

PERTINENCE DU FILTRE À PARTICULES POUR LES POIDS LOURDS

Olivier ROLIN

Les filtres à particules (FAP) permettent de réduire la pollution locale liée au trafic des poids lourds. Cependant, ils présentent des coûts importants d'installation et de fonctionnement. Favoriser leur installation sur les véhicules existants n'est opportun que si le bilan des coûts par rapport aux avantages environnementaux est positif. Ce bilan dépend de l'âge du véhicule : les véhicules les plus anciens circulent moins que les récents, mais sont plus polluants ; par ailleurs, ils circulent davantage en zone urbaine, où les impacts sanitaires des particules sont plus sensibles du fait de la densité de population.

Les conclusions qu'on peut tirer de la comparaison des coûts et des avantages sont sensibles aux hypothèses retenues pour valoriser la pollution locale. Sous des hypothèses « centrales », le bilan est favorable aux FAP, sous réserve de faisabilité technique, pour les camions immatriculés entre 1990 et 1996 : il s'agit de véhicules répondant à des normes antipollution déjà anciennes (normes Euro 0 et Euro 1), mais qui restent encore présents dans le parc en circulation (ils représentent 8 % des véhicules-kilomètres en 2003). En revanche, pour les véhicules immatriculés postérieurement, et donc moins polluants, les avantages sont plus faibles devant des coûts toujours élevés. Enfin, l'installation a posteriori de FAP n'est presque jamais pertinente pour les tracteurs routiers, qui assurent pourtant la grande majorité des transports (86 % des tonnes-kilomètres en 2003), car ils circulent principalement en milieu rural où les impacts sanitaires sont moindres.

Les véhicules les plus âgés sont aussi les plus polluants. En effet, les normes antipollution concernant les poussières mises en œuvre depuis 1994, de plus en plus sévères, ne s'appliquent qu'aux véhicules neufs. Parallèlement, les caractéristiques de circulation d'un véhicule évoluent en fonction de l'âge : le parcours annuel moyen, la répartition de la circulation entre zones urbaines et rase campagne sont autant de facteurs dont dépend la pollution.

En quantifiant ces différents effets, il est possible d'estimer le coût de la pollution locale d'un véhicule sur l'ensemble de sa durée de vie restante. Les valeurs ainsi obtenues, comparées avec les coûts d'installation et de fonctionnement du FAP, déterminent le ratio des avantages environnementaux sur les coûts de revient du FAP en fonction de l'âge du véhicule.

**Les particules
PM1,
principal indicateur
de la pollution
locale**

Les particules, majoritairement émises lors de la combustion des produits pétroliers, sont la principale cause de pollution locale. Le terme PM10 désigne l'ensemble des particules, quelle que soit leur origine (combustion, usure des pneumatiques...) dont le diamètre est inférieur à 10 microns (μm). Les PM1 regroupent les particules dont le diamètre est inférieur à $1\mu\text{m}$. Par définition, les PM1 sont incluses dans les PM10, elles-mêmes incluses dans les poussières dont les quantités sont plafonnées par les normes Euro.

L'indicateur d'émission de particules retenu dans la présente étude est la masse de PM1 qui toutes, à la différence des PM10, sont issues de la combustion de carburants. La quantité de PM1 est considérée comme proportionnelle à la quantité de poussières.

POIDS LOURDS

L'instruction cadre du 25 mars 2004 du Ministère de l'équipement, des transports, de l'aménagement du territoire, du tourisme et de la mer sur l'évaluation des projets d'infrastructures, met en relation les impacts sanitaires de la pollution atmosphérique locale et les émissions de particules des véhicules. On en déduit le coût d'un gramme de PM1 par zone d'émission (*tableau 1*).

Tableau 1 - Valorisation de la pollution locale (PM1) selon le lieu d'émission

	Valeur en 2000 (c€ / g)
Zone "urbain dense"	47,3
Zone "urbain diffus"	16,6
Zone "rase campagne"	1,0

Source : Instruction cadre du 25 mars 2004 + calculs SES

Les émissions de poussières ont été progressivement plafonnées à des seuils de plus en plus bas à mesure de la mise en oeuvre des normes antipollution (*tableau 2*).

Tableau 2 - Normes antipollution applicables aux poids lourds

	Date d'entrée en vigueur de la norme	Valeur limite ¹ poussières E (g / kWh)
Euro 0	1988	Pas de valeur limite
Euro 1	1994	0,36
Euro 2	1997	0,15
Euro 3	2002	0,10

Source : Etude SES-CITEPA « Estimation des émissions de polluants du trafic routier en 2010 et 2020 »

Le critère déterminant de l'âge du véhicule

La pollution locale imputable à un véhicule sur l'ensemble de son cycle de vie dépend de sa durée de vie (entre le 1er janvier 2005² et sa sortie du parc), de son parcours annuel moyen et de la répartition de celui-ci entre les différents réseaux (rural, urbain diffus, urbain dense), ainsi que des normes antipollution en vigueur lors de sa fabrication (*encadré*).

Le vieillissement du parc est décrit à l'aide d'une loi de survie donnant la proportion de véhicules encore en service à chaque âge. Au bout de 15 ans, près de 70 % des camions de plus de 12 tonnes de poids total autorisé en charge (PTAC) roulent encore, contre 30 % de tracteurs routiers (*graphique 1*).

Le parcours annuel moyen d'un véhicule est d'autant plus faible que le véhicule est ancien. Un tracteur effectue plus de 110 000 km par an en moyenne en début de mise en service, moins de 40 000 km après sa dixième année. Il en est de même des camions, avec respectivement 60 000 km et 25 000 km en début de vie et après dix ans (*graphique 2*).

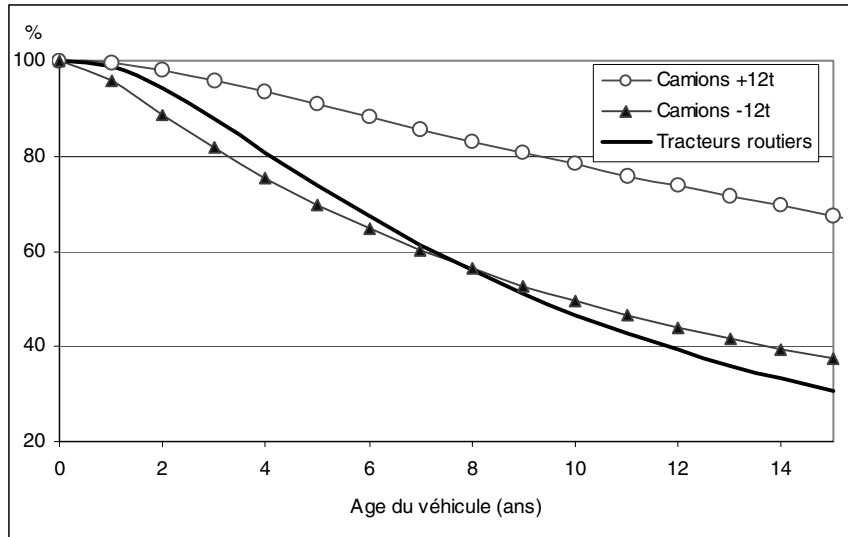
L'ampleur des impacts sanitaires, qui sont à la base de la valorisation monétaire de la pollution locale, dépend de la densité de la zone où sont émis les polluants. Un poids lourd circule d'autant plus en milieu urbain que son PTAC (ou PTR, poids total roulant autorisé) est faible (*graphique 3*). Par ailleurs, pour tout poids lourd, la part de la circulation effectuée en zone urbaine augmente avec l'âge.

¹ Par souci de simplification, seules les valeurs pour les véhicules ayant une puissance supérieure à 85kW ont été retenues.

² La période allant du 01/01/2005 à la sortie du parc du véhicule a été retenue plutôt que celle couvrant l'ensemble du cycle de vie du véhicule car le but de l'étude est d'évaluer l'efficacité d'éventuelles mesures incitatives à l'équipement des poids lourds en FAP à une date donnée (ici le 01/01/2005). Les émissions passées (antérieures à 2005) ne peuvent plus faire l'objet de mesures de réduction.

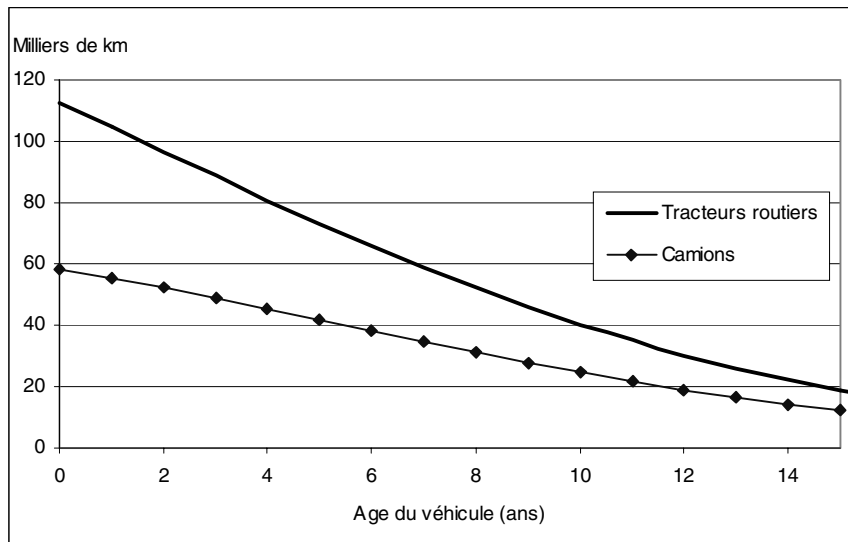
POIDS LOURDS

Graphique 1 - Taux de survie en fonction de l'âge des véhicules



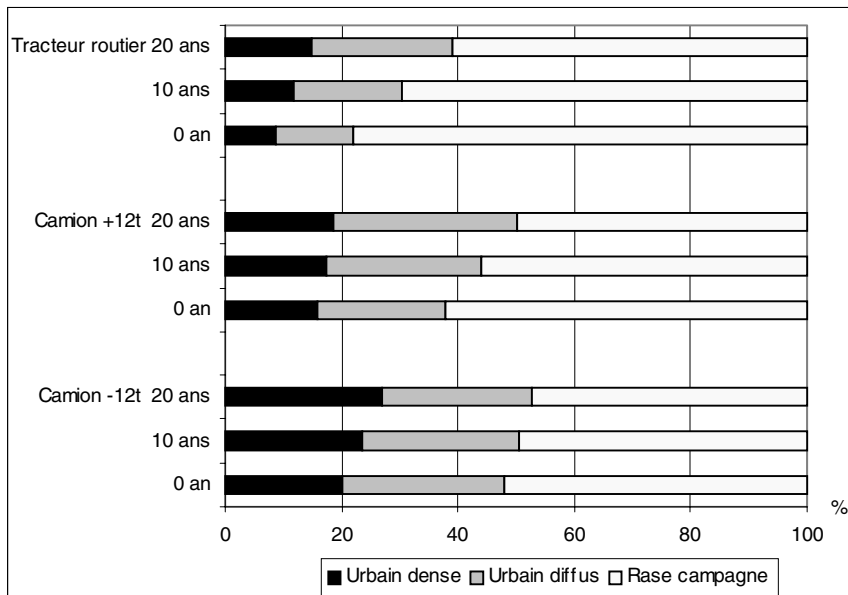
Sources : SES (enquête TRM), FCA

Graphique 2 - Evolution du parcours annuel moyen en fonction de l'âge du véhicule



Source : SES (enquête TRM)

Graphique 3 - Evolution de la répartition de la circulation en fonction de l'âge du véhicule



Source : SES (enquête TRM)

POIDS LOURDS

En outre, les performances environnementales d'un véhicule donné se dégradent au cours du temps. Pour une norme antipollution donnée, un véhicule émet d'autant plus de particules par kilomètre parcouru qu'il est ancien. Pour pallier le manque de données statistiques fiables pour évaluer cette dégradation, la méthodologie Copert III³ propose de retenir une majoration de 10 % des émissions des poids lourds en l'absence de système de contrôle technique. Cette valeur est cohérente avec un taux d'augmentation des émissions de particules avec l'âge compris entre 1,1 % et 1,6 % par an selon le type de véhicule considéré.

Les émissions de particules PM1 augmentent avec l'âge du poids lourd

A partir des données annuelles d'immatriculation, de l'évolution du taux de survie et du parcours annuel moyen des véhicules en fonction de leur âge, on affecte un volume de PM1 à chaque catégorie de véhicule dans chaque zone d'émission. Appliquée aux données passées, cette modélisation donne des résultats cohérents avec les volumes globaux émis par les poids lourds tels que répertoriés dans les inventaires du CITEPA⁴.

Les véhicules anciens polluent plus que ce qu'ils représentent en part de trafic (exprimé en véhicule-km). Les tracteurs routiers immatriculés en 2003 ont assuré la même année 9,5 % du trafic poids lourd (PL) en véh.km alors qu'ils n'ont représenté que 4,3 % des émissions polluantes. Les tracteurs routiers de 20 ans d'âge ont contribué, toujours en 2003, pour moins de 0,1 % au trafic PL et pour 0,3 % à la pollution (*tableau 3*).

Tableau 3 - Parts du trafic et des émissions des poids lourds réalisées par catégorie de véhicule

Caractéristiques du véhicule	Agé de moins d'un an		Agé de 10 ans		Agé de 20 ans	
	trafic	émissions	trafic	émissions	trafic	émissions
Camion -12t	0,98	0,27	0,20	0,38	0,06	0,12
Camion +12t	3,37	1,37	0,62	1,68	0,12	0,36
Tracteur routier	9,49	4,33	0,80	2,54	0,08	0,30

Source : calculs SES

La valorisation monétaire de la pollution locale

A partir des éléments précédents, on calcule une valorisation monétaire des dommages induits par les émissions de particules sur la période allant du 1^{er} janvier 2005 à la sortie du parc roulant du véhicule (*graphique 4*).

La mise en place de nouvelles normes antipollution en 1994, 1997 et 2002 (cf. ruptures dans le graphique 4) fait baisser le pouvoir polluant des nouveaux véhicules. Mais, pour une norme donnée, le volume de particules émis est d'autant plus élevé que le véhicule est récent, puisqu'en moyenne le parcours d'un véhicule décroît rapidement au fur et à mesure que le véhicule vieillit. Pour les véhicules immatriculés avant 1993, le coût de pollution locale diminue rapidement avec l'âge : ils roulent de moins en moins alors que leur probabilité de sortir du parc roulant s'accroît rapidement.

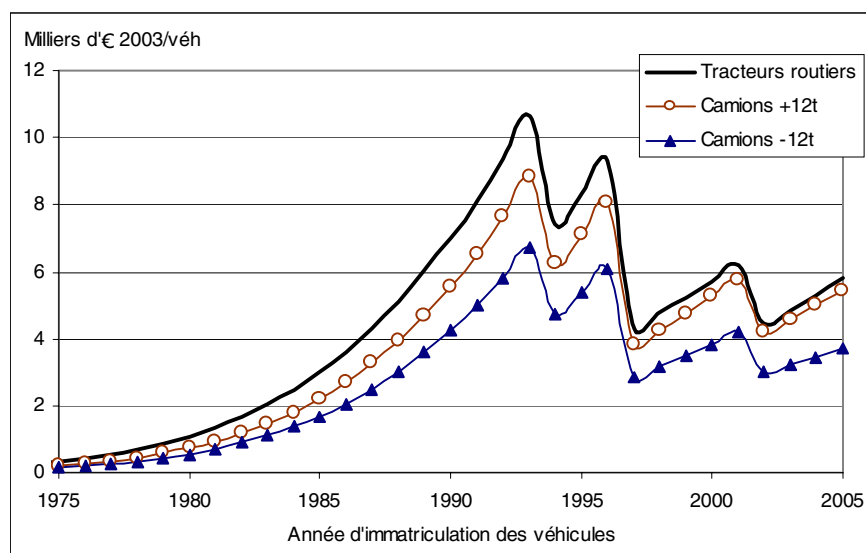
La valorisation de la pollution locale des tracteurs routiers est du même ordre de grandeur que celle des camions de PTAC supérieur à 12t. Pourtant les tracteurs routiers émettent davantage de particules (plus du double pour un véhicule neuf), mais les camions circulent davantage en milieu urbain où les impacts sanitaires liés à l'émission d'une même quantité de particules sont plus forts. Les camions de PTAC inférieur à 12t circulent encore plus fréquemment que les précédents en zone urbaine dense. Mais comme leur durée de vie est beaucoup plus faible, la monétarisation de leurs émissions de particules est, au total, moindre.

³ La méthodologie européenne Copert III sert de base à l'établissement des inventaires officiels d'émissions polluantes du secteur des transports.

⁴ Le Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique (CITEPA) est l'organisme en charge de l'élaboration des inventaires officiels d'émissions polluantes.

POIDS LOURDS

Graphique 4 - Valorisation actualisée en 2003 de la pollution locale au-delà du 01/01/2005 en fonction de l'année d'immatriculation du véhicule



Source : Calculs SES

Le coût des filtres à particules

L'installation d'un filtre à particules permet de supprimer la presque totalité des émissions des PM1 (99 %⁵). Les coûts d'installation comprennent le coût de l'appareil, la pose, ainsi que les systèmes de contrôle électronique (tableau 4).

Les coûts de fonctionnement intègrent l'augmentation de la consommation de carburant estimée à environ 3 %, la maintenance et le nettoyage des résidus ainsi que les coûts de régénération (additifs, ...). Les coûts varient selon la puissance du véhicule : 100 kW est considérée comme la puissance caractéristique des camions et 300 kW celle des tracteurs routiers.

Tableau 4 - Coûts d'installation et de fonctionnement d'un FAP

Puissance (kW)	Coûts d'installation (€ / véh)			Coûts de fonctionnement (c€/ km)		
	Euro 0	Euro 1	≥ Euro 2	Euro 0	Euro 1	≥ Euro 2
100	4 581	4 373	4 165	2,8	2,1	2,1
300	8 216	7 843	7 469	4,0	3,2	3,2

Source : Agence Suisse de l'Environnement, des Forêts et des Paysages (Particulate traps for heavy duty vehicles)

L'installation de FAP a posteriori sur les véhicules Euro 0⁶ et Euro 1 déjà en service occasionne des surcoûts estimés respectivement à 5 % et 10 %. De plus, un véhicule Euro 0 doit subir un nettoyage du FAP à une fréquence deux fois plus élevée que les véhicules plus récents.

La surconsommation de carburant liée à l'utilisation de FAP entraîne des émissions supplémentaires de gaz à effet de serre. Les surcoûts, calculés en valorisant la tonne de carbone à 100 €, conformément à l'instruction cadre du 25 mars 2004, sont déduits des gains de pollution locale. Toutefois, ce phénomène n'a pas d'incidence déterminante sur ces valeurs : au maximum, les coûts des émissions supplémentaires de gaz à effet de serre représentent 3,8 % de la valorisation de la pollution locale pour les camions de PTAC inférieur à 12t les plus récents, 4,6 % dans le cas des camions de PTAC supérieur à 12t les plus récents et 7,0 % pour les tracteurs routiers les plus récents.

⁵ Source « Particulate traps for heavy duty vehicles » de l'Agence Suisse de l'Environnement, des Forêts et des Paysages.

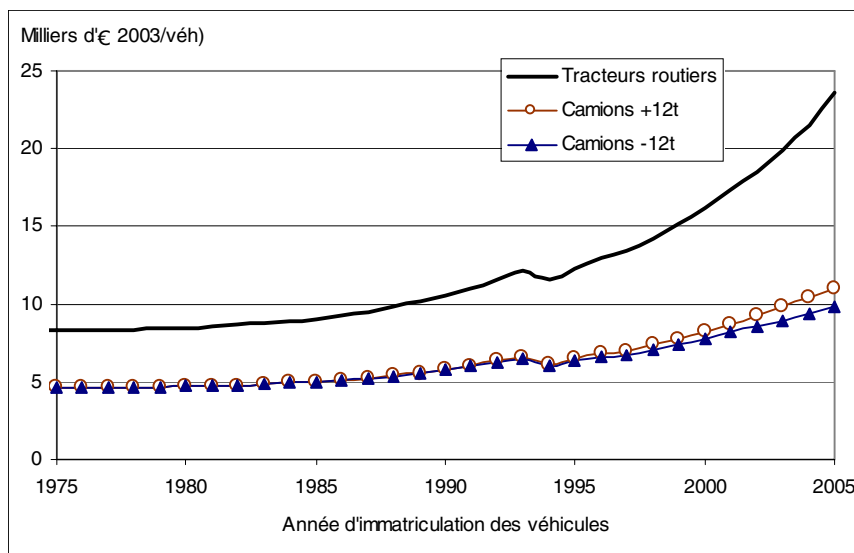
⁶ Sous réserve de faisabilité technique pour les véhicules Euro 0 ; ainsi, l'Ademe déconseille l'installation de FAP sur les véhicules Euro 0 et antérieurs.

POIDS LOURDS

Pour un véhicule neuf, l'installation d'un FAP représente un coût total sur sa durée de vie de 23,6 k€ pour les tracteurs routiers et 11,0 k€ pour les camions de PTAC supérieur à 12t (*graphique 5*). Cet équipement permet des gains actualisés en terme de pollution locale de 5,8 k€ et 5,4 k€ respectivement (*graphique 4*).

Pour un véhicule âgé de 10 ans, le bilan est moins déséquilibré, avec des coûts de FAP de 11,6 k€ pour les tracteurs routiers et 6,2 k€ pour les camions de PTAC supérieur à 12t, au regard d'avantages environnementaux chiffrés respectivement à 8,3 k€ et 7,1 k€.

Graphique 5 - Coûts actualisés en 2003 d'installation et de fonctionnement d'un FAP au-delà du 01/01/2005

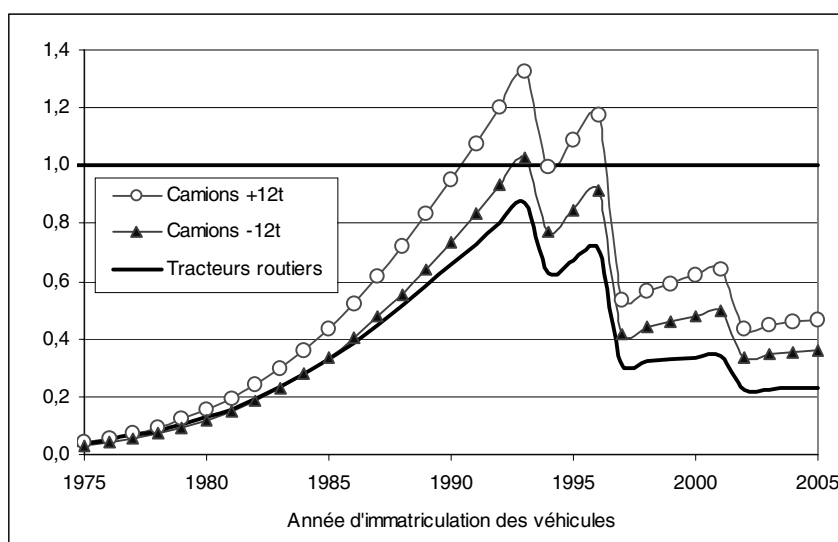


Source : Calculs SES

Pertinence des FAP pour les camions de plus de 12 tonnes

A partir de ces résultats, le ratio avantages environnementaux sur coûts du FAP est calculé pour les poids lourds. Si ce ratio est supérieur à 1, les avantages environnementaux obtenus sont supérieurs aux coûts d'installation et de fonctionnement du filtre ; s'il est inférieur à 1, les coûts du FAP excèdent les gains en pollution locale.

Graphique 6 - Ratio avantages sur coûts de l'installation de FAP



Source : Calculs SES

POIDS LOURDS

Ce sont les camions de plus de 12 tonnes de PTAC pour lesquels le FAP est le plus approprié, et les tracteurs routiers pour lesquels il l'est le moins, à ancienneté donnée (*graphique 6*). Les camions ayant un PTAC supérieur à 12t et immatriculés entre 1990 et 1996 sont les seuls véhicules pour lesquels l'installation d'un FAP devrait être recommandée (ratio très proche ou supérieur à 1), sous réserve de faisabilité technique, sous les hypothèses de valorisation de la pollution adoptées dans cette étude. Il s'agit de véhicules répondant à des normes antipollution déjà anciennes (au maximum Euro 1) et qui circulent encore suffisamment pour que le coût du FAP soit amorti par les gains environnementaux.

Plus largement, le ratio reste proche de 1 (supérieur à 0,75) pour les camions immatriculés entre 1990 et 1996, quel que soit leur PTAC, et pour les tracteurs routiers immatriculés en 1992 et 1993. En revanche, pour les poids lourds les plus récents, avec des ratios respectifs de 47 % (camions de PTAC >12t), 36 % (camions de PTAC <12t) ou 23 % (tracteurs routiers), le bilan ne milite guère en faveur du FAP, d'autant que la norme Euro 4 contribuera à abaisser encore considérablement ces valeurs.

La dégradation des performances environnementales des véhicules avec le temps a une influence réduite sur ces résultats. La prise en compte de ce phénomène a un impact sur le ratio compris entre 0 et 0,2. Il n'y a pas de modifications significatives des plages d'immatriculations pour lesquelles le ratio est proche de 1.

Deux tests de sensibilité à la valorisation de la pollution locale ont été effectués. Si on retient pour la pollution locale une valorisation inférieure de 70 % à celle de l'hypothèse centrale étudiée ici, le coût du FAP est toujours supérieur aux coûts induits par la pollution. Pour une valorisation qui serait au contraire supérieure de 70 % à celle de l'hypothèse centrale, le bilan devient favorable au FAP (ratio supérieur à 1) pour les véhicules suivants :

- Camions de PTAC <12t immatriculés de 1989 à 1996
- Camions de PTAC >12t immatriculés de 1987 à 1996 et de 1999 à 2001
- Tracteurs routiers immatriculés de 1990 à 1996.

Annexe méthodologique

Hypothèses sur la durée de vie des véhicules

Les durées de vie sont déduites de l'enquête TRM du SES et des données d'immatriculation du fichier central des automobiles (FCA). Les sorties des véhicules du parc roulant sont supposées suivre une loi lognormale telle que la proportion $\theta(a)$ des véhicules d'âge a toujours en service s'écrit :

$$\theta(a) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^a e^{-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}} \frac{d(x)}{x}$$

Les paramètres sont obtenus par la méthode des moindres carrés ordinaires (*tableau 5*).

Tableau 5 - Loi de survie des véhicules

	Paramètres		Proportion de véhicules (%) âgés de plus de		
	e^μ (ans)*	σ	10 ans	15 ans	20 ans
CAM-12t	9,8	1,3	49,5	37,4	29,4
CAM+12t	26,5	1,2	78,2	67,5	58,9
TR	9,2	1,0	46,7	30,7	21,1

Source : Calculs SES

* Ce terme correspond à la médiane du taux de survie des véhicules, c'est-à-dire la durée au bout de laquelle il ne reste en service que la moitié du nombre initial de véhicules. Dans le cas des camions ayant un PTAC supérieur à 12t, la valeur de la médiane (26,5 ans) peut paraître élevée, d'autant plus que les données disponibles ne portent que sur les véhicules de moins de 15 ans. Cependant, le parc n'est qu'une variable intermédiaire dans le calcul du trafic, et le parcours annuel moyen d'un véhicule décroît exponentiellement avec son âge. Ceci a pour effet que la circulation, produit du parc par le parcours annuel moyen, de l'ensemble des véhicules immatriculés une même année décroît très rapidement avec le temps pour les véhicules les plus anciens, et ce, quelles que soient les hypothèses retenues sur le taux de survie.

Hypothèses sur l'évolution du kilométrage en fonction de la durée de vie des véhicules

L'influence de l'âge d'un véhicule sur son parcours annuel moyen est déduit à partir des données de des enquêtes TRM du SES. Le parcours annuel moyen $L(a)$, où a est l'âge du véhicule, s'écrit :

$$L(a) = L_0 e^{\alpha a + \beta a^2}$$

Les coefficients ont été obtenus en minimisant la somme des carrés des écarts entre le modèle et les résultats de l'enquête TRM (*tableau 6*). Faute d'information disponible, on ne distingue pas les camions selon leur PTAC.

Tableau 6 - Paramètres décrivant l'évolution du parcours annuel moyen en fonction de l'âge du véhicule

	L_0 (km)	α (an ⁻¹)	β (an ⁻²)
Camion	58 089	-4,7.10 ⁻²	-3,8.10 ⁻³
Tracteur routier	112 564	-6,9.10 ⁻²	-3,3.10 ⁻³

Source : Calculs SES

Hypothèses sur l'évolution de la répartition de la circulation en fonction de l'âge des véhicules

La répartition de la circulation en fonction des différents types de zones considérés (rase campagne, urbain diffus, urbain dense) est basée sur l'analyse de l'enquête TRM du SES pour l'année 2001.

Chaque déplacement est caractérisé par une commune de chargement et une commune de déchargement ; ces communes peuvent être situées en zone urbaine ou en zone rurale telles que l'a défini l'INSEE à partir des résultats du recensement de 1999. On distingue les aires urbaines denses réunissant une population supérieure à 700 000 habitants (Paris, Lyon, Marseille, Lille, Toulouse, Nice, Bordeaux et Nantes), des autres, considérées comme des aires urbaines diffuses. Quatre cas se présentent alors :

- Les communes de chargement et de déchargement font partie d'une même aire urbaine : l'intégralité du parcours est alors affectée au type « zone urbaine » (dense ou diffuse) auquel appartiennent les deux communes.
- Les communes de chargement et de déchargement font partie d'une zone rurale : l'intégralité du parcours est affectée en rase campagne.
- Une des communes fait partie d'une zone urbaine, l'autre d'une zone rurale : on considère qu'une distance égale au rayon caractéristique de l'aire urbaine considérée (défini à l'aide de sa superficie) est effectuée en zone urbaine (dense ou diffuse) ; et que le reste du parcours est effectué en rase campagne, après vérification de la cohérence entre la longueur totale du parcours donné par l'enquête TRM et le rayon de l'aire urbaine.
- La commune de chargement et de déchargement font partie de deux aires urbaines différentes : on considère qu'une distance égale à la somme des rayons caractéristiques des deux aires urbaines considérées (définis à l'aide de sa superficie) est effectuée en zone urbaine (diffuse ou dense) ; le reste du parcours est effectué en rase campagne après vérification de la cohérence entre la longueur totale du parcours donné par l'enquête TRM et la somme des rayons des aires urbaines.

Pour tenir compte de la traversée éventuelle d'aires urbaines différentes des communes d'origine et de destination, le parcours initial en zone rurale est corrigé afin d'être cohérent avec le compte satellite du transport dans les aires urbaines et en zone rurale, publié en 2000 et qui donne une répartition de la circulation des poids lourds selon ce zonage pour l'ensemble du territoire en intégrant ce phénomène.

La modélisation de la variation de la répartition de la circulation en fonction des réseaux est supposée varier linéairement avec l'âge. Ainsi, θ_i , pourcentage de la circulation sur le réseau i d'un véhicule d'âge a , s'écrit :

$$\theta_i(a) = \theta_i^0 + \lambda_i a$$

Tableau 7 - Paramètres décrivant l'évolution de la répartition de la circulation en fonction de l'âge du véhicule

En %

	Rase campagne		Urbain diffus		Urbain dense	
	θ_i^0 (%)	λ_i (%/an)	θ_i^0 (%)	λ_i (%/an)	θ_i^0 (%)	λ_i (%/an)
Camion -12t	52,0	-0,2	27,9	-0,1	20,1	0,3
Camion +12t	62,3	-0,6	21,9	0,5	15,8	0,1
Tracteur routier	78,0	-0,8	13,3	0,5	8,7	0,3

Source : Calculs SES

Prise en compte de l'évolution des normes antipollution

Par ailleurs, les véhicules sont supposés respecter exactement les valeurs limites ε du tableau 2 à la date d'entrée en vigueur de la norme correspondante i .

Les émissions unitaires de PM1 pour un type de véhicule j , mesurées en grammes de PM1 par véh.km, s'écrivent $\varepsilon(i) * CU^j * \mu$

où CU^j est la consommation unitaire du véhicule j ,

μ , mesuré en kWh par litre aux 100 km, est un paramètre supposé constant dans le temps et par type de véhicule, intégrant notamment le rendement du moteur diesel moyen.

$I^j(i)$ représente le nombre d'immatriculation d'un véhicule pour l'année i . Alors, le volume global d'émission de PM1 s'écrit :

$$E(t) = \mu \sum_{j \in \{CAM-12t, CAM+12t, TR\}} \sum_i I^j(i) * \theta^j(t-i+0,5) * L^j(t-i+0,5) * CU^j(i) * \varepsilon(i)$$

Il est possible de déterminer les paramètres μ et $\varepsilon(< 1994)$ en ajustant l'évolution des émissions unitaires issues de cette équation aux données du CITEPA. L'ajustement par la méthode des moindres carrés ordinaires conduit à la valeur de 0,31 kWh par litre aux 100 km pour μ et de 0,59 g/kWh pour $\varepsilon(< 1994)$.

Enfin, le calcul sur la durée de vie du véhicule prend en compte un taux d'actualisation de 8 % et une croissance de la valorisation de la pollution locale égale à celle de la dépense de consommation des ménages par habitant (prise égale à 1,6 % par an sur la période considérée).

