agents dangereux à prendre en compte dans l'évaluation des risques sanitaires liés aux infrastructures routières**" (novembre 2004, [10], Cf. tableau 22). Ces facteurs d'émissions tiennent compte notamment de la remise en suspension et sont basés sur des résultats d'études et de travail s'étendant de la fin des années 70 jusqu'à 2002.

	VL	VUL	PL
Émissions hors échappement (mg/km/véhicule)	44	50	570

Tableau 22 : facteurs d'émissions hors échappement pour les PM₁₀, en mg/km, proposés pour un véhicule par le document "Sélection des agents dangereux à prendre en compte dans l'évaluation des risques sanitaires liés aux infrastructures routières" [10].

Pour les PM_{2,5} émises hors échappement, les facteurs d'émissions en masse proposés dans la méthode ici décrite sont ceux indiqués dans les publications de l'AIPCR (Cf. tableau 23).

	VL	PL
émissions hors échappement des PM 2,5(mg/km/véhicule)	28	104

Tableau 23 : facteurs d'émissions hors échappement pour les PM_{2,5}, en mg/km proposés pour un véhicule par l'AIPCR [11]

4.3 LIEN ENTRE CONCENTRATION EN MASSE DES PARTICULES ET OPACITÉ

Lorsque l'on traite des émissions de particules, il convient donc de garder à l'esprit la distinction évoquée précédemment entre :

- les particules à l'échappement, qui sont des PM_{2,5} exclusivement,
- et les particules hors échappement, largement plus grosses.

Les besoins en ventilation des tunnels étant déterminés en fonction de l'opacité, la difficulté réside dans le comportement différent de ces deux types de particules vis-à-vis de l'opacité.

Alors que les mesures réalisées en tunnel depuis plusieurs années ont permis de caractériser au mieux la relation entre émissions des particules à l'échappement et opacité, les mécanismes relatifs aux émissions hors échappement sont moins bien connus.

Ainsi, l'AIPCR indique que "si on considère uniquement les particules de moteurs diesel, des recherches montrent que la corrélation entre la concentration massique (μ) et l'extinction se présente comme suit :

- gaz d'échappement concentré (tuyau d'échappement) :

$$K = 6 \mu ;$$

- gaz d'échappement dilué (tunnel) : $K = 4,64 \mu$ [4].

Ce sont ces éléments qui ont conduit à proposer un facteur de conversion des particules en fumées à l'échappement tel que 1 g/h = 4,7 m²/h de fumées. (Cf. chapitre 2.3) .

Pour l'intégration d'une composante hors échappement à l'opacité, nous reprendrons les éléments de l'AIPCR qui conduisent finalement à ne pas s'intéresser aux PM₁₀ hors échappement, mais uniquement aux PM_{2,5} hors échappement. La méthode AIPCR indique en effet que "l'extinction de la lumière atteint son maximum dans la gamme de la lumière visible, c'est-à-dire que la partie dominante est déjà couverte à l'intérieur de la fraction PM_{2,5}" [4].

	VL	PL
émissions hors échappement des PM 2,5 en m²/km	0,13	0,49

Tableau 24 : facteurs d'émissions hors échappement pour les PM_{2,5} en m²/km proposés pour un véhicule par l'AIPCR" [11]

4.4 CE QU'IL FAUT RETENIR CONCERNANT LES ÉMISSIONS HORS ÉCHAPPEMENT DES PARTICULES

Pour les besoins de dimensionnement de la ventilation sanitaire, basé sur des niveaux d'opacité exprimé en m⁻¹, il faut veiller, en complément des émissions à l'échappement, à intégrer les émissions hors échappement sur la base du tableau 24.

Pour des études d'environnement visant à déterminer dans ou aux abords des ouvrages des concentrations en PM₁₀ ou PM_{2,5}, il faut cette fois s'appuyer pour les émissions hors échappement, sur les données des tableaux 22 et 23.

SYNTHÈSE DU PRINCIPE DE CALCUL DES ÉMISSIONS EN TUNNEL

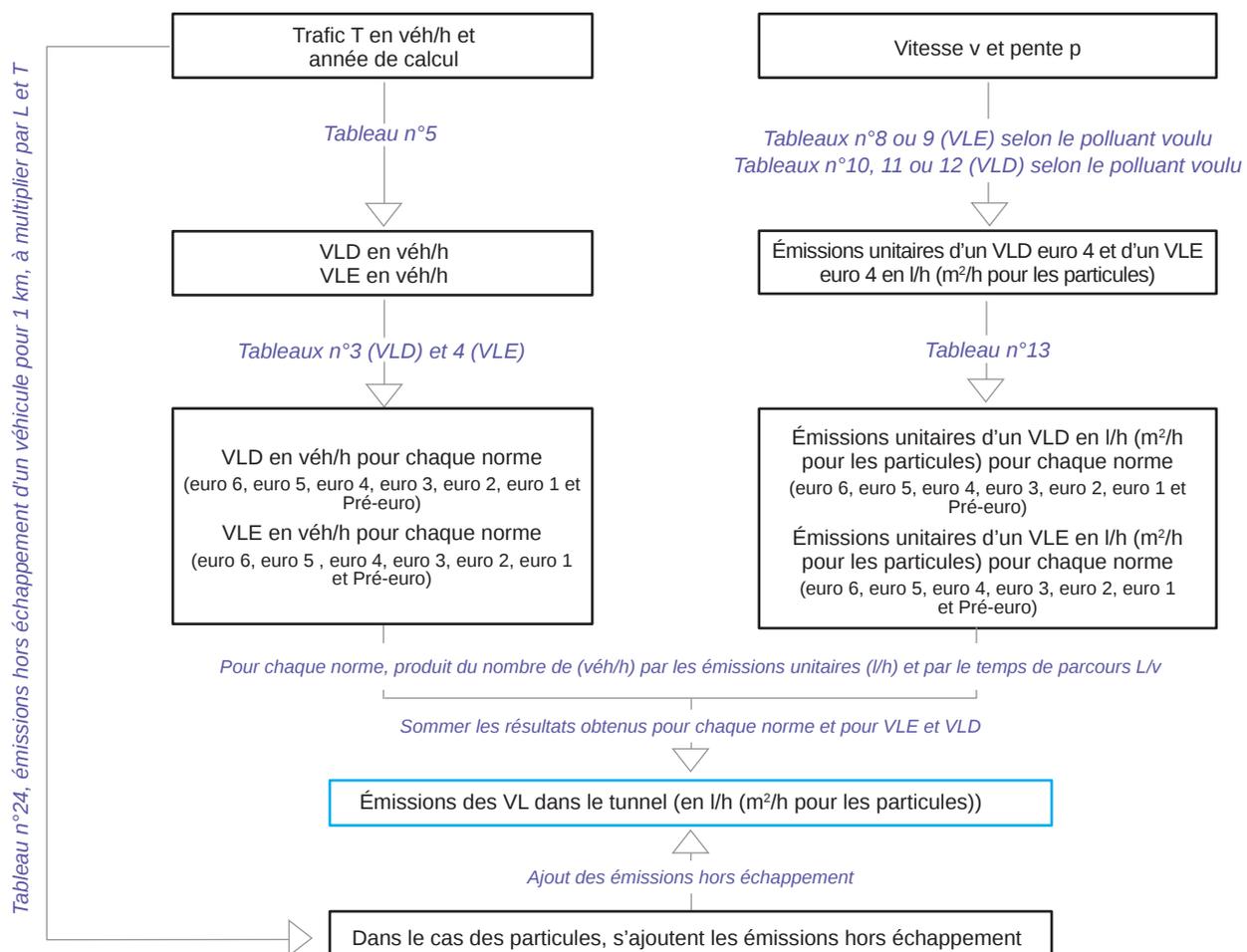
Les logigrammes présentés ci-après sont ceux relatifs aux calculs d'émissions en vue d'un calcul de dimensionnement d'une ventilation sanitaire. Aussi, les résultats relatifs aux particules sont exprimés en m^2 . Le lecteur qui souhaiterait déterminer des concentrations massiques en particules, qu'il s'agisse de $PM_{2,5}$ ou de PM_{10} , veillera à intégrer une composante

hors échappement à l'appui des facteurs d'émissions proposés au chapitre 4.2 ou d'éléments plus récents disponibles dans la littérature.

Le cas des émissions à 0 km/h n'est pas développé. Les données nécessaires à un tel cas d'étude figurent en annexe.

5.1 ÉMISSIONS DES VL

Emissions horaires dues à un trafic horaire T circulant à la vitesse v dans un tunnel de longueur L et de pente p



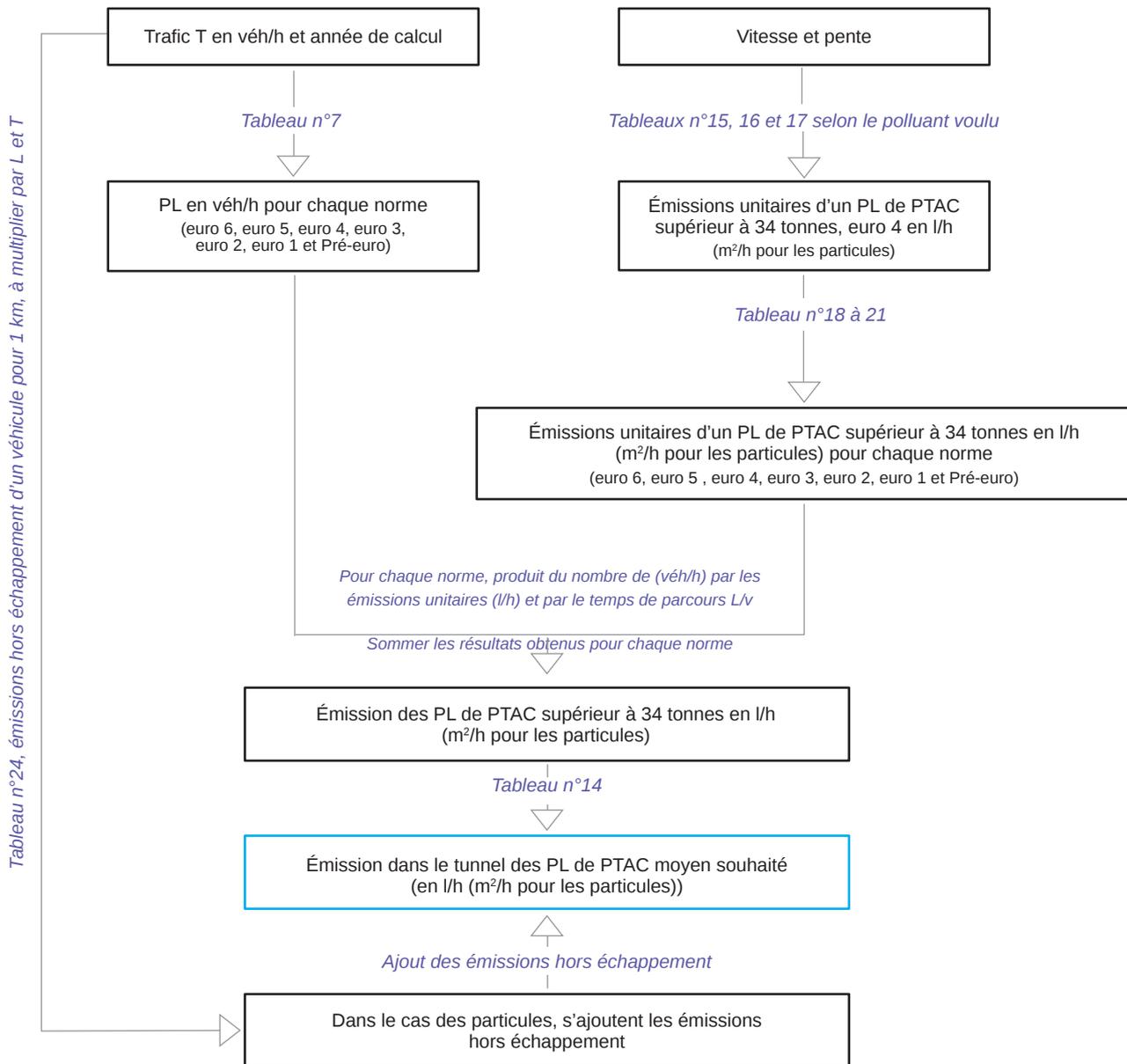
Abréviation : VLE : véhicules légers essence ; VLD : véhicules légers diesel

Dans les cas des émissions de monoxyde de carbone, on intégrera un effet de l'altitude en retenant les paramètres proposés par l'AIPCR à savoir, une multiplication par 2 à 2000 mètres d'altitude pour les véhicules essence.

Nous supposons que ce facteur dû à l'altitude vaut 1 au niveau de la mer et qu'il croît linéairement avec l'altitude.

5.2 ÉMISSIONS DES PL

Emissions horaires dues à un trafic horaire T circulant à la vitesse v dans un tunnel de longueur L et de pente p



CONCLUSION

Cette actualisation de la méthode de calcul des émissions permet de rendre les calculs plus cohérents avec les émissions actuelles des véhicules et celles attendues à l'avenir.

Par rapport à la précédente version, elle conduit, pour les horizons futurs, à réduire significativement les émissions de monoxyde de carbone.

Les émissions d'oxydes d'azote diminuent pour les poids lourds mais sont plus élevées pour les véhicules légers. Pour ces derniers, l'intégration des nouvelles normes euro 5 et 6 est en effet assez peu visible aux horizons futurs pour ce polluant, en raison d'une tendance à la sous-estimation qu'avait la précédente version vis-à-vis de la norme euro 4.

Pour les particules, l'intégration de nouveaux facteurs d'émission pour la composante hors échappement tend à augmenter les émissions. La composante hors échappement, non sensible aux progrès technologiques, devient prépondérante par rapport à la composante échappement qui bénéficie des progrès liés à la mise en place des filtres à particules.

Enfin, on rappellera que l'AIPCR propose également une méthode complète de calcul des émissions. Cette dernière n'est toutefois pas directement applicable puisqu'elle ne tient pas compte des spécificités du parc roulant français telles qu'elles ont été présentées et intégrées dans le présent document.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] : *Calcul des émissions de polluants des véhicules automobiles en tunnel*, CETU, 2002
- [2] : *Computer Program to Calculate Emissions from Road Transport*, Agence Européenne de l'Environnement, 2007
- [3] : Artemis, "Assessment and reliability of transport emission models and inventory systems", <http://www.trl.co.uk/artemis/>
- [4] : *Vehicle Emissions and Air Demand for Tunnel Ventilation*, Comité des tunnels routiers de l'Association mondiale de la route (AIPCR), 2004
- [5] : *Évolution du parc automobile français entre 1970 et 2020*, Béatrice Bourdeau, 1998
- [6] : *Transport routier – Parc, usage et émissions des véhicules en France de 1970 à 2025*, Hugrel Joumard, 2004
- [7] : *CopCete V3, logiciel de calcul des émissions de polluants des véhicules routiers à l'aide de la méthodologie Copert 4*, Vincent Demeules, 2010
- [8] : *Circulaire n°99.329*, Ministère de la Santé, 1999
- [9] : *Les particules de combustion automobile et leurs dispositifs d'élimination*, Ademe, 2005
- [10] : *Sélection des agents dangereux à prendre en compte dans l'évaluation des risques sanitaires liés aux infrastructures routières et ferroviaires*, Groupe de travail interministériel Santé/Équipement/Écologie, 2004
- [11] : *Road tunnels: Vehicle Emissions and Air Demand for Ventilation*, Comité des tunnels routiers de l'Association mondiale de la route (AIPCR), 2012 (actualisation de la référence [4])

ANNEXES : CAS DES ÉMISSIONS À 0 KM/H

Fumées	PL	VLD
Pré-euro	69,09	4,96
euro 1	51,94	5,78
euro 2	8,51	5,47
euro 3	8,08	2,62
euro 4	4,04	2,06
euro 5	4,04	0,19
euro 6	4,04	0,17

Tableau 25 : émissions de fumées à 0 km/h en m²/h (d'après l'exploitation des données de l'AIPCR, [11])

Oxydes d'azote	PL	VLD	VLE
Pré-euro	93,29	8,12	5,44
euro 1	77,54	8,00	1,67
euro 2	76,32	8,36	1,33
euro 3	76,85	5,25	0,32
euro 4	40,89	4,97	0,25
euro 5	28,37	3,74	0,23
euro 6	28,37	1,65	0,22

Tableau 26 : émissions d'oxydes d'azote à 0 km/h en l/h (d'après l'exploitation des données de l'AIPCR, [11])

Monoxyde de carbone	PL	VLD	VLE
Pré-euro	68,79	6,18	114,48
euro 1	28,43	4,10	1,93
euro 2	16,56	2,08	1,32
euro 3	12,29	0,80	0,42
euro 4	1,08	0,59	1,14
euro 5	1,08	0,56	1,14
euro 6	1,08	0,56	1,14

Tableau 27 : émissions de monoxyde de carbone à 0 km/h en l/h (d'après l'exploitation des données de l'AIPCR, [11])

CONTRIBUTEURS

Cyrille Bernagaud, Jean-François Burkhart (CETU), Vincent Demeules (CETE Normandie Centre) ont participé à l'élaboration de ce document.



Centre d'Études des Tunnels

25 avenue François Mitterrand

Case n°1

69674 BRON - FRANCE

Tél. 33 (0)4 72 14 34 00

Fax. 33 (0)4 72 14 34 30

cetu@developpement-durable.gouv.fr

