

► DIRECTION DES ETUDES ECONOMIQUES ET DE L'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE

► DOCUMENT DE TRAVAIL

ANALYSE ÉCONOMIQUE DE LA RENTABILITE DES FILTRES À PARTICULES SUR LES VÉHICULES DIESELS NEUFS

Emmanuel MASSE

**Série Etudes
N° 03-E08**



Site internet : <http://www.environnement.gouv.fr>
20 avenue de Ségur – 75302 Paris 07 SP

► RESUME

Analyse économique de la rentabilité des filtres à particules sur les véhicules diesels neufs Emmanuel MASSE

Lors de la combustion du gazole, les moteurs diesels émettent des particules dans l'atmosphère. L'inhalation de ces particules conduit à l'augmentation du nombre de pathologies cardio-respiratoires et réduit l'espérance de vie.

Depuis quelques années, plusieurs constructeurs automobiles ont développé des technologies pour limiter les émissions de particules des véhicules diesels. Les plus performantes (notamment celle développée par Peugeot) sont maintenant opérationnelles. Dans la mesure où il semble peu réaliste d'installer des Filtres A Particules (FAP) sur les véhicules diesels déjà en service, il faut s'interroger sur les coûts et les bénéfices liés à la mise en place de FAP sur les véhicules neufs : véhicules particuliers (VP) et véhicules utilitaires légers (VUL), camions, et bus.

Il apparaît que mettre en place progressivement des FAP sur les véhicules neufs présente pour la collectivité un bilan global coûts/bénéfices très positif grâce à des bénéfices en terme de santé humaine conséquents (320 000 années de vie sauvées par an). La mesure est très rentable pour les camions et bus (120 000 années de vie sauvées par an pour un bénéfice net actualisé de 22,5 milliards d'€) et largement rentable pour les VP et VUL (200 000 années de vie sauvées par an pour un bénéfice net actualisé de 9,5 milliards d'€). Les résultats obtenus sont robustes aux tests de sensibilité (en particulier au taux d'actualisation et à la valeur de la vie humaine).

Si instaurer l'obligation de FAP sur les véhicules neufs est donc souhaitable pour la collectivité, les coûts que cette mesure engendre pour les consommateurs de gazole (prix du filtre, surconsommation –légère- de carburant, etc.) pourraient justifier le versement d'une aide. Cette dernière ne doit pas perturber l'application du principe pollueur-payeur lors de l'achat de carburant (principe qui justifierait une hausse des taxes sur le gazole, que les FAP soient installés ou non). On pourrait donc subventionner l'installation des FAP et, parallèlement, augmenter les taxes sur le gazole pour assurer la rentabilité budgétaire pour l'Etat.

Ce document n'engage que son auteur et non les institutions auxquels il appartient. L'objet de cette diffusion est de stimuler le débat et d'appeler des commentaires et des critiques.

Table des matières

1. LES FILTRES A PARTICULES (FAP)	5
2. LE COUT LIE A LA MISE EN PLACE DES FAP	6
2.1. Données utilisées.....	6
2.2. Flux annuel de dépenses par véhicule.....	7
2.3. Flux annuel total de dépenses.....	7
3. LES BENEFICES LIES A LA MISE EN PLACE DES FAP	10
3.1. Efficacité des FAP pour réduire la pollution.....	10
3.2. Impacts sanitaires de la mise en place des FAP.....	12
3.3. Quantification monétaire des bénéfices.....	16
3.3.1. Cas où tous les véhicules se trouvent équipés de FAP.....	16
3.3.2. Cas où les FAP sont installés progressivement sur les véhicules neufs.....	17
4. COMPARAISON DES COUTS ET BENEFICES	19
4.1. Flux net de bénéfices annuel.....	19
4.2. Valeur Actualisée Nette (VAN).....	21
5. CONCLUSION	23
ANNEXES	25
1. Description du fonctionnement du filtre à particules.....	25
2. Les outils de l'analyse coûts/bénéfices.....	26
2.1. Le taux d'actualisation.....	26
2.2. Les intervalles de confiance.....	27
2.3. Quelle valeur pour la vie humaine ?.....	28
3. Tableaux et résultats.....	30
3.1. Estimation de la diminution du taux annuel de mortalité.....	30
3.2. Bénéfices (en équivalent monétaire) pour les camions et les bus.....	30
4. Données sources.....	32
4.1. Table de mortalité française.....	32
4.2. Population française par tranche d'âge.....	33
4.3. Modélisation des parcs futur et actuel des véhicules diesels.....	34

Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : Données permettant de calculer les divers coûts induits par la mise en place de FAP selon les véhicules concernés.</i>	6
<i>Tableau 2 : Flux de dépenses pour un véhicule du fait de la mise en place d'un FAP. L'intervalle de confiance pour S a été obtenu par des simulations de Monte-Carlo (voir annexe).</i>	7
<i>Tableau 3 : Part du transport dans les émissions de particules en milieu urbain</i>	11
<i>Tableau 4 : Diminution absolue de la concentration selon le type de particules et de véhicules.</i>	11
<i>Tableau 5 : Augmentation du taux de mortalité annuel induite par un accroissement de 1 µg/m³ de la concentration dans l'air en PM10 ou PM2,5.</i>	13
<i>Tableau 6 : Années de vie perdues par les personnes décédées prématurément en raison de la pollution atmosphérique liée aux particules PM2,5 et PM10.</i>	14
<i>Tableau 7 : Nombre d'années de vie sauvées</i>	16
<i>Tableau 8 : Bénéfice sanitaire en régime permanent</i>	17
<i>Tableau 9 : Bénéfices nets actualisés en millions d'€.</i>	21
<i>Tableau 10 : coûts des externalités et coûts de mise en place des FAP</i>	24
<i>Tableau 11 : Evaluation de la vie humaine en millions d'€.</i>	28
<i>Tableau 12 : Valorisation de l'année de vie humaine en milliers d'€ en fonction du taux d'actualisation pour une valeur de la vie humaine de 3 M€.</i>	29
<i>Tableau 13 : Estimation de la diminution du taux de mortalité annuel dans le cas où l'ensemble du parc de véhicules est équipé de FAP.</i>	30
<i>Tableau 14 : Table de mortalité de la population française (source INSEE, évalué sur la base du recensement 1999).</i>	32
<i>Tableau 15 : Population française par âge en 1999 (source : recensement INSEE)</i>	33

1. LES FILTRES A PARTICULES (FAP)

Un des défauts majeurs des véhicules équipés d'un moteur diesel¹ est l'émission très importante de particules fines nuisant à l'environnement et à la santé. En effet, ces particules sont potentiellement allergiques et cancérigènes. Pour limiter cette pollution atmosphérique locale, aux nuisances particulièrement importantes en milieu urbain, les constructeurs automobiles (et en particulier Peugeot) ont cherché à développer de nouvelles technologies pour réduire les émissions de particules.

Jusqu'à une date récente, la mise en place de filtres pour empêcher le rejet des particules dans l'atmosphère se heurtait à des problèmes techniques, en particulier l'encrassement rapide des filtres entraînant rapidement un dysfonctionnement². Grâce à d'importants progrès (utilisation d'additifs pour faciliter la combustion à « basse température »), ce défaut est désormais levé et les filtres sont maintenant au point techniquement pour une large gamme de véhicules : bus, camions, voitures³.

La mise en place de FAP réduit de 90 % les émissions des véhicules et permettrait de diminuer la pollution atmosphérique en milieu urbain, et donc d'améliorer l'état de santé de la population et de dégager des bénéfices environnementaux (en particulier, un noircissement moins rapide des façades des habitations et des monuments historiques, diminuant la fréquence de ravalement des façades).

Avant d'instaurer une telle mesure, il convient de s'assurer que celle-ci aura des effets positifs supérieurs aux coûts qu'elle engendre pour la collectivité française. Comme les véhicules potentiellement concernés ont des caractéristiques très différentes, la pertinence de la mise en place de FAP sera étudiée avec une analyse coût-bénéfice distinguant chaque classe de véhicule d'où trois scénarios indépendants, compatibles et combinables entre eux :

- I. Mise en place de FAP sur les voitures particulières (VP) et les véhicules utilitaires légers (VUL) diesels ;
- II. Mise en place de FAP sur les camions ;
- III. Mise en place de FAP sur les bus⁴.

Dans chaque scénario, seuls les véhicules neufs se voient équipés de FAP. La mise en place de FAP sur l'ensemble du parc actuel de véhicules diesels, extrêmement difficile techniquement, représenterait un coût considérable. En outre, en terme de logistique, le rappel de ces 15 millions de véhicules paraît irréaliste.

Lors de cette étude, la solution technique retenue pour les FAP est celle du constructeur automobile Peugeot (voir annexe 1), qui semble la plus performante. Installé en sortie de moteur, le filtre s'encrasse au fur et à mesure de son fonctionnement normal. Un additif projeté sur le filtre permet de désencrasser celui-ci⁵. Outre les frais directs d'installation et de maintenance, la mise en place d'un filtre entraîne une légère surpression dans le moteur et conduit donc à une légère surconsommation de carburant.

¹ Les moteurs à essence n'émettent pratiquement pas de particules.

² La température en sortie du moteur étant trop faible pour permettre la combustion des particules filtrées, ce qui aurait permis de nettoyer les filtres.

³ Les FAP sont aujourd'hui disponibles sur la quasi-totalité (et prochainement la totalité) de la gamme des voitures particulières.

⁴ Le terme bus désigne ici à la fois les bus et les cars.

⁵ Pour fonctionner convenablement, les filtres doivent subir des révisions chez un garagiste périodiquement. En fait il s'agit principalement de l'ajout d'un additif (à base de cérine) et de main d'œuvre. Pour un plein de 60 litres, le système injectera 37,5 ml de solution contenant 1,9 g de cérine. Le réservoir d'additif, d'une capacité de 5 litres, assure une autonomie de 80 000 km.

2. LE COUT LIE A LA MISE EN PLACE DES FAP

L'ensemble des coûts induits par la mise en place des FAP se répartit en trois catégories identiques quel que soit le scénario considéré :

1. les coûts directs liés à la fabrication et à l'installation sur les véhicules neufs des FAP ;
2. les coûts périodiques liés à la maintenance des filtres (rechargement de la réserve d'additif) ;
3. les coûts indirects liés à des effets induits, en particulier la surconsommation de carburant.

Certains coûts seront négligés dans cette troisième catégorie, en particulier le coût de retraitement de l'additif utilisé (qui pourrait faire l'objet d'une étude plus précise)⁶.

2.1. DONNEES UTILISEES

Les données permettant de calculer les différents coûts figurent dans le tableau 1 (source principale : ADEME, à partir d'études ou de données fournies par des constructeurs automobiles pour les caractéristiques des FAP).

Catégorie de coût	Type de coût	Notation	VP et VUL	Camions et bus
1	Coût d'un FAP ⁷	F (€)	1 000	5 000
2	Distance moyenne parcourue par an ⁸	D_A (km)	19 000	46 000
	Distance parcourue avant maintenance du filtre	D_M (km)	80 000	40 000
	Coût d'une maintenance ⁹	M (€)	200	200
3	Consommation annuelle	G (l)	1 100	17 000
	Prix du carburant (gazole ¹⁰)	p (€)	0,2 ¹¹ *	0,2 ¹¹
	Surconsommation du carburant due au FAP	f (%)	+2 ¹²	+4 ¹³

Tableau 1 : Données permettant de calculer les divers coûts induits par la mise en place de FAP selon les véhicules concernés.

⁶ L'utilisation de l'additif n'entraîne pas une nouvelle pollution atmosphérique. En outre, le coût de retraitement de l'additif devrait être faible au regard des autres coûts liés au FAP.

⁷ Données ADEME. « Les filtres à particules pour les poids lourds : une solution performante », Novembre 2002. Le coût d'un filtre à particules est une donnée difficile à estimer, dans la mesure où celui-ci s'insère dans le coût total de construction d'une voiture. On peut néanmoins supposer que le coût moyen décroît avec le nombre de véhicules concernés. 1 000 € semble actuellement une estimation raisonnable mais devrait dans un futur proche diminuer (rendements croissants ou amélioration de la technologie utilisée).

⁸ Source : « Les comptes du Transport » (2001).

⁹ Le prix au litre de l'additif est environ de 25 €/l hors taxe.

¹⁰ Le prix du gazole est ici considéré HT (Hors Taxe). Les taxes, simples transferts entre agents, n'ont pas à être prises en compte dans le bilan pour la collectivité, sauf si elles traduisent un véritable coût. Tel est le cas, dans une certaine mesure, de la Taxe Intérieure sur les Produits Pétroliers qui reflète divers coûts externes (usure de la route, etc.). Mais ici, la surconsommation unitaire de carburant n'engendre qu'une externalité de pollution autre que par les particules : essentiellement la pollution atmosphérique par les NOx. Cette légère externalité représente une part faible de l'ensemble des externalités (moins de 4 % pour les VP et VUL et moins de 8 % pour les camions et bus (sources : ExternE et MINEFI-Direction de la Prévision)), et elle est négligée dans cette étude. En revanche, le surcoût subi par les transporteurs du fait de la surconsommation prendra bien évidemment en compte le prix TTC du diesel. Ce point sera détaillé par la suite (cf §5).

¹¹ Au regard de la volatilité des prix du pétrole sur les 10 dernières années, on estime que le prix du pétrole évolue entre 0,1 et 0,3 €.

¹² La surconsommation dépend du mode de conduite, on la supposera comprise entre 1 et 3 % pour les VP et VUL.

¹³ La surconsommation est plus élevée pour les camions et bus. On fait l'hypothèse que la variabilité relative de la surconsommation est comparable à celle des voitures.

2.2. FLUX ANNUEL DE DEPENSES PAR VEHICULE

Si la première catégorie de coût intervient uniquement la première année (année 0), les autres se répartissent différemment selon les années (notamment pour les frais de maintenance). Il est plus pratique de raisonner avec des équivalents constants en coût annuel. Soit donc :

- F le coût de fabrication et d'installation du filtre ;
- V le coût annuel¹⁴ équivalent à la maintenance¹⁵ ;
- S le coût annuel équivalent dû à la surconsommation de carburant.

Les coûts équivalent alors au flux de dépense suivant : $F+V+S$ l'année 0 ; $V+S$ les années suivantes (jusqu'au retrait du véhicule).

Le facteur V se calcule à partir des données du tableau 1, comme le coût de maintenance multiplié par le ratio du nombre de kilomètres parcourus sur le nombre de kilomètres à parcourir entre chaque maintenance :

$$V = M \frac{D_A}{D_M}$$

De même on calcule S à partir du coût total de la consommation annuelle de gazole hors taxe multiplié par le facteur de surconsommation et par le prix du gazole :

$$S = G.f.p$$

Le tableau 2 rappelle les résultats numériques obtenus.

Notations	VP et VUL	Camions et bus
F (€)	1 000	5 000
V (€/an)	47,5	230
S (€/an)	4,4*	136 [#]

Tableau 2 : Flux de dépenses pour un véhicule du fait de la mise en place d'un FAP. L'intervalle de confiance pour S a été obtenu par des simulations de Monte-Carlo (voir annexe).

Notes :

* : Pour les VP et VUL, S est compris entre 1,2 et 7,6 €/an

[#] : Pour les camions et bus, S est compris entre 38 et 234 €/an

2.3. FLUX ANNUEL TOTAL DE DEPENSES

Jusqu'à présent, tous les frais envisagés ne concernaient qu'un seul véhicule. Pour estimer le flux annuel de dépenses qu'engendre, pour la collectivité, l'installation de FAP sur l'ensemble des véhicules neufs, il faut modéliser le parc et son évolution. Il est nécessaire de connaître le nombre de véhicules entrants (immatriculés chaque année), qui sera supposé constant, et les taux de défaillance absolu des véhicules (les données utilisées et les hypothèses sont détaillées en annexe 4.3).

¹⁴ En fait, les maintenances des filtres ont lieu statistiquement tous les $80000/19000 = 4,2$ années. Nous négligerons l'impact de l'actualisation sur ces années du coût de la maintenance (cette hypothèse augmente très faiblement les coûts actualisés liés à la mise en place de FAP).

¹⁵ On suppose que l'automobiliste supporte de façon continue le coût de nettoyage du filtre.

Dans toute la suite, on suppose que l'installation des FAP se fait systématiquement sur tous les véhicules neufs à partir de l'année courante (année 0). L'équipement des FAP croît alors avec le renouvellement naturel du parc.

Le flux de dépense de l'année i est donné par :

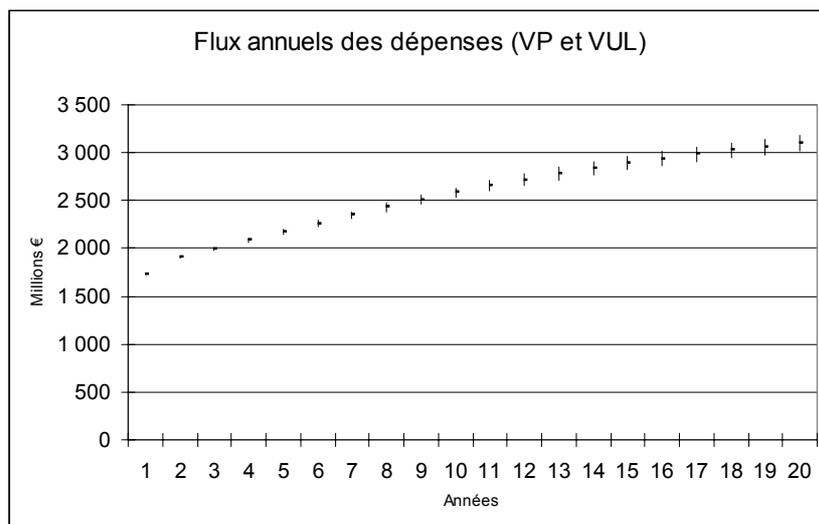
$$CP(i) = F.N + (N + S) \cdot \sum_{j=0}^i N.T_a(j)$$

où :

- N est le nombre de véhicules mis sur le marché chaque année (ici supposé constant dans le futur) ;
- $T_a(j)$ est le taux absolu de survie d'un véhicule après j années de mise en service ;
- $\sum_{j=0}^i N.T_a(j)$ représente le nombre de véhicules munis de FAP i années après le début de la mise en place de la mesure.

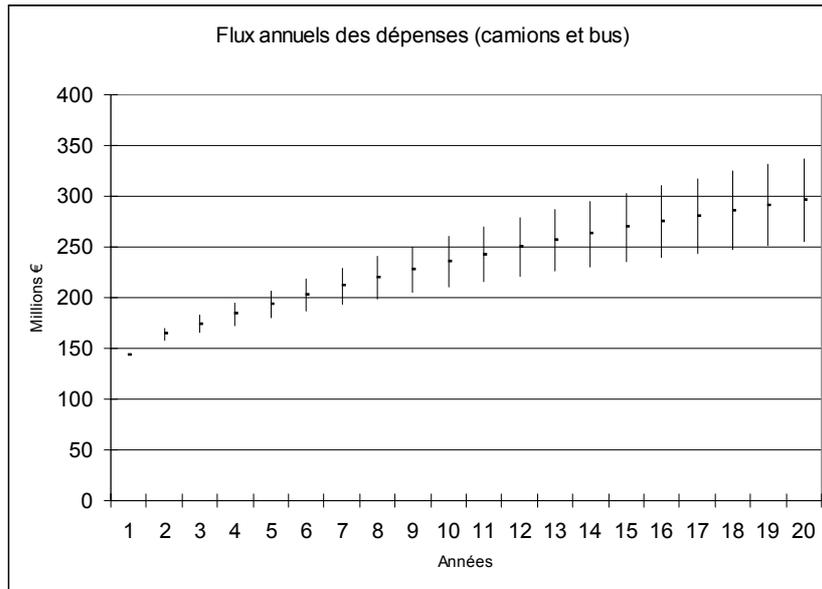
Le flux de dépense de l'année i correspond à la somme des frais d'installation des FAP sur les véhicules neufs vendus lors de la $i^{\text{ème}}$ année et aux coûts de maintenance et de surconsommation sur l'ensemble du parc de véhicules équipés de FAP à cette date.

Les flux annuels $CP(i)$ sont représentés par les graphiques 1 et 2.



Graphique 1: Flux annuels de dépense pour les véhicules diesels (voitures particulières et véhicules utilitaires légers).

Exemple de lecture : La mise en place de FAP sur tous les véhicules neufs diesels (voitures et VUL) à partir de l'année 0, engendrera des dépenses d'environ 2,96 Mds € la 15^{ème} année.



Graphique 2 : Flux annuels des dépenses pour les camions et bus.

En raison de l'incertitude liée à l'augmentation de la consommation en gazole des camions et bus équipés de FAP et au prix même du gazole, l'incertitude relative au flux de dépense sur les véhicules lourds est plus forte que sur les véhicules légers. La part des coûts à attribuer aux camions et aux bus sera estimée par leur part actuelle respective dans le parc des véhicules (c'est-à-dire 13 % pour les bus et 87 % pour les camions).

Remarques :

La suite des $CP(i)$ converge vers le flux annuel de dépense quand l'ensemble du parc de véhicules est équipé de FAP. Les hypothèses sur un nombre constant de nouvelles immatriculations et sur les taux absolus de survie, nous donnent à terme un parc de VP et VUL de 30 millions de véhicules diesels environ (à comparer aux 15 millions de VP et VUL actuellement). L'écart s'explique par l'accroissement de la durée de vie des véhicules. En régime stationnaire le coût annuel des FAP est d'environ 3 500 M€.

Malgré des coûts unitaires, pour les FAP, 5 fois supérieurs, la mesure est 10 fois plus coûteuse pour les VP et VUL que pour les camions et bus. Cela s'explique par un parc de véhicules 50 fois plus important pour les VP et VUL que pour les camions et bus.

3. LES BÉNÉFICES LIÉS À LA MISE EN PLACE DES FAP

L'analyse des bénéfices liés à la mise en place de FAP se décompose en plusieurs étapes :

1. Détermination de l'efficacité des FAP, c'est-à-dire de l'effet qu'ils peuvent avoir sur les émissions de polluants ;
2. Impacts sanitaires associés à une diminution de la concentration en polluants ;
3. Quantification monétaire des bénéfices liés à la mise en place des FAP.

Nous ne prenons pas en compte ici les bénéfices autres que sanitaires (cf. §0), ce qui minore dans les calculs les avantages induits par les FAP.

3.1. EFFICACITÉ DES FAP POUR RÉDUIRE LA POLLUTION

Les FAP permettent de diminuer les émissions de polluants de certains véhicules. Les études fournies par l'ADEME indiquent une diminution de 90 % des émissions de particules¹⁶ pour les véhicules (voitures, bus et camions). En outre, les filtres gardent leur efficacité durant toute la vie du véhicule dans la mesure où une maintenance est réalisée avec une régularité suffisante (voir partie 0).

Il semble que les FAP aient également un impact sur les émissions d'autres polluants comme le monoxyde de carbone (CO) ou les hydrocarbures (HC). En revanche, ils ont un impact négligeable sur les quantités de NOx émises.

Le secteur routier ne représente pas l'unique source d'émissions de particules. Les émissions dues aux secteurs de l'industrie et du retraitement des déchets représentent environ 50 % des particules en milieu urbain. La mise en place de FAP ne réduira donc que partiellement la concentration en particules dans l'atmosphère. La part des émissions de particules en milieu urbain qui proviennent du secteur du transport est un paramètre déterminant pour mesurer l'impact sur la pollution de l'installation de FAP.

Dans cette étude, seules seront prises en compte les réductions de pollution relatives aux particules. Il n'existe actuellement aucune méthode de référence pour mesurer les concentrations en particules PM1 qui restent donc mal connues. Les impacts sanitaires associés sont, en outre, peu étudiés. Notre estimation se limite donc aux particules PM10 et PM2,5, ce qui tend une fois de plus à minorer les avantages attendus.

Cette étude s'intéresse à l'impact de la pollution automobile sur la santé. On se limitera donc aux zones urbaines¹⁷ (agglomérations de plus de 5 000 habitants) et on négligera l'amélioration de la qualité de l'air dans les zones rurales¹⁸.

¹⁶ On distingue couramment trois catégories de particules : les PM10 qui sont les particules d'un diamètre inférieur à 10 µm et supérieur à 2,5 µm ; les PM2,5 d'un diamètre compris entre 1 et 2,5 µm, et finalement les PM1 d'un diamètre inférieur à 1,0 µm.

¹⁷ Les zones urbaines représentent 76 % de la population française.

¹⁸ Celle-ci peut-être supposée faible en raison des faibles niveaux de concentration des particules et du peu de personnes exposées.

Le Tableau 3 résume la part du transport $p_{v,t}$ ¹⁹ dans les émissions de particules, en milieu urbain²⁰.

$p_{v,t}$	PM10	PM2,5
VP et VUL	13,45 %	22,00 %
Camions	5,59 %	9,13 %
bus	2,18 %	3,56 %

Tableau 3 : Part du transport dans les émissions de particules en milieu urbain

Source : CITEPA.

Exemple de lecture : Les VP et VUL diesels représentent 22 % des émissions de PM2,5 en milieu urbain.

Les données de l'ATMO²¹ permettent de calculer approximativement la concentration moyenne en polluant en milieu urbain. On observe actuellement des concentrations C_t respectivement égales à 22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les PM10 et PM2,5.

Ces données et l'efficacité e (égale à 90 %, cf §1) des FAP, nous permet d'estimer les diminutions absolues $D_{v,t}$ de la concentration en particules de type t quand les véhicules v sont équipés de FAP :

$$D_{v,t} = e.p_{v,t}.C_t$$

Les résultats numériques sont fournis par le Tableau 4.

Diminution de la concentration en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM10	PM2,5
VP et VUL	2,66	2,97
Camions	1,11	1,23
Bus	0,43	0,48

Tableau 4 : Diminution absolue de la concentration selon le type de particules et de véhicules.

Exemple de lecture : la mise en place de FAP sur l'ensemble des VP et VUL du parc automobile entraînerait une diminution moyenne de 2,66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de la concentration en PM10 de l'air en milieu urbain.

On observe que, en pourcentage, la diminution de concentration est moyenne, elle est d'environ 20 % pour les PM10 et de 31 % pour les PM2,5.

¹⁹ L'indice v se rapporte au type de véhicule et l'indice t au type de particules considéré.

²⁰ L'estimation de la part des émissions de particules en milieu urbain mériterait une étude plus précise, il s'agit d'une donnée non mesurée au niveau national actuellement. Les données fournies ici extrapolent, au niveau national, une étude réalisée par le CITEPA dans les agglomérations de la région Pays-de-la-Loire.

²¹ Association de surveillance de la qualité de l'air.

3.2. IMPACTS SANITAIRES DE LA MISE EN PLACE DES FAP

Rappelons qu'il existe des impacts autres que sanitaires, par exemple environnementaux sur les fréquences de ravalement des bâtiments. Ils sont ici négligés.

Les émissions de particules par les véhicules entraînent des externalités négatives sur les conditions de vie de la population. En terme de santé humaine, on distingue principalement l'impact sur l'appareil respiratoire et sur l'appareil cardio-vasculaire. Les types de pathologie observés dépendent de la composition et de la taille des particules inhalées. D'un diamètre supérieur à 10 µm, les particules sont essentiellement filtrées par le nez et dégluties. Entre 2,5 et 10 µm, elles se déposent dans la trachée et les bronches. Les particules de diamètre inférieur à 2,5 µm atteignent les alvéoles pulmonaires où se font les échanges gazeux avec le sang²². Ce sont les particules les plus toxiques pour la santé.

On distinguera les effets à court terme (exposition inférieure à un an²³) et à long terme²⁴ (exposition supérieure à un an).

En utilisant des séries temporelles, il est possible avec une assez bonne précision de dégager **les effets de court terme** liés à la pollution atmosphérique. Schématiquement, plus les concentrations en particules sont importantes, plus on observe un nombre élevé d'hospitalisations et de décès (notamment d'origine cardio-respiratoire) dans les semaines qui suivent l'augmentation de concentration en polluant.

Les effets de long terme sont plus difficile à évaluer ; il est en effet nécessaire de comparer des populations soumises à des concentrations différentes de polluants mais ayant des caractéristiques proches (âge, conditions de vie, qualité de l'environnement, etc.). On utilise pour cela des méthodes économétriques, en suivant sur plusieurs années un échantillon de population. En comparant les taux de mortalité dans des agglomérations ayant des taux moyens de pollution différents, on peut estimer les risques liés à l'inhalation régulière de particules.

Dans la mesure où l'on n'a pas observé pour l'instant de seuil dans la fonction dose-réponse des particules PM10 et PM2,5, on supposera qu'un tel seuil n'existe pas. Cette hypothèse n'est probablement pas restrictive dans notre étude. En effet, les transports ne représentant qu'une part limitée des émissions de particules dans l'air (cf. §3.1), l'installation des FAP ne diminuera donc que partiellement la concentration en PM10 et PM2,5. On suppose donc uniquement que la fonction dose-réponse se comporte linéairement au voisinage du point de concentration actuel.

Le Tableau 5 résume pour les PM10 et PM2,5 les impacts estimés de la pollution. En suivant les estimations du projet ExternE de la Commission européenne, on se limitera aux impacts liés à l'accroissement de la mortalité qui représentent la majorité des coûts²⁵.

²² Voir « Environnement et Santé Publique. Fondements et pratiques », Michel Gérin, Pierre Gosselin, Sylvaine Cordier, Claude Viau, Philippe Quénel, Eric Dewailly, 2003.

²³ Les pics de pollution entrent dans la catégorie des effets liés à des expositions de court terme, ils correspondent un effet à une exposition à des concentrations plus élevées pendant une période de quelques jours ou quelques semaines.

²⁴ Il s'agit des effets chroniques de la pollution atmosphérique.

²⁵ ExternE estime que les bénéfices liés à l'allongement de la durée de vie (par réduction du niveau de pollution) représentent 90 % de l'ensemble des bénéfices. Le rapport Boiteux (Juin 2001) (« Transports : choix des investissements et coûts des nuisances ») évalue que la mortalité à long terme représente environ les trois quarts des coûts liés à la pollution atmosphérique (à partir de la méthode des pertes de bien-être).

Accroissement du taux de mortalité annuel ²⁶ par $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM10			PM2,5			
	ExterneE (1998)	Moyenne	Intervalle de confiance		Moyenne	Intervalle de confiance	
Effets de court terme	0,040 %	0,024 %	0,068 %		0,068 %	0,040 %	0,115 %
Effets de long terme	0,390 %	0,231 %	0,659 %		0,640 %	0,379 %	1,082 %

Tableau 5 : Augmentation du taux de mortalité annuel induite par un accroissement de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de la concentration dans l'air en PM10 ou PM2,5.

Exemple de lecture : une diminution de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de la concentration de PM10 dans l'air réduit le taux annuel de mortalité de 0,04 % à court terme et de 0,39 % à long terme.

En croisant la diminution de concentration en particules (cf. §3.1) et l'impact de cette diminution sur le taux de mortalité, on trouve la diminution du taux de mortalité annuel qui découlerait de la mise en place de FAP sur tous les véhicules en circulation. Le Tableau 13 en annexe donne le détail des résultats obtenus.

L'estimation du nombre d'années de vie épargnées à partir de la diminution du taux de mortalité est délicate. Ce calcul nécessite de connaître le nombre d'années qu'aurait vécues une personne si elle n'était pas décédée prématurément à cause de la pollution atmosphérique.

Deux approches sont envisageables pour évaluer cette perte de vie :

- I. On peut supposer que la surmortalité touche l'ensemble de la population uniformément c'est-à-dire que, à l'image du tabac, la pollution atmosphérique entraîne une surmortalité pour des individus ayant une espérance de vie égale à celle de la population de même âge. Par exemple, peu d'individus « jeunes » décèdent en raison de la pollution atmosphérique mais, en l'absence de celle-ci, ils auraient vécu statistiquement aussi longtemps que les autres individus du même âge.
- II. On peut supposer que les populations touchées par la pollution atmosphérique sont, toutes choses égales par ailleurs, plus fragiles en terme de santé (problèmes respiratoires chroniques, etc.), et donc que leur espérance de vie est plus faible.

Effets de court terme

Pour les effets de court terme, seule l'hypothèse II est acceptable car les pics de pollution entraînent une surmortalité qui touche des populations fragiles ou très fragiles. Dans certains cas, l'espérance de vie des populations concernées est très faible. L'approche utilisée par les séries temporelles montre néanmoins que cette espérance de vie est supérieure à 1 ou 2 semaines. L'incertitude liée au nombre d'années de vie gagnées est très grande, et oblige à choisir un intervalle de confiance large (voir Tableau 6).

Soient :

- p la part de la population française habitant en zone urbaine ($p=76\%$) ;
- m_i le taux de mortalité à l'âge i (voir en annexe Tableau 14) ;
- T_i la population âgée de i années (voir en annexe Tableau 15) ;
- $r_{v,t}$ la diminution du taux de mortalité lié aux particules de type t quand l'ensemble des véhicules de type v sont équipées de FAP ;
- a le nombre moyen d'années qu'auraient vécues les personnes décédés en raison de la pollution (supposé ici constant et égal à 0,18 années).

²⁶ Le taux annuel de mortalité se calcule comme le ratio du nombre de personnes encore en vie un an plus tard sur le nombre initial de personnes.

$r_{v,t}$	PM10		PM2,5		
	Moyenne	Intervalle de confiance		Moyenne	Intervalle de confiance
Effets de court terme ²⁷ (avec hypothèse 1)	0,18	0,01	2,81	0,18	0,01 2,81
Effets de long terme ²⁸ (avec hypothèse 2)	12,7	Non défini		12,7	Non défini

Tableau 6 : Années de vie perdues par les personnes décédées prématurément en raison de la pollution atmosphérique liée aux particules PM2,5 et PM10.

Exemple de lecture : en cas de décès lié à la pollution atmosphérique par les particules, en moyenne les effets de long terme entraînent une perte d'espérance de vie de 12,7 années.

Le nombre de personnes décédées (en milieu urbain) chaque année à cause de la pollution atmosphérique est donné par :

$$N_{v,t} = p.r_{v,t} \sum_{i=1}^{99} T_i.m_i$$

$\sum_{i=1}^{99} T_i.m_i$ s'interprète comme le nombre de décès dans la population entre 1 et 99 ans²⁹.

On en déduit le nombre d'années de vie sauvées par an si l'ensemble des véhicules étaient équipés de FAP :

$$V_{v,t} = N_{v,t}.a$$

Par exemple, dans le cas des PM10, en moyenne, 406 vies seraient sauvées chaque année, ce qui correspond à 73 années de vie (voir Tableau 7 en fin de §3.2.).

Effets de long terme

Pour les effets de long terme, les deux hypothèses sur l'espérance de vie des personnes décédées prématurément en raison de la pollution sont envisageables *a priori*. Néanmoins la deuxième hypothèse est plus crédible. Les études économétriques semblent indiquer que la surmortalité due aux particules PM10 et PM2,5 est indépendante des autres facteurs de mortalité³⁰.

Les notations sont les mêmes que dans le cas des effets de court terme, à l'exception du nombre d'années e_i qu'auraient vécues les personnes décédées prématurément à cause de la pollution, ce nombre d'années dépendant maintenant de l'âge au moment du décès.

²⁷ Donnée fournie par le projet ExternE. L'intervalle de confiance est très large car on dispose de très peu d'informations sur l'espérance de vie des personnes décédées.

²⁸ 12,7 années correspond à la moyenne des espérances de vie (sur la population actuelle) pondérée par le nombre de personnes décédées en raison de la pollution atmosphérique.

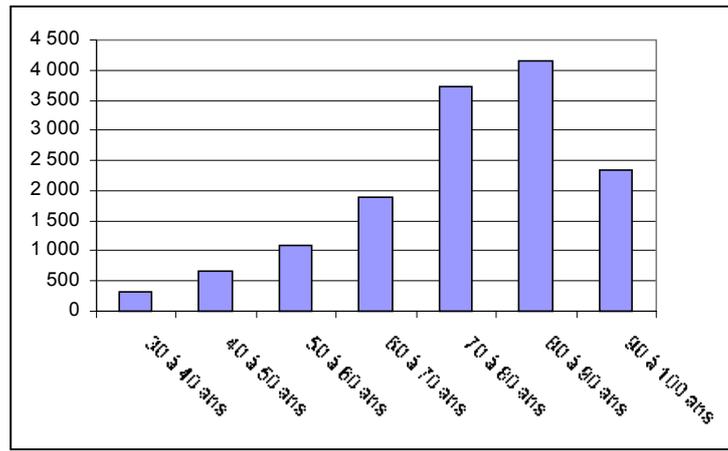
²⁹ Il est très difficile d'estimer l'impact des particules sur les enfants et adolescents. Ils ont néanmoins été maintenu dans cette étude avec les mêmes hypothèses que pour le reste de la population. On peut cependant noter que les décès avant l'âge de 30 ans ne représentent dans cette étude que 10 % des vies sauvées et moins de 5 % des bénéficiaires. Ils ne sont donc pas déterminants dans les résultats.

³⁰ Voir « Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide », report on a WHO Working Group, 13-15 January 2003.

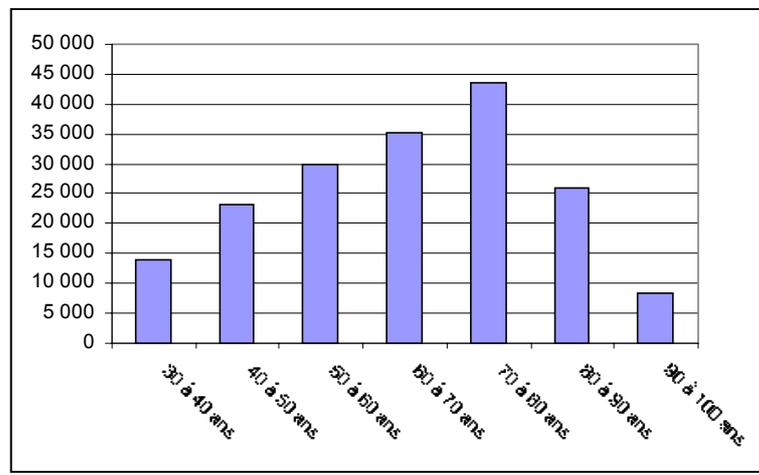
Le nombre d'années de vie sauvées par an si l'ensemble des véhicules de type t étaient équipés de FAP est donné selon la catégorie v de particules par ($r_{v,t}$ est maintenant donné par le tableau 6, hypothèse 2) :

$$N_{v,t} = p.r_{v,t} \cdot \sum_{i=1}^{99} e_i.T_i.m_i$$

Remarque : A titre d'illustration, le graphique 3 montre le nombre de décès évités par an grâce à la diminution de la pollution chronique. Le graphique 4 donne les années de vie épargnées pour chaque tranche d'âge.



Graphique 3 : Nombre de vies épargnées par tranche d'âge et par an si tous les VP et VUL étaient équipés de FAP (impact de la réduction des niveaux de PM10 et PM2,5 à long terme).



Graphique 4 : Nombre d'années de vie épargnées chaque année par tranche d'âge si tous les VP et VUL sont équipés de FAP (impact de la réduction de niveaux de PM10 et PM2,5 à long terme).

Finalement, le tableau 7 résume l'ensemble des années de vie sauvées pour chacun des projets envisagés en distinguant PM2,5 et PM10.

Années de vie sauvées par an	PM10			PM2,5			Total
	Moyenne	Intervalle de confiance		Moyenne	Intervalle de confiance		
Effets de court terme							
VP et VUL diesels	73	4	1 220	137	8	2 304	210
Camions	30	2	502	57	3	958	87
Bus	12	1	194	22	1	376	34
Total	115			216			331
Effets de long terme							
VP et VUL diesels	72 375	42 840	122 250	132 420	78 365	223 811	204 795
Camions	30 023	17 763	50 781	54 890	32 530	92 854	84 913
Bus	11 703	6 966	19 783	21 385	12 678	36 222	33 088
Total	114 101			208 695			322 796

Tableau 7 : Nombre d'années de vie sauvées

Exemple de lecture : quand tous les camions sont équipés de FAP on sauve 85 000 années de vie par an (30 000 au titre des PM10 et 55 000 pour les PM2,5).

Les effets de court terme apparaissent négligeables par rapport aux effets de long terme³¹. Nous les négligerons donc dans la suite de cette étude. Seul l'impact des effets de long terme (pollution chronique) sera considéré.

3.3. QUANTIFICATION MONETAIRE DES BENEFICES

3.3.1. Cas où tous les véhicules se trouvent équipés de FAP

Pour simplifier, intéressons-nous tout d'abord au régime stationnaire, lorsque l'ensemble du parc est équipé de FAP (la phase de montée en puissance et d'équipement progressif sera étudiée au §3.3.2.). Chaque année, l'espérance de vie est accrue par la mise en place des FAP. Dans la mesure où les années épargnées s'étalent dans le temps, il convient d'ajouter en les actualisant la valeur attribuée à chacune. Par exemple, si l'on suppose qu'une personne qui serait décédée en raison de la pollution va vivre 5 années supplémentaires grâce aux FAP, la première de ces années a, en équivalent monétaire, plus de valeur que la cinquième (voir annexe sur l'actualisation). Le taux d'actualisation utilisé pour ce calcul est bien entendu compatible avec celui utilisé pour valoriser l'année de vie à partir de la valeur de la vie humaine (voir annexe sur le calcul de la valeur de l'année de vie humaine), c'est-à-dire 3 % dans le cas présent³².

En notant δ le taux d'actualisation de l'année de vie humaine et c la valeur de cette même année, on a l'équivalent monétaire des années de vie sauvées par an qui est donné par :

$$N_{v,t} = p.r_{v,t} \cdot \sum_{i=1}^{99} \left(T_i \cdot m_i \cdot \sum_{j=1}^{e_i} \frac{c}{(1+\delta)^j} \right)$$

³¹ L'impact à court terme sur la mortalité est comparable à celui à long terme mais l'espérance de vie des personnes décédées est supposée 100 fois plus faible (quelques mois *versus* plus de 10 ans).

³² En fait, les résultats globaux apparaissent peu sensibles au choix du taux d'actualisation de l'année de vie humaine (voir ExternE, « Methodology 1998 update », (1999)).

Le tableau 8 donne les équivalents monétaires des années de vie sauvées par an quand tous les véhicules d'une catégorie sont équipés de FAP, selon que l'on retient comme valeur de l'année de vie 150 000 ou 50 000 € (cf. annexe).

Bénéfice sanitaire en régime permanent (en M€)	PM10			PM2,5			Total
	Moyenne	Intervalle de confiance		Moyenne	Intervalle de confiance		
<i>Valeur d'une année de vie humaine 150 000 € (ExternE)</i>							
VP et VUL diesels	7 921	4 688	13 380	14 493	8 577	24 495	22 414
Camions	3 285	1 944	5 557	6 007	3 560	10 162	9 292
Bus	1 280	762	2 165	2 340	1 387	3 964	3 620
Total	12 486			22 840			35 326
<i>Valeur d'une année de vie humaine 50 000 €</i>							
VP et VUL diesels	2 640	1 562	4 460	4 831	2 859	8 165	7 471
Camions	1 095	648	1 852	2 002	1 186	3387	3 097
Bus	426	254	721	780	462	1 321	1 206
Total	4 161			7 613			11 774

Tableau 8 : Bénéfice sanitaire en régime permanent

Exemple de lecture : 4 831 M€ sont économisés par la collectivité chaque année grâce à la diminution de la concentration en PM2,5 obtenue quand tous les VP et VUL sont munis de FA, si la valeur d'une année de vie humaine vaut 50 000 €.

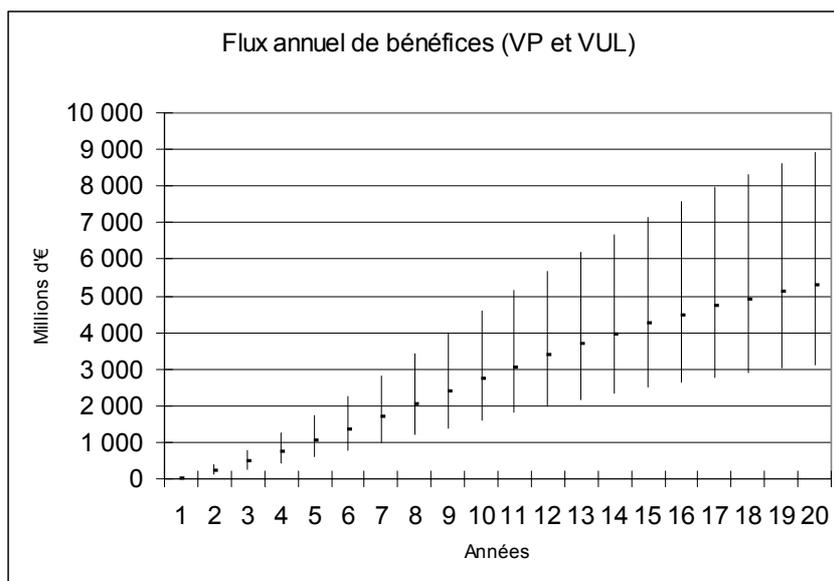
3.3.2. Cas où les FAP sont installés progressivement sur les véhicules neufs

Examinons maintenant comment la mise en place progressive de la mesure influence les bénéfices. Le nombre de véhicules non munis de FAP décroît au cours du temps. Au début de la première année de la mesure, aucun véhicule n'est équipé de FAP. Au fur et à mesure que le parc se renouvelle avec des véhicules équipés, la concentration dans l'air des particules diminue, améliorant proportionnellement³³ la santé humaine. Le modèle décrivant la disparition progressive des véhicules non équipés de FAP est présenté en annexe.

Le graphique 5 donne, en fonction du temps, le flux annuel de bénéfices lié à la mise en place des FAP sur les VP et VUL. Le cas représenté est celui où la valeur de l'année de vie humaine est de 50 000 €.

Remarque : le bénéfice annuel converge bien évidemment vers la valeur calculée dans le tableau 8, c'est-à-dire 7 471 M€, en régime stationnaire.

³³ Cf. hypothèse de linéarité de la fonction dose-réponse.



Graphique 5 : Montant annuel des bénéfices sanitaires liés à la mise en place de FAP sur les VP et VUL neufs.

Exemple de lecture : la dixième année après le début de la mise en place des FAP sur les véhicules neufs, le bénéfice sanitaire est de 3 000 M€ pour cette année.

Les graphiques 10 et 11 en annexe donnent les bénéfices (en équivalent monétaire) pour les camions et les bus.

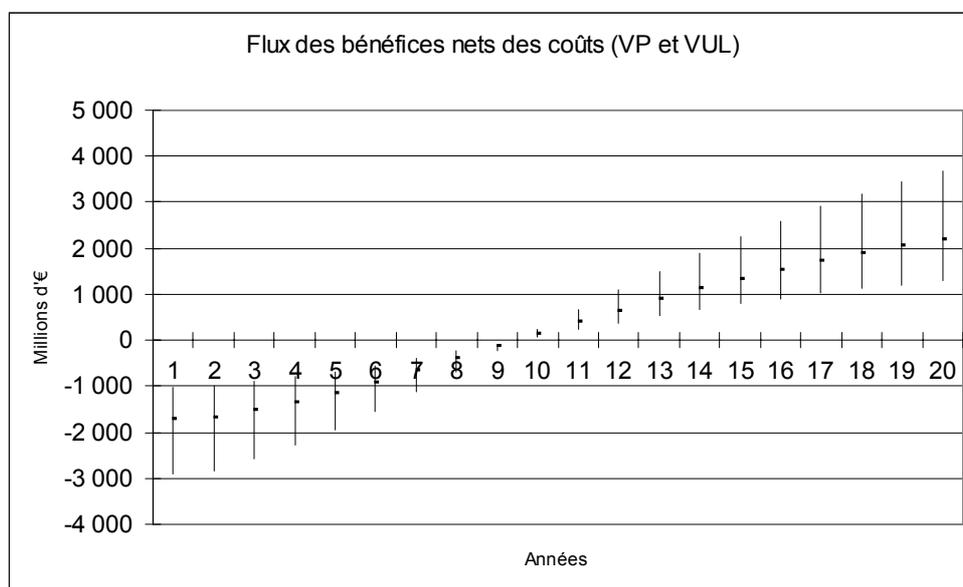
4. COMPARAISON DES COÛTS ET BÉNÉFICES

Nous allons d'abord déterminer le flux annuel des bénéfices nets des coûts (cf §4.1) année après année, puis sommer ces flux, en les actualisant, pour déterminer si l'équipement de FAP est rentable pour la collectivité.

4.1. FLUX NET DE BÉNÉFICES ANNUEL

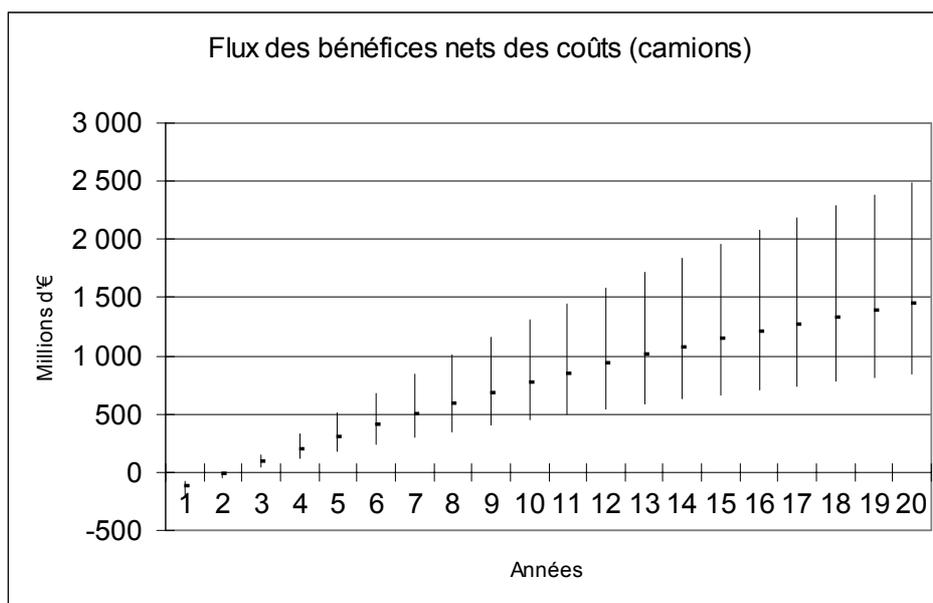
Les bénéfices sanitaires des FAP étant d'autant plus importants que le parc est largement équipé, on s'attend à ce que le flux net des bénéfices s'accroisse avec le temps. C'est effectivement ce que l'on observe pour les VP et VUL (graphique 6), pour les camions (graphique 7) et pour les bus (graphique 8).

Néanmoins, lors des premières années après le début de la mesure d'installation de FAP sur les véhicules neufs, les coûts (en particulier en raison des coûts fixes) sont supérieurs aux bénéfices (qui sont encore modestes car de nombreux véhicules « anciens » continuent de polluer).



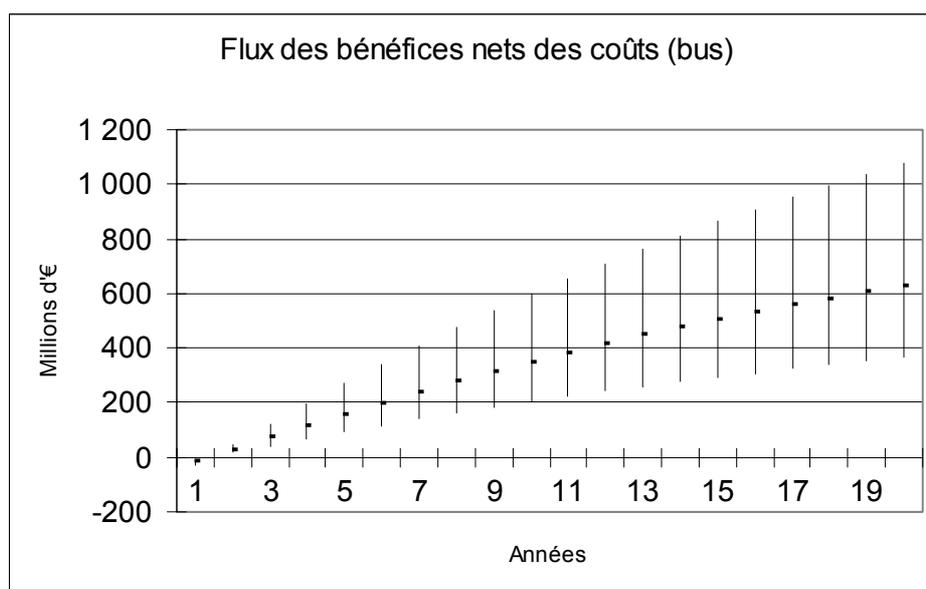
Graphique 6 : Flux annuels (bénéfices moins coûts) avec équipement des VP et VUL neufs de FAP à partir de la date 0.

Exemple de lecture : la treizième année, le bénéfice annuel est de 892 M€.



Graphique 7 : Flux annuels (bénéfices moins coûts) avec équipement des camions neufs de FAP à partir de la date 0.

Exemple de lecture : la treizième année, le bénéfice annuel est de 1 002 M€.



Graphique 8 : Flux annuels (bénéfices moins coûts) avec équipement des bus neufs de FAP à partir de la date 0.

Exemple de lecture : la dixième année, le bénéfice annuel est de 285 M€.

Alors que pour les camions et les bus, la mesure de mise en place de FAP sur les véhicules neufs dégage des bénéfices dès la troisième ou deuxième année, en raison de l'importance du nombre de VP et VUL immatriculés chaque année, il faut attendre, pour cette catégorie, la dixième année pour que le flux net de bénéfice devienne positif.

Les VP et VUL représentant néanmoins la majorité du parc de véhicules, les flux associés (de coûts et de bénéfices) sont les plus substantiels. Les coûts à court terme sont importants mais conduisent à terme à une amélioration conséquente de la santé humaine. La comparaison intertemporelle de ces bénéfices et coûts se fait par l'intermédiaire de la Valeur Actualisée Nette.

4.2. VALEUR ACTUALISEE NETTE (VAN)

Le calcul de la VAN permet (par l'intermédiaire du taux d'actualisation, voir annexe) d'agrèger les différents flux annuels et donc de calculer le bénéfice total net des mesures étudiées. Nous allons utiliser le taux officiel de 8 % et celui, plus réaliste de 4 %³⁴. Nous allons aussi déterminer pour quel taux la VAN s'annule, (ce taux est appelé taux de rentabilité interne).

Equipement progressif de FAP sur les véhicules	VAN à 8 %	VAN à 4 %	Taux de rendement interne (TRI)
VP et VUL	550	9 327	8,42 %
Camions	8 357	15 588	83,2 %
Bus	3 848	7 013	244 %
Tous véhicules	12 755	31 928	16,2 %

Tableau 9 : Bénéfices nets actualisés en millions d'€.

Dans la mesure où pour les camions et les bus, les flux nets des bénéfices sont très rapidement bénéficiaires, on observe que la VAN est positive³⁵. Pour un taux d'actualisation de 8 %, le bénéfice net est de 8,4 milliards d'€ pour les camions et de 3,7 milliards d'€ pour les bus³⁶.

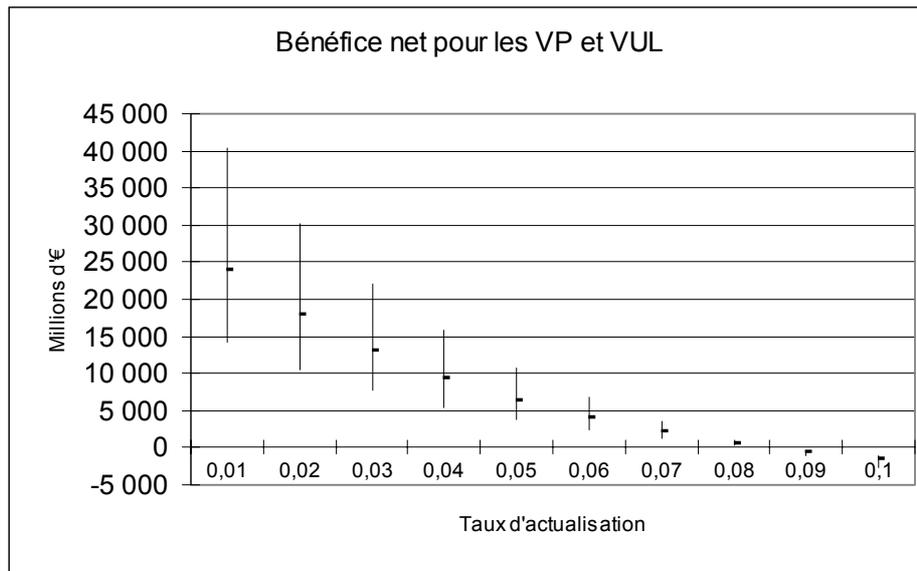
Le cas des VP et VUL est moins net. Il faut attendre la dixième année (voir §4.1) pour que les flux nets deviennent positifs. Le taux d'actualisation joue alors un rôle essentiel pour tenir compte de l'importance relative des coûts initiaux (pendant les 10 premières années) par rapport aux bénéfices à « plus long terme », (c'est-à-dire entre la dixième et la trentième année). Pour un taux d'actualisation de 8 %, on trouve un bénéfice net de 0,5 milliard d'€³⁷. Le montant des bénéfices nets réalisés est très sensible au taux d'actualisation : pour un taux de 4 %, le bénéfice est de 9,3 milliards d'€. Le graphique 9 représente en fonction du taux d'actualisation, le bénéfice net total pour les VP et VUL.

³⁴ Ce taux d'actualisation de 8 % est celui actuellement préconisé par le Commissariat Général au Plan. Il est néanmoins abondamment discuté actuellement, il semble en effet peu compatible avec les taux d'intérêt constatés sur les marchés financiers (4 % pour les émissions obligataires de l'Etat français à 10 ans) et avec les taux d'actualisation psychologique mesurés dans la population. Un taux d'actualisation des flux de 4 % est compatible avec le taux de 4 % utilisé pour relier la valeur de la vie humaine avec la valeur de l'année de vie (cf. annexe).

³⁵ Le taux de rentabilité interne, qui par définition annule la VAN, ressort à plus de 100 %.

³⁶ Les VAN calculées ne tiennent compte que des trente premières années (les bénéfices à très long terme ont été négligés).

³⁷ Le taux de rentabilité interne ressort à 8,43 %.



Graphique 9 : Bénéfice net total pour les VP et VUL en fonction du taux d'actualisation.

Remarque : Le quotient de la VAN et du montant actualisé des coûts engagés permet d'établir un indicateur de rentabilité des mesures pour déterminer celles à engager en priorité quand les moyens de financement sont limités. Dans le cas d'un taux d'actualisation de 8 %, les FAP sur les camions et les bus sont les plus rentables (le ratio vaut respectivement 29 et 9 %), la mesure s'avère peu rentable pour les VP et VUL (le ratio vaut moins de 2 %). Avec un taux d'actualisation de 4 % les résultats sont assez différents, les FAP sont les plus rentables pour les camions et les VP, VUL avec des ratios de 25 et 20 %. Pour les bus, le ratio n'est que de 8 %.

5. CONCLUSION

Cette étude montre que les bénéfices sanitaires dépassent largement les coûts liés à la mise en place de FAP sur les véhicules neufs. Il serait donc souhaitable, pour la collectivité, d'instaurer une obligation visant à équiper tous les nouveaux véhicules de FAP (prioritairement sur les camions). Toutefois, un bénéfice net pour la collectivité ne signifie pas que tous les agents économiques seront « spontanément » bénéficiaires de la mesure, ce qui peut poser des problèmes d'acceptabilité. En outre, alors que les dépenses sont couramment évaluées en €, les bénéfices sanitaires sont généralement perçus comme de nature fondamentalement différente, leur valorisation monétaire étant considérée comme abusive ou discutable (celle-ci est pourtant indispensable aux études de rentabilité).

Les coûts des FAP sont supportés par les utilisateurs de véhicules diesel, alors que les bénéfices sont attribuables à la population urbaine : ces habitants verront en effet leur espérance de vie augmenter. De plus, le caractère statistique des gains les rend moins directement appréhendables. Le risque lié à la pollution atmosphérique est probabiliste, ne touche pas tout le monde, et peut conduire une partie de la population à volontairement le minimiser ou l'ignorer, et donc à refuser de financer des mesures antipollution.

A l'inverse, les coûts de mise en place de FAP sont imputables à certains agents économiques très sensibles. Le coût des FAP sera, sans subvention ou transfert redistributif, pris en charge en partie par le constructeur et en partie par l'acheteur du véhicule (augmentation du prix du véhicule et surconsommation de carburant). Dans le cas des camions, ces coûts peuvent sembler particulièrement importants (mais ils correspondent en relatif à une hausse de 0,8 centime d'€ du litre de gazole), et pourraient rendre le projet difficile à accepter socialement.

Pour discuter la légitimité de faire porter sur les pollueurs ou sur l'ensemble de la collectivité (par des subventions) les coûts liés aux FAP, il convient tout d'abord de rappeler le principe général du pollueur-payeur qui affirme que c'est au pollueur, c'est-à-dire ici à l'utilisateur de véhicules diesels, de financer les externalités liées à la consommation de gazole. Dire que le bilan net, pour la collectivité, des FAP est positif, c'est dire que le pollueur-payeur qui installe un FAP sur son véhicule fait diminuer ses coûts (dans la mesure où l'on suppose que l'ensemble des coûts liés aux externalités ont été internalisés et sont donc directement pris en compte dans le bilan global du pollueur). Mais, en pratique, le consommateur de gazole ne paie actuellement que partiellement la pollution qu'il dégage, de telle sorte que le passage au FAP ne se traduira pas par un bénéfice pour lui. En effet, dans le cas des véhicules routiers, les externalités sont prises en compte par l'intermédiaire des taxes (principalement la Taxe Intérieure sur les Produits Pétroliers). Or, une étude de la Direction de la Prévision³⁸ montre que le niveau actuel des taxes sur le gazole est insuffisant au regard des externalités liées à ce type de carburant (voir tableau 10). Dans l'optique de l'application du principe pollueur-payeur, on constate que la charge supplémentaire liée au FAP ne fait que corriger, partiellement, la non-application du principe pollueur-payeur. Elle va donc dans le bon sens.

³⁸ « Internalisation des coûts externes de la circulation routière par la TIPP » Direction de la Prévision – MINEFI, septembre 2000. La taxation sur le gazole s'avère insuffisante pour couvrir les externalités de 26 centimes d'€ par litre pour les véhicules lourds et de 23 centimes d'€ par litre pour les VP et VUL.

	Unités	VP et VUL	Camions et bus
Coût des externalités créées par les consommateurs de gazole et non pris en charge par eux actuellement	en c€/l	23	26
	en Mds €/an	4,6	2,6
Coût de la mise en place des FAP pour les consommateurs de gazole ³⁹	en Mds €/an	de 1,9 à 3,6	de 0,14 à 0,33

Tableau 10 : coûts des externalités et coûts de mise en place des FAP

Enfin, dans la mesure où les externalités du gazole sont réduites par les FAP, il faudrait en tenir compte pour redéfinir la fiscalité optimale sur les carburants une fois tous les véhicules équipés. En attendant, pour induire de bonnes incitations, il conviendrait de ne pas faire payer aux véhicules équipés de FAP les externalités correspondant au émission de particules, ce qui peut justifier qu'ils soient subventionnés par une aide à l'installation des FAP.

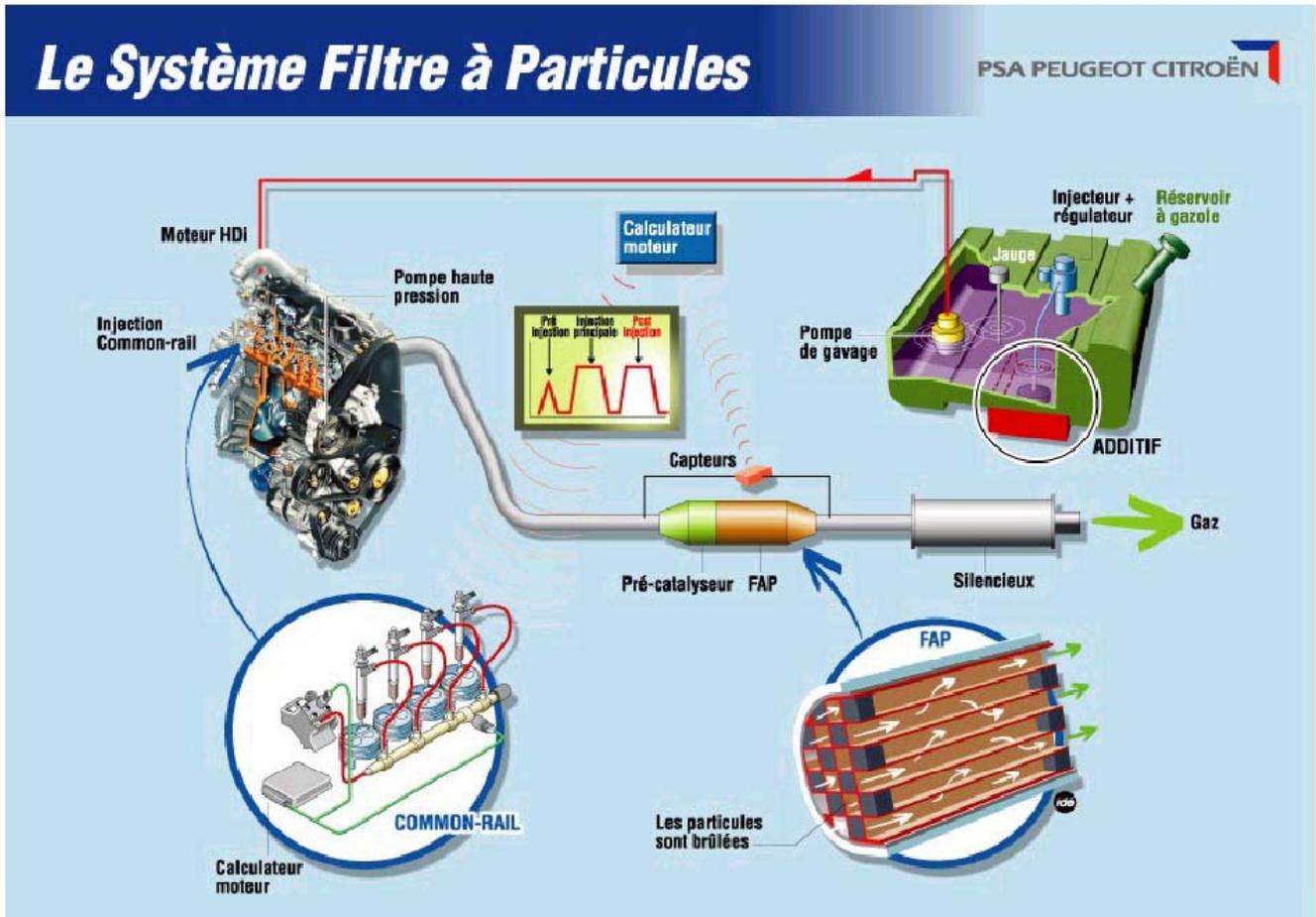
En conclusion, la mise en place progressive de FAP sur les véhicules neufs présente pour la collectivité un bilan global très positif. Les bénéfices en terme de santé humaine sont conséquents (320 000 années de vie sauvées par an) et largement supérieurs aux coûts d'installation, de maintenance ou indirects. La mesure est très rentable pour les camions et bus (120 000 années de vie sauvées par an pour un bénéfice net actualisé de 22,5 milliards €⁴⁰) et largement rentable pour les VP et VUL (200 000 années de vie sauvées par an pour un bénéfice net actualisé de 9,5 milliards d'€). Les résultats obtenus sont robustes aux tests de sensibilité (en particulier au taux d'actualisation et à la valeur de la vie humaine). L'acceptabilité de l'instauration obligatoire de FAP peut être assurée par une subvention à l'installation de FAP, et un réaménagement de la taxation des carburants dans le sens d'une meilleure application du principe pollueur-payeur. Cette dernière mesure peut être utilisée pour couvrir la charge – pour l'Etat – de l'aide à l'installation de FAP.

³⁹ Il s'agit des coûts la première et la trentième année de la mesure.

⁴⁰ Avec un taux d'actualisation de 4 % et une valeur de l'année de vie de 50 000 €.

ANNEXES

1. DESCRIPTION DU FONCTIONNEMENT DU FILTRE A PARTICULES



2. LES OUTILS DE L'ANALYSE COÛTS/BÉNÉFICES

Comment peut-on juger de l'efficacité économique d'un projet d'investissement ? Pour répondre à cette question, les économistes ont développé un certain nombre d'outils permettant de comparer les différentes alternatives envisageables. Dans le cas, par exemple d'un projet d'investissement autoroutier public, on peut chercher à évaluer son utilité en mettant en balance les avantages (les gains futurs provenant des péages) et les inconvénients (le coût de la construction et les coûts d'entretien futur). Certains de ces montants sont à payer tout de suite, d'autres dans plusieurs années ; certains sont bien connus, d'autres beaucoup plus incertains. Comment prendre en compte rationnellement ces différences ? La théorie économique, par l'intermédiaire d'outils comme le taux d'actualisation et l'intervalle de confiance apporte des réponses relativement précises à ces questions.

Dans le cas de certaines analyses coûts/bénéfices (en particulier environnementales), on peut être amené à devoir comparer des choses *a priori* peu comparables : la valeur d'une vie humaine, la valeur d'une année de vie, l'existence de sites non pollués, la biodiversité, la pollution sonore, etc. Même si cela peut sembler choquant d'un premier abord, leur quantification est une étape essentielle de la prise de décision rationnelle. Plusieurs approches ont été envisagées. Sans fournir de réponses définitives, elles permettent néanmoins d'explicitier des jeux d'hypothèses.

2.1 Le taux d'actualisation

Au-delà des problèmes liés à l'évaluation des coûts et des bénéfices, pour répondre à la question de savoir si la mesure est globalement rentable pour la collectivité, il convient d'être capable de comparer des flux monétaires à des dates différentes dans le temps.

On observe en général que les individus affichent une préférence pour le présent, c'est-à-dire qu'ils donnent plus de valeur à un bénéfice touché immédiatement qu'à ce même bénéfice touché plus tard, même en l'absence d'incertitude.

Sur les marchés financiers, là encore, on observe qu'un € disponible immédiatement a plus de valeur que ce même € accessible dans un an. Les taux d'intérêt synthétisent, en fonction de l'offre et de la demande d'épargne, la valeur future d'un € vu de maintenant⁴¹.

Le taux d'actualisation cherche, comme le fait le taux d'intérêt pour les marchés financiers, à résumer les informations relatives à la comparaison des flux à différentes dates. Bien que simplificateur, le taux d'actualisation s'avère souvent un bon outil pour ramener les valeurs intertemporelles à une échelle comparable.

Plusieurs approches sont envisageables pour attribuer une valeur crédible au taux d'actualisation (mesurer expérimentalement le taux de préférence pour le présent de la population, utiliser les données disponibles sur les marchés financiers, comparer avec le taux de rentabilité des capitaux). Le Commissariat Général au Plan retient un taux d'actualisation de 8 %. Cette valeur, établie en 1983, semble dorénavant relativement élevée au regard des taux d'intérêt observés actuellement sur les marchés financiers (moins de 4 %). Pour cette raison, des études de sensibilité sont menées avec des taux compris entre 1 et 10 %, l'idée étant qu'un taux raisonnable serait 4 %.

⁴¹ En fait, pour chaque date future, un marché s'organise entre les personnes qui souhaitent avoir de l'argent disponible immédiatement (et rembourser plus tard) et ceux qui préfèrent prêter leur argent et disposer d'une somme d'argent plus importante plus tard. A chacun de ces marchés (pour les diverses dates futures) correspond un taux d'intérêt qui équilibre les souhaits des vendeurs et des acheteurs. Le taux d'intérêt est le prix qui s'ajuste pour équilibrer offre et demande d'épargne.

2.2 Les intervalles de confiance

Lors d'une analyse coûts/bénéfices, on peut distinguer plusieurs sources d'imprécision quant aux données sous-tendant les calculs:

- La donnée est structurellement variable (par exemple la valeur du gazole), la variabilité est généralement dans ce cas probabilisable ;
- La donnée est mal connue et aucune information rationnelle ne permet d'estimer d'éventuelles probabilités à associer à différentes hypothèses (la surconsommation liée aux FAP) ;
- La donnée est connue mais peut faire l'objet de révision ou de modifications importantes dans le futur, difficiles à anticiper (le prix du FAP).

La définition d'intervalles de confiance pour les grandeurs étudiées permet de quantifier ces imprécisions.

Dans le cas d'incertitudes probabilisables, l'intervalle de confiance est défini à partir de l'écart-type⁴² (généralement mesuré à partir des données du passé). On utilise couramment deux types de lois de probabilité pour décrire la variabilité des phénomènes probabilisables :

- la loi normale où l'intervalle de confiance est un intervalle centré sur la moyenne et de longueur 4 fois l'écart-type ;
- la loi log-normale où l'intervalle de confiance est un intervalle d'extrémités la moyenne sur l'écart-type au carré et la moyenne multipliée par l'écart-type au carré.

Dans le cas d'imprécision non probabilisable, il a été choisi dans cette étude de définir un intervalle de confiance « crédible » en utilisant les quelques données disponibles (cela n'a été utilisé qu'une fois pour l'intervalle de confiance de la surconsommation due aux FAP).

Pour le cas des données connues mais qui peuvent faire l'objet de révision future importante, on ne peut définir d'intervalle de confiance mais on peut, le cas échéant, mener des études de sensibilité. L'étude de différents scénarios permet néanmoins d'analyser la sensibilité des résultats.

Le calcul des intervalles de confiance associés à la somme, au produit ou au quotient de variables aléatoires peut dans certains cas se révéler relativement complexe. On dispose classiquement de deux approches :

- Des formules explicites dans les cas simples (somme de deux variables aléatoires suivant des lois normales ou log-normales) ;
- Des méthodes de simulation dites de Monte-Carlo, dans les autres cas.

Ces deux approches ont été utilisées pour estimer les intervalles de confiance lors de cette étude.

⁴² L'écart-type EC mesure les écarts d'une variable X à sa moyenne (ou espérance mathématique) : $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$.

Il est donné par la formule suivante :

$$EC(X) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(X_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \right)^2}$$

2.3 Quelle valeur pour la vie humaine ?

Plusieurs approches sont envisagées classiquement pour estimer la valeur d'une vie humaine. L'une des approches consiste à estimer directement ou indirectement dans la population la consentement à payer/à recevoir pour une augmentation ou une diminution/augmentation du risque de mortalité. On distingue trois méthodes d'estimation du consentement à payer⁴³ :

- A. On observe combien il est nécessaire de surpayer un métier où toutes choses égales par ailleurs les risques de décès sont supérieurs ;
- B. On observe les dépenses qu'engagent volontairement les agents pour diminuer certains risques (par exemple airbag pour les voiture) ;
- C. On utilise la méthode d'évaluation contingente, où les individus sont interrogés sur leur consentement à payer/ recevoir pour diminuer/augmenter certains niveaux de risque (sur les routes avec les accidents automobiles par exemple).

Le rapport ExternE résume les résultats obtenus par ces différentes méthodes, et dont le tableau 11 présente l'essentiel.

Méthode d'évaluation	Europe		Etats-Unis	
	Min	Max	Min	Max
A : Surprime sur les salaires	3,4 M€	4,3 M€	4,2 M€	6,6 M€
B : Evaluation contingente	4,7 M€	8,3 M€	1,7 M€	3,0 M€
C : Marché	1,0 M€	3,5 M€	1,2 M€	1,3 M€
Moyenne	2,5 M€	4,4 M€	2,4 M€	3,6 M€

Tableau 11 : Evaluation de la vie humaine en millions d'€.

Exemple de lecture : en Europe, dans les études d'évaluation contingente, la vie humaine est estimée entre 4,7 et 8,3 M€.

En fait, la valeur de la vie humaine s'avère une donnée souvent inadaptée à la réalisation d'analyses coût/bénéfice. En effet, il semble illégitime de considérer que la vie de deux individus ayant des espérances de vie très différentes ont la même valeur. Comparons, par exemple, deux mesures : l'une réduisant la pollution atmosphérique et retardant le décès de 1000 personnes à l'année prochaine et l'autre, une mesure de sécurité routière évitant 1000 décès sur les routes. Même si les deux mesures permettent d'épargner 1000 vies humaines, la valeur de la seconde est supérieure à la première car l'espérance de vie des personnes épargnées par les accidents de la route était en moyenne certainement supérieure à un an. De façon caricaturale, une mesure de réduction de la pollution qui augmenterait l'espérance de vie de un jour pour 1000 personnes aurait une valeur très faible.

Le nombre d'années de vie sauvées représente un meilleur indicateur de la mesure des bénéfices. Pour l'instant, relativement peu d'études ont été réalisées pour déterminer directement la valeur d'une année de vie ou de plusieurs années de vie. On peut néanmoins en obtenir une estimation à partir de la valeur de la vie et des espérances de vie des personnes interrogées. Un calcul d'actualisation permet alors d'obtenir une valeur de l'année de vie humaine.

⁴³ Les données présentées ici sont extraites du rapport ExternE.

Les propositions du projet Externe⁴⁴ valorisent la vie humaine à 3 M€. (voir tableau 11) et choisissent un taux d'actualisation de 4 % sur 36 ans (espérance de vie moyenne) pour les années de vie. A partir de ces données, on peut chercher la valeur V^{45} de l'année de vie par la formule :

$$3 = \sum_{i=0}^{36} \frac{V}{(1 + 0.04)^i}$$

On trouve une estimation de $V=150\ 000$ € par année de vie perdue.

On peut noter que, dans le domaine médical⁴⁶, la valeur implicite de l'année de vie semble supérieure à 340 000 €. Dans le cadre des projets d'infrastructure routière, la vie est valorisée à 1 000 000 €, ce qui correspond toujours avec un taux d'actualisation de 3 %, à valoriser une année de vie à environ 50 000 €⁴⁷.

Deux valeurs ont été retenues pour la valeur de l'année de vie humaine dans cette étude : 50 000 et 150 000 € par an.

Remarque : plus le taux d'actualisation (du bien « année de vie ») est élevé pour une valeur statistique de la vie donnée, plus la valeur d'une année de vie est importante. L'hypothèse d'un taux d'actualisation à 4 % semble donc plutôt être une hypothèse conservatrice en terme de protection de la santé humaine.

Taux d'actualisation	Valeur de l'année de vie
1%	99
4%	153
6%	194
8%	237
11%	304

Tableau 12 : Valorisation de l'année de vie humaine en milliers d'€ en fonction du taux d'actualisation pour une valeur de la vie humaine de 3 M€.

⁴⁴ ExternE est un projet fondé par la DG recherche de la Commission européenne sur le thème « External costs of Energy », 1998.

⁴⁵ On suppose V constant, c'est-à-dire que la valeur de l'année de vie ne dépend pas de l'âge de la personne.

⁴⁶ Présentation de Ari Rabl, « The ExternE Project of the EU », Ecole des Mines de Paris, février 2003.

⁴⁷ Source : Commissariat Général au Plan, « Transports : choix des investissements et coût des nuisances », Marcel Boiteux, juin 2001. Plus précisément, celui-ci évalue à 1,4 M€ la valeur d'évitement d'un décès. Une hypothèse sur l'espérance de vie plus courte des personnes dont le décès est lié à la pollution conduit à réviser cette valeur à 1 M€, c'est-à-dire, actualisé à 3 %, environ 50 000 € par année de vie. On peut également noter que ce même rapport fournit comme évaluation marchande (qui ne prend en compte que les coûts matériels) une valeur de la vie de 126 000 €, soit une valeur de l'année de vie de 6 300 €.

3. TABLEAUX ET RESULTATS

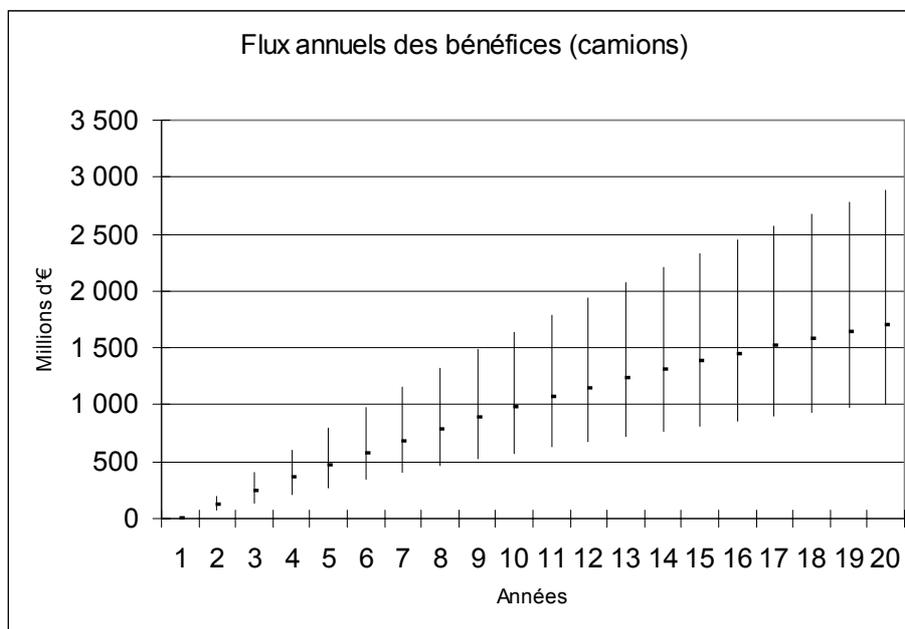
3.1. Estimation de la diminution du taux annuel de mortalité

Baisse du taux de mortalité annuel	PM10			PM2.5		
	Moyenne	Intervalle de confiance		Moyenne	Intervalle de confiance	
Effets de court terme						
VP et VUL diesels	0,107 %	0,064 %	0,181 %	0,202 %	0,119 %	0,342 %
Camions	0,044 %	0,027 %	0,075 %	0,084 %	0,049 %	0,142 %
Bus	0,017 %	0,010 %	0,029 %	0,033 %	0,019 %	0,055 %
Effets de long terme						
VP et VUL diesels	1,039 %	0,615 %	1,755 %	1,901 %	1,125 %	3,213 %
Camions	0,431 %	0,255 %	0,729 %	0,788 %	0,467 %	1,333 %
Bus	0,168 %	0,100 %	0,284 %	0,307 %	0,182 %	0,520 %

Tableau 13 : Estimation de la diminution du taux de mortalité annuel dans le cas où l'ensemble du parc de véhicules est équipé de FAP.

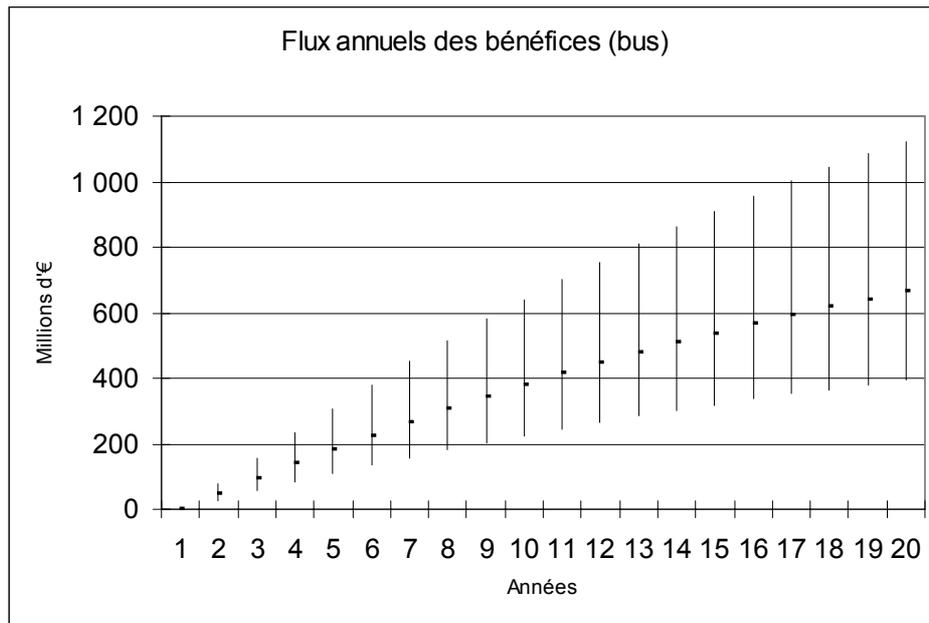
Exemple de lecture : pour les effets de court terme, si l'ensemble des VP et VUL étaient équipés de FAP, le taux de mortalité annuel diminuerait de 0,107 %.

3.2 Bénéfices (en équivalent monétaire) pour les camions et les bus



Graphique 10 : Montant annuel des bénéfices sanitaires liés à la mise en place de FAP sur les camions.

Exemple de lecture : la dixième année après la mise en place des FAP, le bénéfice sanitaire est de 1 800 M€ pour cette année.



Graphique 11 : Montant annuel des bénéfices sanitaires liés à la mise en place de FAP sur les bus.

Exemple de lecture : la dixième année après la mise en place des FAP, le bénéfice sanitaire est de 3 000 M€ pour cette année.

4. DONNEES SOURCES

4.1. Table de mortalité française

AGES	EN SEM BLE		AGES	EN SEM BLE	
	Survivants	Espérance de vie		Survivants	Espérance de vie
0	100 000	78.28	50	94 160	31.03
1	99 522	77.65	51	93 758	30.16
2	99 483	76.68	52	93 331	29.30
3	99 457	75.70	53	92 871	28.44
4	99 437	74.72	54	92 383	27.59
5	99 419	73.73	55	91 864	26.74
6	99 404	72.74	56	91 316	25.90
7	99 390	71.75	57	90 738	25.06
8	99 376	70.76	58	90 114	24.23
9	99 362	69.77	59	89 432	23.41
10	99 348	68.78	60	88 704	22.60
11	99 335	67.79	61	87 917	21.80
12	99 322	68.80	62	87 076	21.00
13	99 306	65.81	63	86 173	20.22
14	99 288	64.82	64	85 209	19.44
15	99 265	63.84	65	84 168	18.67
16	99 233	62.86	66	83 049	17.92
17	99 195	61.88	67	81 856	17.17
18	99 148	60.81	68	80 581	16.44
19	99 084	59.95	69	79 219	15.71
20	99 015	58.99	70	77 761	14.99
21	98 943	58.04	71	76 181	14.30
22	98 865	57.08	72	74 520	13.60
23	98 783	56.13	73	72 733	12.92
24	98 703	55.17	74	70 843	12.26
25	98 622	54.22	75	68 841	11.60
26	98 543	53.26	76	66 676	10.96
27	98 460	52.30	77	64 378	10.33
28	98 374	51.35	78	61 914	9.72
29	98 287	50.40	79	59 259	9.14
30	98 196	49.44	80	56 463	8.56
31	98 098	48.49	81	53 443	8.02
32	97 996	47.54	82	50 261	7.50
33	97 892	46.59	83	46 898	7.00
34	97 780	45.64	84	43 363	6.53
35	97 661	44.70	85	39 735	6.08
36	97 531	43.76	86	36 014	5.65
37	97 392	42.82	87	32 230	5.26
38	97 244	41.88	88	28 459	4.89
39	97 082	40.95	89	24 733	4.55
40	96 911	40.02	90	21 126	4.24
41	96 723	39.10	91	17 742	3.96
42	96 516	38.18	92	14 609	3.70
43	96 291	37.27	93	11 792	3.46
44	96 045	36.37	94	9 326	3.24
45	95 787	35.46	95	7 216	3.04
46	95 505	34.57	96	5 453	2.87
47	95 201	33.67	97	4 028	2.70
48	94 878	32.79	98	2 885	2.58
49	94 534	31.90	99	1 988	2.51

Tableau 14 : Table de mortalité de la population française (source INSEE, évalué sur la base du recensement 1999).

4.2. Population française par tranche d'âge

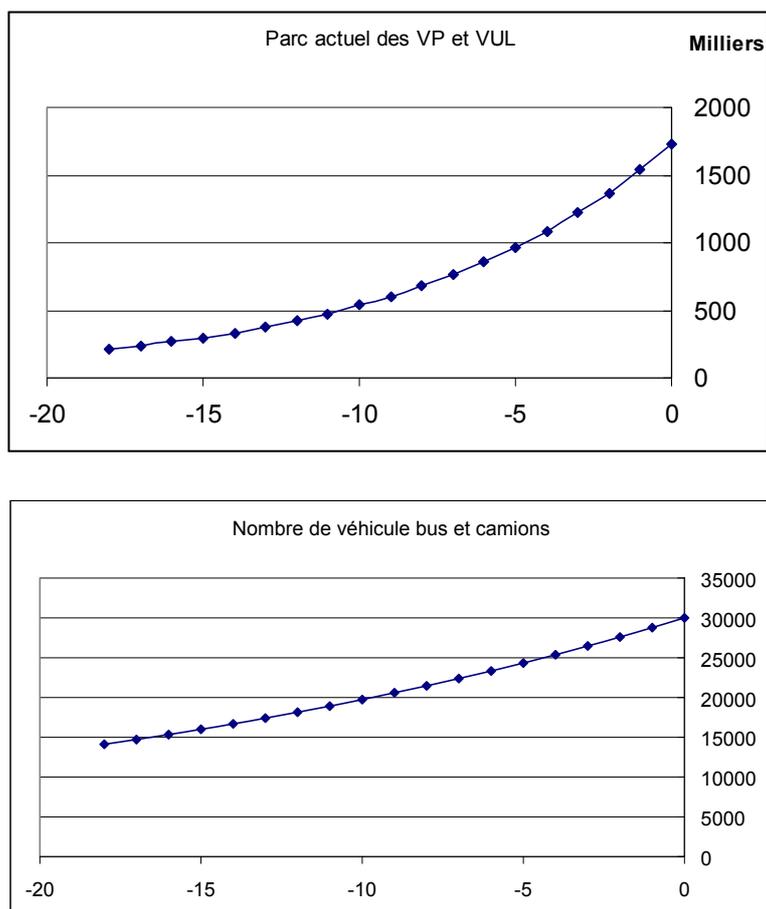
AGES	Population (en m illiers)	AGES	Population (en m illiers)
0	769	50	859
1	729	51	852
2	722	52	850
3	714	53	837
4	722	54	798
5	719	55	604
6	704	56	600
7	700	57	584
8	734	58	543
9	751	59	491
10	757	60	512
11	763	61	543
12	768	62	536
13	769	63	533
14	780	64	537
15	770	65	529
16	768	66	545
17	755	67	527
18	801	68	544
19	811	69	535
20	808	70	533
21	762	71	503
22	735	72	493
23	738	73	474
24	714	74	465
25	734	75	452
26	787	76	430
27	837	77	415
28	860	78	400
29	864	79	397
30	844	80	387
31	843	81	222
32	835	82	179
33	838	83	147
34	866	84	123
35	869	85	135
36	889	86	194
37	878	87	172
38	851	88	152
39	862	89	121
40	856	90	106
41	863	91	85
42	842	92	68
43	848	93	51
44	841	94	39
45	837	95	28
46	843	96	21
47	827	97	15
48	840	98	11
49	829	99	7

Tableau 15 : Population française par âge en 1999 (source : recensement INSEE)

4.3. Modélisation des parcs futur et actuel des véhicules diesels

Modélisation du parc actuel de véhicules diesels

A partir des données fournies par le ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, on modélise le parc actuel de véhicules à partir d'une fonction exponentielle.



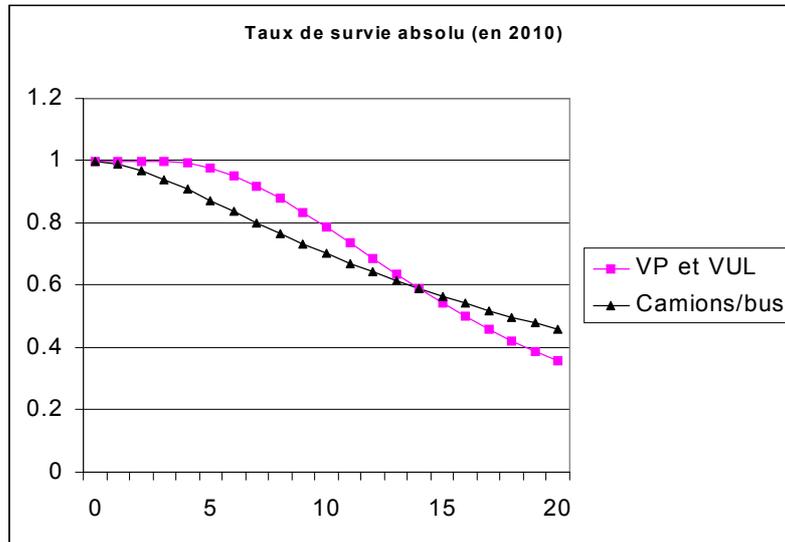
Modélisation de l'évolution du parc de véhicules avec FAP

Pour les véhicules nouveaux avec FAP, on utilisera les données de l'année 2002, où environ 1,7 million de VP et VUL au gazole et 30 000 camions/bus ont été vendus⁴⁸. En raison des difficultés à modéliser le nombre futur de véhicules diesels, on supposera que celui-ci est constant⁴⁹.

⁴⁸ Source CCFA, « Comité des Constructeurs Français d'Automobiles », <http://www.ccfa.fr/default.htm>. Le nombre de véhicules particuliers diesels achetés est en très forte augmentation ces dernières années. Il est très difficile de faire des prévisions sur les futures ventes de véhicules dans la mesure où le taux de substituabilité entre les véhicules essence et diesels est élevé, et largement dépendant de l'évolution de la fiscalité relative gazole/essence. Pour les camions et les bus, le nombre de véhicules neufs par an est en revanche assez stable dans le temps.

⁴⁹ Pour des précisions sur les prévisions des immatriculations de véhicules diesels, voir « Prévision des émissions de polluants de véhicules particuliers d'ici 2020 », Alain Sauvart, note de synthèse du SES (Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement), Juillet-Août 2001.

Pour estimer chaque année combien des véhicules munis de FAP sont en service, on utilise les taux de survie absolus des véhicules (c'est-à-dire le taux de véhicules encore en service après x années). Ceux-ci sont représentés dans le Graphique 12. On suppose que cette fonction de survie est constante dans le temps (équiper les véhicules de FAP ne change donc pas leur espérance de vie, par exemple).



Graphique 12 : Taux de survie absolu (source : Estimations fournies pour 2010 par le CITEPA⁵⁰).

Exemple de lecture : 10 ans après leur mise en service, 70 % des camions ou bus mis en œuvre en 2000 sont encore utilisés en 2010.

Le nombre de véhicules munis de FAP augmente chaque année d'une quantité fixe. Au fur et à mesure que l'on s'éloigne du début de la mise en place des FAP, le nombre de véhicules équipés augmente jusqu'à atteindre un parc d'environ 30 millions de véhicules en régime stationnaire (dans 30 ans environ). Le parc actuel est d'environ 15 millions de VP et VUL. Cette augmentation à terme du parc de véhicules provient de la conjonction d'une part d'une hypothèse de croissance nulle de la production et d'autre part d'une possibilité de conserver plus longtemps les véhicules (stabilité dans le temps de la fonction de survie).

Modélisation de la disparition des véhicules non munis de FAP

En supposant que la fonction de survie des véhicules est stable dans le temps, le nombre de véhicules encore en service et non munis de FAP i années après la première année de mise en place des filtres, se calcule comme la somme :

$$\sum_{j=1}^{20} R_{i+j} \cdot V_j$$

où R_k est le taux de survie relatif⁵¹ à l'année k , c'est-à-dire le ratio du nombre de véhicules en service à l'année k sur le nombre de véhicules en service l'année $k-1$ et V_j le nombre de véhicules âgés de j années et en service l'année 0 (première année de mise en place de la mesure).

Par exemple, entre l'année 2005 et 2006, le nombre de véhicules encore en service et immatriculés en 1990 diminue on a : $N_{2006}^{1990} = R_{15} \cdot N_{2005}^{1990}$. Pour obtenir le nombre total de véhicules encore en service non munis de FAP, on somme sur les années avant la première année de mise en place de la mesure.

⁵⁰ « Estimation des émissions de polluants du trafic routier en 2010 et 2020 », Nadine Allemand, CITEPA.

⁵¹ Le taux de survie relatif est lié au taux absolu par la formule : $R_k = \frac{T_k}{T_{k-1}}$.