



DOCUMENTS
ENVIRONNEMENT n° 148

Air

Equipement
de machines de
chantier en filtres
à particules

Analyse des coûts et
des bénéfices



Office fédéral de l'environnement,
des forêts et du paysage OFEFP

DOCUMENTS
ENVIRONNEMENT n° 148

Air

Équipement
de machines de
chantier en filtres
à particules

Analyse des coûts et
des bénéfices

Publié par l'Office fédéral
de l'environnement, des forêts
et du paysage OFEFP
Berne, 2003

Éditeur

Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP) – L'OFEFP est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC)

Site Internet de la Division protection de l'air et RNI de l'OFEFP

www.umwelt-schweiz.ch/buwal/de/fachgebiete
Thema Luft

Auteurs

Mario Keller/René Zbinden, INFRAS, Mühlemattstr. 45, 3007 Berne
Peter Straehl, Div. lutte contre la pollution de l'air et RNI, OFEFP, 3003 Berne

Citation

KELLER, M.; STRAEHL, P.; ZBINDEN, R. 2002:
Équipement de machines de chantier en filtres à particules – analyse des coûts et des bénéfices. OFEFP Documents environnement n°148, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne 52 p.

Accompagnement OFEFP

Anton Stettler, Div. lutte contre la pollution de l'air et RNI, OFEFP

Maquette

Ursula Nöthiger-Koch, 4813 Uerkheim

Crédit photographique

OFEFP/Docuphot: page de titre en haut
Priska Ketterer, photographe, Lucerne: page de titre en bas

Commande

OFEFP
Documentation
CH-3003 Berne
Fax + 41 (0) 31 324 02 16
E-Mail: docu@buwal.admin.ch
Internet: www.buwalshop.ch

Numéro de commande et prix

UM-148-F / CHF 10.– (TVA incluse)

© OFEFP 2003

Table des matières

Abstracts	5		
Avant-propos	7		
Résumé	9		
A Analyse des coûts		B Analyse des bénéfices	
1 Bases et hypothèses	13	5 Situation initiale	33
1.1 Segmentation	13	5.1 Ordonnance sur la protection de l'air	33
1.2 Modélisation du parc	13	5.2 Définitions (PM10, PM2.5, suie)	33
1.2.1 Nouvelles homologations	13		
1.2.2 Longévité	14	6 Apport de l'industrie et de l'artisanat	35
1.2.3 Evolution du parc de machines	15	6.1 Apport aux émissions de PM primaires	35
1.3 Heures de service	15		
1.4 Coefficients d'émission	16	7 Avantages écologiques	
1.5 Coûts des filtres	18	des filtres à particules	37
2 Scénarios: émissions et coûts	19	7.1 Réduction du nombre de particules et de leur surface périphérique biologiquement active	37
2.1 Définition des scénarios	19	7.2 Réduction de la masse des particules	38
2.2 Evolution des émissions 2002–2020	19	7.3 Réduction de la toxicité totale et du potentiel cancérigène des gaz d'échappement des moteurs diesel	39
2.3 Coûts des scénarios	23		
3 Efficacité des coûts	25	8 Bénéfices pour la santé	41
3.1 Comparaison des scénarios	25	8.1 Situation des immissions moyennes pondérées en fonction de la population	41
3.2 Optimisation de l'équipement	25	8.2 Effets sur la santé (maladies respiratoires et cardio-vasculaires, cancer)	42
4 Conclusion	29	8.3 Evaluation du gain de l'installation de filtres à particules sur les machines de chantier pour la santé	43
		8.4 Autres bénéfices pour la santé	43
		Annexe	45
		1 Evolution du parc de machines	45
		2 Evolution du parc en fonction des niveaux d'émission	46
		3 Evolution des émissions	47
		4 Evolution des coûts	48
		5 Coûts-avantages en fonction de l'âge (illustrations)	49
		6 Bibliographie	50

Abstracts

Benefits to public health outweigh costs from equipping construction machines with particulate traps

The risk to public health arising from carcinogenic soot particles emitted by construction machines is quantified. By equipping diesel engines from construction machines with state-of-the-art particulate traps, the emission of microscopic soot particles can be reduced by over 90%. In the present report, the additional costs arising in the building industry up to 2020 are calculated and compared with the benefit to the national economy arising from avoidance costs in the public health sector. It is shown that the savings clearly outweigh the costs.

Einsparungen bei der Gesundheit überwiegen Kosten von Partikelfiltern für Baumaschinen

Das von den Dieselermissionen der Baumaschinen ausgehende Gesundheitsrisiko für die Bevölkerung wird aufgezeigt. Mit der Nachrüstung von Baumaschinen mit Partikelfiltern kann der Ausstoß der krebserzeugenden Dieseleruss-Feinstpartikel nach dem Stand der Technik um mehr als 90% reduziert werden. Im vorliegenden Bericht werden die dadurch für die Bauwirtschaft anfallenden Gesamtkosten bis 2020 berechnet und mit dem volkswirtschaftlichen Nutzen verglichen, der durch die Vermeidung von Kosten im Gesundheitswesen entsteht. Daraus geht hervor, dass die Einsparungen bei den Gesundheitskosten deutlich überwiegen.

Bénéfice en termes de santé supérieur au coût des filtres à particules

Le risque du aux émissions de particules diesel des engins et machines de chantier sur la santé de la population est établi. Il est possible de réduire de plus de 90% les émissions de particules ultrafines de suie diesel cancérigène en équipant ces engins de filtres à particules conformes à l'état de la technique. Le présent rapport calcule les coûts totaux que cette opération générera pour l'industrie de la construction d'ici à 2020, et en compare les résultats avec les bénéfices que l'économie nationale en retirera du fait des économies réalisées sur les coûts de la santé. Il en ressort que ces économies sont nettement supérieures.

La somma risparmiata per i costi sanitari è nettamente superiore a quella necessaria per dotare le macchine e gli apparecchi edili con filtri antiparticelle.

La presente pubblicazione sottolinea il rischio per la salute della popolazione derivante dalle emissioni di fuliggine diesel emanate dai motori diesel di macchine e apparecchi edili. Secondo lo stato della tecnica, dotare le macchine e gli apparecchi edili con filtri antiparticelle consentirebbe di ridurre di oltre il 90% l'emissione di particelle di fuliggine diesel cancerogene. Nel presente rapporto vengono calcolati i costi complessivi fino al 2020 per l'edilizia derivanti dall'attuazione di tale misura. Tali costi sono poi confrontati con i vantaggi economici legati alla riduzione delle spese sanitarie. Dal paragone emerge chiaramente che la somma risparmiata per i costi sanitari è nettamente superiore a quella necessaria per attuare il provvedimento.

Avant-propos

Les chantiers, en particulier ceux de grande taille, sont d'importantes sources d'émissions de polluants atmosphériques. Parmi les plus critiques, on trouve les fines particules de poussière pouvant pénétrer dans les poumons, et, parmi celles-ci, les particules de suie des moteurs diesel. Lorsque nous inhalons ces microscopiques particules de suie, elles pénètrent profondément dans les plus fines ramifications des poumons. Là, soit elles se déposent et restent pendant des mois ou des années, soit elles entrent relativement rapidement dans le sang. Dans les deux cas, elles peuvent générer des maladies des voies respiratoires ou du système cardiovasculaire. De surcroît, la suie diesel a un grand potentiel cancérigène, raison pour laquelle elle est inscrite dans la liste des valeurs limites d'exposition au poste de travail (liste MAK) de la Suva et dans les listes correspondantes d'autres pays, ainsi que dans l'ordonnance sur la protection de l'air (OPair) à la rubrique des substances cancérigènes.

L'OPair fait obligation de réduire au minimum les émissions de substances cancérigènes. Par conséquent, il faut impérativement aligner les mesures de réduction des émissions de suie diesel sur l'état le plus avancé de la technique.

Aujourd'hui, l'apport des machines de chantier à l'ensemble des émissions de suie diesel générées en Suisse s'élève à environ 25%. Eu égard à cette proportion respectable, à l'effet cancérigène de la suie diesel et au fait que, à la différence de ce qui se passe dans le trafic routier en raison des turbulences provoquées par le déplacement d'air, les gaz d'échappement des machines travaillant sur les chantiers ne se diluent pas, ils peuvent présenter un considérable potentiel de nuisances pour le personnel des chantiers et pour la population du voisinage.

L'installation de filtres à particules sur des engins et machines de chantier permet de réduire de plus de 90% les émissions de particules cancérigènes ultrafines. Ces filtres sont le fruit d'une technologie éprouvée, et sont déjà obligatoires en Suisse et dans d'autres pays pour les machines de chantier utilisées en souterrain; dans notre pays, ils équipent déjà quelque 1'600 engins en fonction sur des chantiers à ciel ouvert.

L'équipement des engins et machines de chantier en filtres à particules occasionne des coûts et des dépenses supplémentaires pour l'industrie de la construction et, par voie de conséquence, pour les maîtres d'œuvre.

L'objet du présent rapport est de comparer ces coûts avec les bénéfices qu'en retire l'économie nationale du fait des gains ainsi réalisés sur les coûts de la santé. Dans cet optique, les auteurs ont étudié plusieurs scénarios pour déterminer les coûts totaux d'équipement cumulés jusqu'en 2020 (investissements et exploitation) et exprimer en termes pécuniaires les coûts de la santé évités grâce à ces filtres.

La comparaison des coûts montre que l'installation sur des machines de chantiers de filtres à particules efficaces correspondant à l'état de la technique génère un bénéfice indiscutable pour l'économie nationale.

Office fédéral de l'environnement,
des forêts et du paysage

Gerhard Leutert
Chef de la Division Protection de l'air et RNI

Résumé

La partie A «Analyse des coûts» du présent rapport étudie les potentiels de réduction des polluants atmosphériques que comporte l'installation de filtres sur les machines de chantiers ainsi que l'efficacité du coût de cette opération. A cet effet, on calcule les émissions de particules produites entre 2002 et 2020 par les machines de chantier, d'une part, non équipées de filtres à particules (= scénario de référence), et, d'autre part, *équipées* de tels filtres (cette voie étant subdivisée en trois scénarios). Ce chapitre détermine aussi les coûts de cet équipement. L'efficacité de ces coûts peut ensuite être évaluée sur la base du prix à payer pour éviter les émissions polluantes (exprimé en francs par tonne d'émissions de PM évitées).

Dans ce but, on a élaboré un modèle mathématique décrivant le parc des machines de chantier ainsi que les mises en et hors service; le chapitre 2 en commente les principes de base ainsi que les hypothèses concernant les coefficients d'émission et les coûts d'équipement. Le chapitre 3 présente les retombées, c'est-à-dire les émissions et les coûts des différents scénarios d'équipement considérés, et le chapitre 4 analyse la question de l'efficacité des coûts.

Les calculs montrent que les émissions totales résultant de l'installation de filtres à particules sur les machines de chantier pourront encore être abaissées de deux tiers à trois quarts au cours des 20 prochaines années. Les coûts de cet équipement oscillent en moyenne entre 60 et 85 millions de francs par an. L'efficacité des coûts, c'est-à-dire la réduction des PM par franc investi se chiffre en moyenne à quelque 163 francs par tonne d'émissions évitées et est donc relativement bonne (à noter qu'en moyenne, l'efficacité des coûts est moindre pour les petites machines que pour les gros engins).

Les coûts totaux, cumulés jusqu'en 2020, de l'équipement des machines de chantier (non comprises les machines d'une puissance inférieure à 18 kW) en filtres à particules – montage des filtres et coûts variables – s'élèvent à environ 1'360 millions de francs.

La partie B «Analyse des bénéfices» du rapport présente, au chapitre 6, l'apport de l'industrie et de l'artisanat à la pollution de l'air due aux PM10. Le chapitre 7 établit le potentiel de réduction des particules ultrafines qu'offrent les filtres à particules. Le chapitre 8 chiffre les effets des émissions de suies de diesel des machines de chantier sur la population, puis calcule les coûts de la santé qui en résultent.

De nombreuses études épidémiologiques du monde entier démontrent qu'une faible élévation de la charge de particules fines augmente sensiblement les troubles et les maladies des voies respiratoires chez les enfants et les adultes. Ainsi en est-il de l'insuffisance respiratoire, de la toux et de l'expectoration chroniques, de la bronchite aiguë ainsi que des infections des voies respiratoires. L'air pollué inhalé engendre une diminution de la fonction respiratoire, même chez les personnes en bonne santé, ainsi qu'un accroissement des consultations médicales, de la fréquentation des unités d'urgence, des hospitalisations et des décès consécutifs à des pathologies des voies respiratoires. Les maladies cardiaques prennent également une

grande place dans les conséquences à court terme d'une élévation de la charge polluante: on note une augmentation des troubles du rythme cardiaque et du risque d'infarctus du myocarde.

En règle générale, une exposition chronique de la population à des émissions accrues de particules fines affaiblit la fonction pulmonaire et peut engendrer des bronchites chroniques chez les enfants et les adultes. Des études épidémiologiques à long terme ont aussi montré qu'une exposition excessive de longue durée à des substances polluantes augmente la mortalité imputable aux pathologies des appareils respiratoire et cardio-vasculaire, provoquant ainsi un raccourcissement de l'espérance de vie.

Il est en outre particulièrement préoccupant de constater que les particules fines, à l'image de celles de suies de diesel contenues dans les gaz d'échappement des machines de chantier, présentent un grand potentiel cancérigène dans les concentrations que l'on mesure actuellement dans l'air inhalé.

La mise en place de systèmes de filtres à particules sur des machines de chantier pourrait éviter l'émission de 8'600 tonnes de particules fines de suie entre 2002 et 2020. Les effets décrits sur la santé diminueraient. Les bénéfices pour la santé publique en Suisse seraient considérables. Ainsi, serait-il possible, d'ici en 2020, d'éviter, par exemple, 1'240 décès prématurés, dont environ 170 dus au cancer des poumons. Il serait également possible d'éviter environ 1'600 cas de bronchite chronique frappant des adultes et 17'000 cas de bronchite aiguë chez les enfants. Au total, cela permettrait d'économiser, durant la période considérée, près de 4'000 millions de francs au titre des coûts de la santé.

Les analyses aboutissent à la conclusion suivante: à l'horizon 2020, l'installation de filtres à particules sur des machines de chantier devrait générer, d'une part, des coûts totaux de 1'360 millions de francs à la charge de l'industrie de la construction et, d'autre part, des économies de l'ordre de 4'000 millions de francs sur les coûts de la santé.

A Analyse des coûts

1 Bases et hypothèses

1.1 Segmentation

Les émissions des machines de chantier se calculent selon la formule suivante:

*Emission = nombre de machines * heures de service * coefficient d'émission*
(en g/h)

Les coefficients d'émission, mais aussi les heures de service varient selon le segment, c'est-à-dire selon la taille ou la puissance des machines. On a donc segmenté le parc des machines de chantier en fonction de la puissance de leurs moteurs en se référant aux travaux effectués jusqu'ici. Comparativement à OFEFP (1994), on a regroupé plusieurs catégories d'engins car, à l'époque, la différenciation portait également sur les fonctions des diverses machines de chantier.

Lorsqu'on a déterminé les propriétés des diverses classes de puissance (p.ex. les heures de service annuelles), on a toujours effectué les regroupements sur la base de 1994 afin d'établir les propriétés moyennes des segments de manière à reproduire les valeurs globales (p.ex. effectifs, émissions) de l'année 1990.

Par analogie avec la directive européenne 97/68/CE, on distingue les classes de puissance suivantes:

- <18 kW
- 18–37 kW
- 37–75 kW
- 75–130 kW
- 130–560 kW

Le nombre des machines de chantier ayant une puissance >560 kW est si faible que l'on a renoncé à créer une classe de puissance distincte; ces engins sont intégrés dans la classe 130–560 kW.

1.2 Modélisation du parc

L'effectif des machines durant la période considérée peut être simulé par les nouvelles arrivées et les retraits (engins retirés de la circulation). Par conséquent, il est nécessaire de connaître deux paramètres: les nouvelles homologations et la durée de vie des engins.

1.2.1 Nouvelles homologations

La description des nouvelles homologations se fait en quatre étapes:

- Il n'existe pas de données sur les nouvelles homologations enregistrées durant la période 1950–1981. On en a donc fait une estimation sur la base des dépenses de construction selon l'OFS et des nouvelles homologations 1981–1991. La for-

mule utilisée¹ est ajustée en son point origine, de manière à ce que l'on atteigne l'effectif de 47'300 machines en 1990 selon OFEFP (1994).

- Pour la période 1981–1991, on applique les nouvelles homologations selon OFEFP (1994), lesquelles reposent sur la statistique de vente de la VSBM (Association des fabricants et négociants suisses de machines pour entrepreneurs).
- Ces chiffres n'existent pas pour la période 1992–2000. Ils sont extrapolés sur la base de la statistique de vente d'un leader du marché (mêmes variations relatives des ventes sur la période).
- A partir de 2000, les nouvelles homologations sont données de telle sorte que l'effectif total des machines reste constant.

La ventilation des nouvelles homologations entre les différents segments se fait sur la base des chiffres de OFEFP (1994), pour autant qu'ils existent. On admet des proportions constantes pour les périodes antérieures et postérieures.

1.2.2 Longévité

Les courbes de longévité des machines de différents segments sont calculées sur la base de l'attribution des machines à des types d'usure² tels que définis dans OFEFP (1994) sur la base du calcul de la «valeur moyenne d'usure» de l'ensemble des machines d'un segment. Il en résulte les courbes de survie décrites à la Figure 1 pour les différentes classes. Ces courbes donnent une espérance de vie des machines comprise entre 10 (<18 kW) et 17 ans (>130 kW).

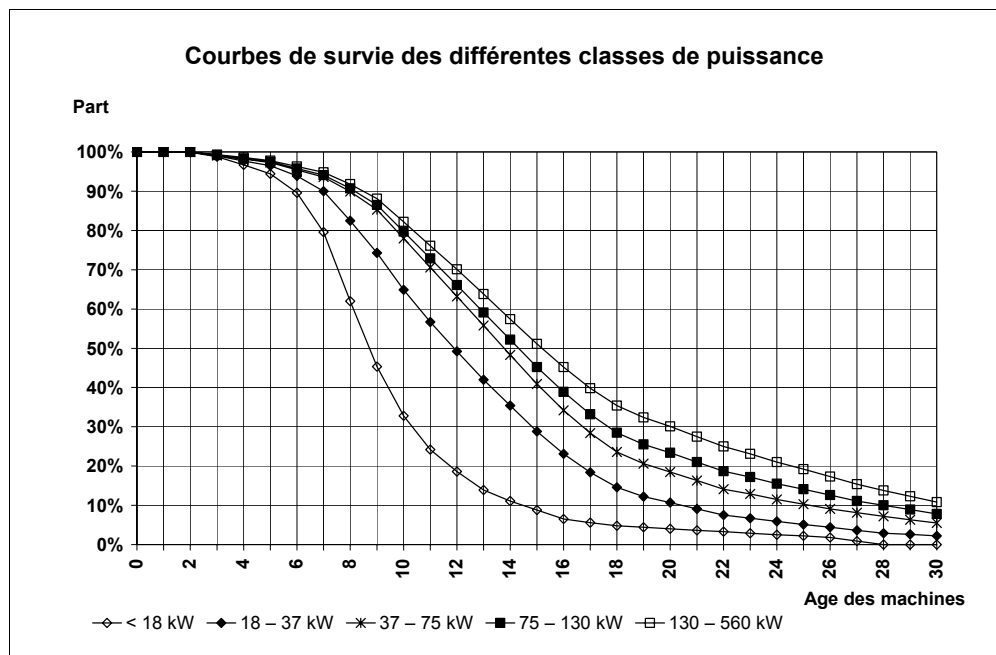


Figure 1:
Probabilités de survie des différentes classes de machines de chantier (exemple de lecture: après 12 ans, env. 20% des machines de la classe <18 kW, mais 70% de celles de la classe 130–560 kW, sont encore en service).

¹ Nouvelles homologat = $427,7 * e^{0,0262 * \text{Indice dépenses de construction}}$

² Dans OFEFP (1994), les différents segments de machines de chantier sont attribués à ce qu'on appelle des types d'usure.

1.2.3 Evolution du parc de machines

Compte tenu des données décrites ci-dessus, le parc de machines évolue de la manière suivante:

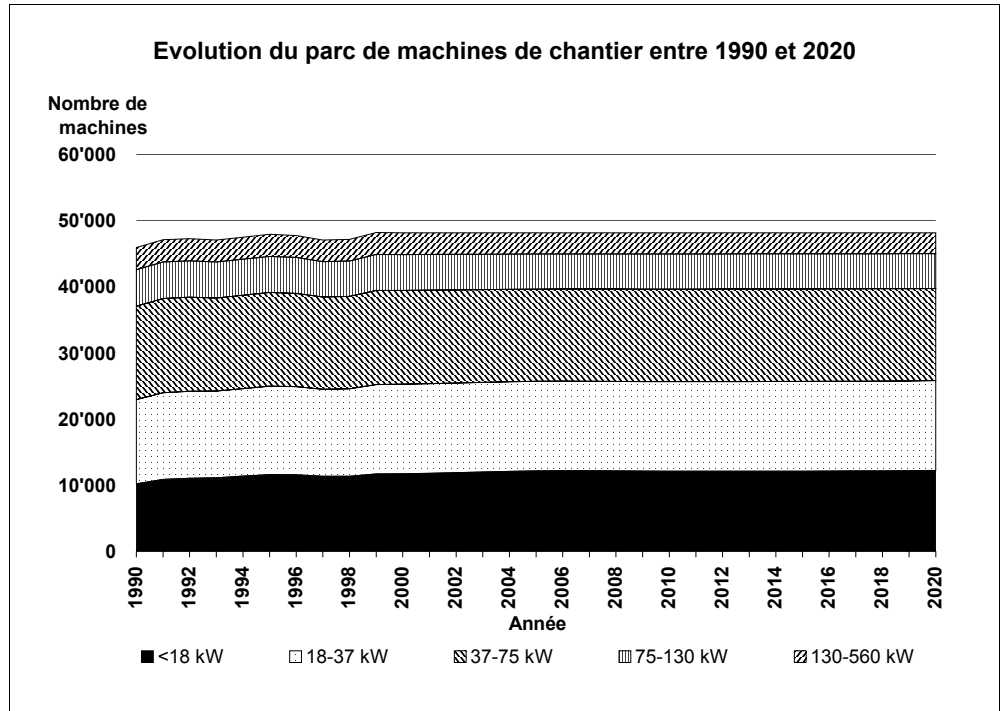


Figure 2:
Evolution résultante du parc de machines de chantier 1990–2020 par classes de puissance (voir annexe 1)

1.3 Heures de service

La durée pendant laquelle les machines de chantier sont utilisées sur une période d'un an varie en fonction de leur classe de puissance et de leur âge. Dans le modèle appliqué ici, on a cependant admis que la durée moyenne d'utilisation annuelle des machines d'une classe de puissance donnée demeure constante pendant la période considérée (2002–2020).

En moyenne, les petites machines sont utilisées moins longtemps que les grandes. De plus, la durée d'utilisation des machines décroît avec leur âge car, en cas de doute, on se sert de machines technologiquement plus modernes. Souvent, les engins très anciens jouent donc essentiellement un rôle d'ersatz.

Les valeurs qui en découlent ont été choisies en fonction de OFEFP (1994). Par conséquent, on a reproduit les durées totales d'utilisation de 1990.

Tableau 1: Durée annuelle moyenne d'utilisation des machines par classes de puissance [hs/a] pour toutes les classes d'âge [remarque: les nouvelles machines sont utilisées plus longtemps].

Durée annuelle moyenne d'utilisation des machines par classes de puissance [hs/a]					
Segment	<18 kW	18-37 kW	37-75 kW	75-130 kW	130-560 kW
Heures de service [hs/a]	195	344	400	518	623

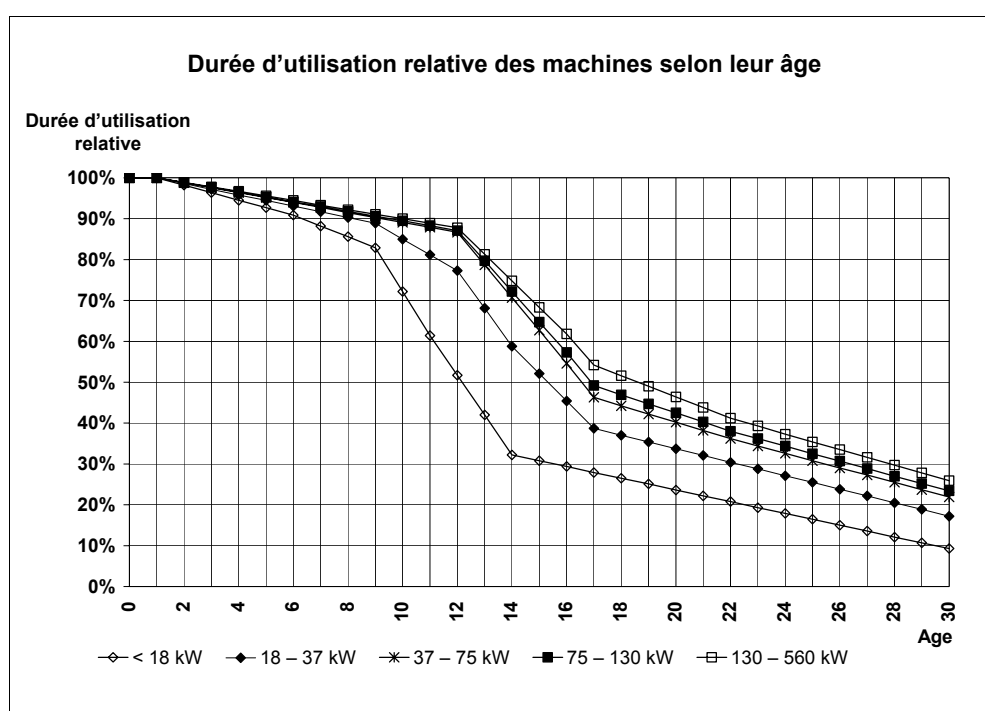


Figure 3: Variation des heures de service annuelles des machines de chantier en fonction de leur âge selon OFEFP (1994)

1.4 Coefficients d'émission

Le résultat du calcul des émissions est essentiellement influencé par les coefficients d'émission considérés. Ceux-ci sont notamment liés aux conditions définies par la législation. Il y a lieu en particulier d'observer la directive européenne 97/68/CE. En l'occurrence, on distingue deux normes d'émissions («EU1», «EU2») entrées en vigueur à des dates différentes. Les coefficients d'émission utilisés selon la directive européenne 97/68/CE sont présentés dans le tableau ci-après. La Figure 4 montre comment les deux normes mentionnées sont appliquées au parc de machines.

Les nouvelles valeurs limites découlant de la norme «EU1» réduisent les émissions de manière relativement modérée lorsqu'on admet que les machines qui y sont soumises produisent des émissions qui se situent en moyenne 10% en dessous de ces valeurs limites. En revanche, la norme «EU2» aura des effets plus perceptibles. L'introduction de filtres à particules (correspondant à «EU3») étant encore incertaine, elle n'est pas prise en considération dans le modèle proposé ici.

Dans le cas de l'équipement de machines en filtres, on admet de manière uniforme pour tous les niveaux d'émission une réduction des émissions de particules de 95% de la valeur initiale.

Tableau 2: Coefficients d'émission considérés (EF) par classe de puissance (sources: «avant EU» selon OFEFP 1994, les coefficient d'émission de EU1 et EU2 correspondent à 90% des valeurs limites [OFEFP 2000a])

Coefficients d'émission (EF)						
Classe de puissance	EF «av. EU» [g/hs]	EF EU1 [g/hs]	EF EU2 [g/hs]	Niveau EU1 comparé à «av. EU» [%]	Niveau EU2 comparé à «av. EU» [%]	Date d'entrée en vigueur (EU1 ³ /EU2)
<18 kW	20,7	-	-	-	-	-/-
18–37 kW	36,8	-	20,2	-	55%	-/2001
37–75 kW	54,3	42,1	19,8	77%	36%	2000/2003
75–130 kW	81,6	63,0	27,0	77%	33%	2000/2002
130–560 kW	123,8	121,5	45,0	98%	36%	2000/2001

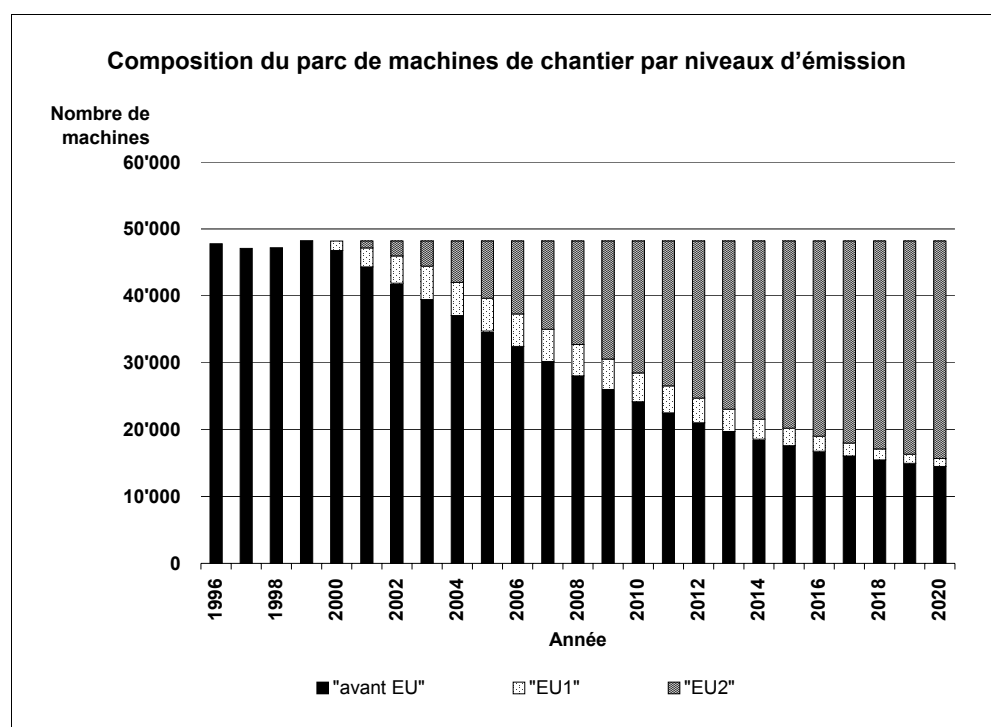


Figure 4: Les niveaux d'émission s'appliquent successivement au parc de machines (chiffres indiqués à l'annexe 2, différenciés par segments).

³ Le délai de mise en vigueur selon directive 97/68/CE du Parlement européen serait le 30.6.2000. Cependant, par souci de simplification, on attribue déjà toutes les nouvelles machines de l'année 2000 au niveau d'émission EU1.

1.5 Coûts des filtres

Les coûts d'équipement sont calculés de manière analogue aux émissions pour la période 2002–2020. Le calcul s'effectue selon la structure des coûts ci-dessous d'après TTM (2001). Les coûts variables sont ventilés uniformément sur toutes les heures de service. En d'autres termes, on ne considère pas d'augmentation brutale des coûts en cas de remplacement des filtres, mais on ventile les provisions nécessaires uniformément sur toutes les heures de service.

Tableau 3: Structure des coûts des machines de chantier selon TTM (2001)

Structure des coûts des filtres à particules des machines de chantier					
Segment (kW)	<18	18–37	37–75	75–130	130–560
Moyenne pondérée (kW)	15	28	55	100	250
Coefficient de charge (-)	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6
Prix d'achat [fr./ machine]	3150	4760	6875	9500	16250
Montage [fr./ machine]	1000	1300	1500	2000	2500
Entretien (lavage) [fr./2000 hs]	500	750	1000	1500	2000
Régénération [fr./1000 hs]	100	150	300	500	1200
Mesures de contrôle [fr./a* machine]	100	150	200	250	250
Surconsommation de carburant [%]	4	4	3	3	2
Coûts de remplacement [fr./5000 hs]	2520	3800	5500	7600	13000

La structure des coûts indiquée au Tableau 3 est convertie en coûts de rééquipement fixes (prix d'achat et installation), en coûts variables liés à l'usage (entretien, régénération, surconsommation de carburant⁴, provisions au titre du remplacement) ainsi que des coûts liés au parc (contrôles). Pour les autres calculs, on applique pour chaque classe de puissance les valeurs présentées au Tableau 4.

Tableau 4: Coût de l'équipement en filtres par machine, comme considéré dans le modèle

Coût de l'équipement en filtres par machine, comme considéré dans le modèle					
Segment (kW)	<18	18–37	37–75	75–130	130–560
Coûts fixes au montage [fr.]	4150	6060	8375	11500	18750
Coûts variables à l'usage [fr./hs]	1,01	1,59	2,29	3,47	5,62
Coûts fixes annuels [fr./a]	100	150	200	250	250

⁴ Les coûts liés à la surconsommation de carburant se calculent à partir des indications de consommation selon OFEFP (1994), ainsi que du prix moyen du diesel (1,41 fr./l) en 2000 et 2001 selon DGD.

2 Scénarios: émissions et coûts

2.1 Définition des scénarios

Les émissions de particules ainsi que les coûts de rééquipement sont calculés pour la période 2002–2020 d'après quatre scénarios. Ces scénarios se distinguent les uns des autres sur le plan de l'équipement des machines en filtres à particules, mais pas du point de vue de l'instauration et de la structure des valeurs limites appliquées aux gaz d'échappement en vertu des normes EU1 et EU2, prévues pour la période 2000–2003 suivant le segment (voir le chapitre 1.4). Les scénarios envisagés sont les suivants:

- Scénario de référence: pas de rééquipement des machines en filtres à particules
- Scénario A: «Directive Air Chantiers»⁵: équipement des machines de toutes les classes de puissance en filtres à particules selon le schéma suivant: en 2002, 20% de l'effectif de chaque classe de puissance (les machines les plus récentes), 2003, augmentation de l'équipement à 40% du parc (équipement des machines neuves plus rééquipement des anciennes machines jusqu'à ce que la proportion voulue soit atteinte), 2004 augmentation à 60% et 2005 à 80%.
- Scénario B: «Directive Air Chantiers sans les machines <18 kW»: rééquipement comme dans le scénario A «Directive Air Chantiers». Les machines de la classe de puissance <18 kW ne sont cependant pas équipées de filtres à particules.
- Scénario C: «Directive Air Chantiers sans les machines <37 kW»: rééquipement comme dans le scénario A «Directive Air Chantiers». Les machines de la classe de puissance <37 kW ne sont cependant pas équipées de filtres à particules.

2.2 Evolution des émissions 2002–2020

L'évolution des émissions induites par les différents scénarios est présentée aux figures 5–8. Les chiffres correspondants sont tirés des tableaux de l'annexe (annexe 3).

La Figure 9 présente les effets de tous les scénarios de rééquipement sur les émissions annuelles relativement au cas de référence. Jusqu'en 2005, le rééquipement provoque une réduction relative des émissions annuelles qui, suivant le scénario, atteint entre 40 et 20% du cas de référence. Dans les scénarios A: «Directive Air Chantiers» et B: «Directive Air Chantiers sans <18 kW», les parts relatives continuent à diminuer au fil de l'équipement des machines neuves; dans le scénario C: «Directive Air Chantiers sans <37 kW», la part reste ensuite plus ou moins constante car les machines de la classe de puissance 18–37 kW doivent aussi satisfaire la norme EU2 à partir de 2002.

⁵ En vertu de la Directive Air Chantiers définitive (entrée en vigueur le 1.9.2002), l'obligation d'équiper les machines de chantier de filtres à particules ne concerne que les machines en service sur les "grands chantiers" selon la définition qui en est faite au chapitre 4.2 de la directive. De plus, les machines et engins de chantier de moins de 18 kW sont exemptés de cette obligation.

Figure 5:
Evolution des émissions de particules en tonnes par an, par classes de puissance, 2002–2020, scénario de référence

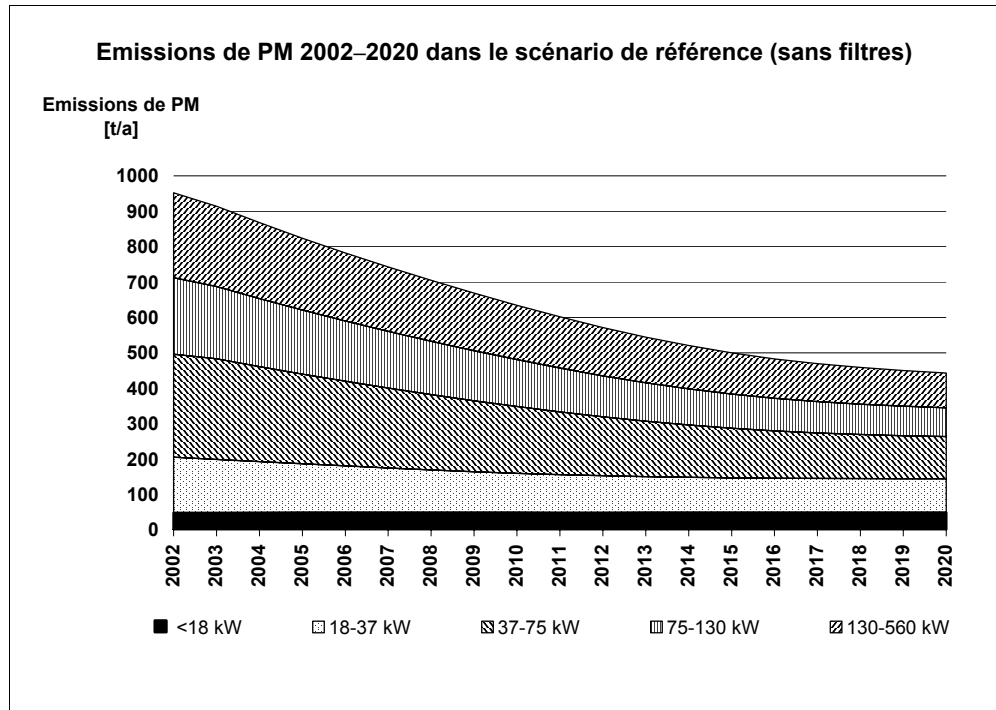


Figure 6:
Evolution des émissions de particules en tonnes par an, par classes de puissance, 2002–2020, scénario A: «Directive Air Chantiers»

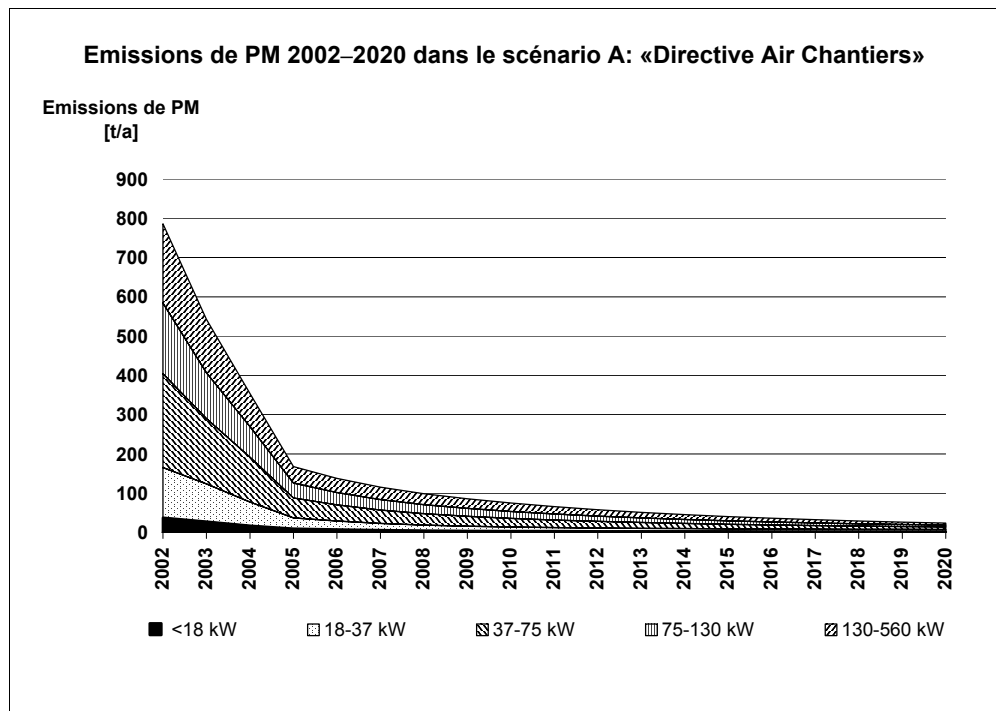


Figure 7:
Evolution des émissions de particules en tonnes par an, par classes de puissance, 2002–2020, scénario B: «Directive Air Chantiers sans pose de filtres sur les machines de chantier <18 kW»

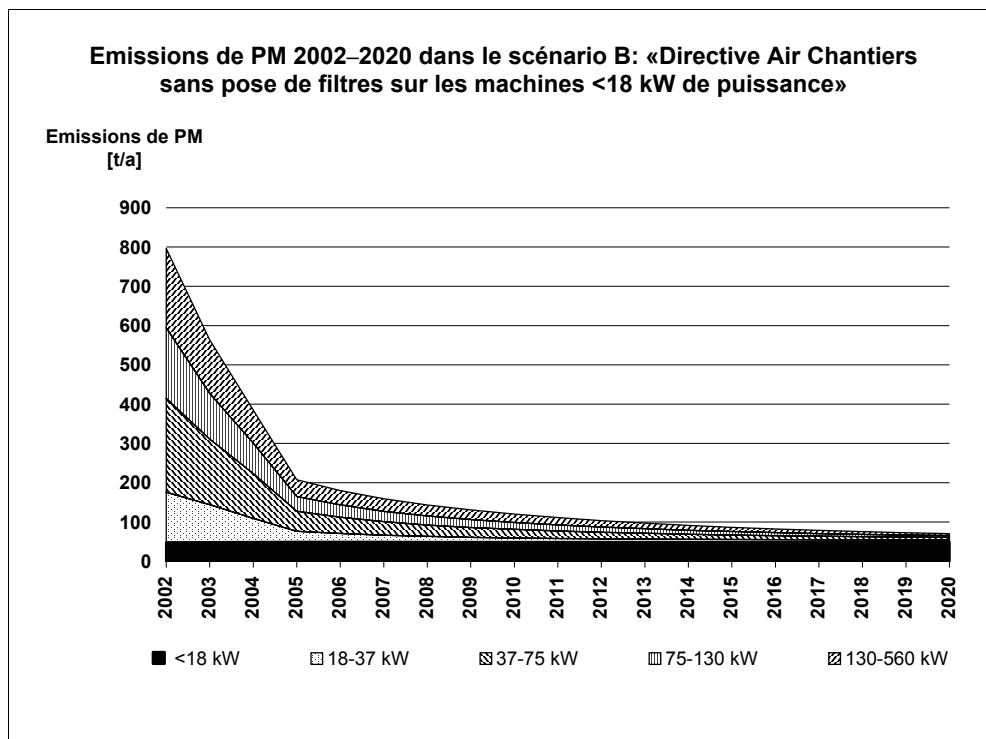


Figure 8:
Evolution des émissions de particules en tonnes par an, par classes de puissance, 2002–2020, scénario C: «Directive Air Chantiers sans pose de filtres sur les machines de chantier <37 kW»

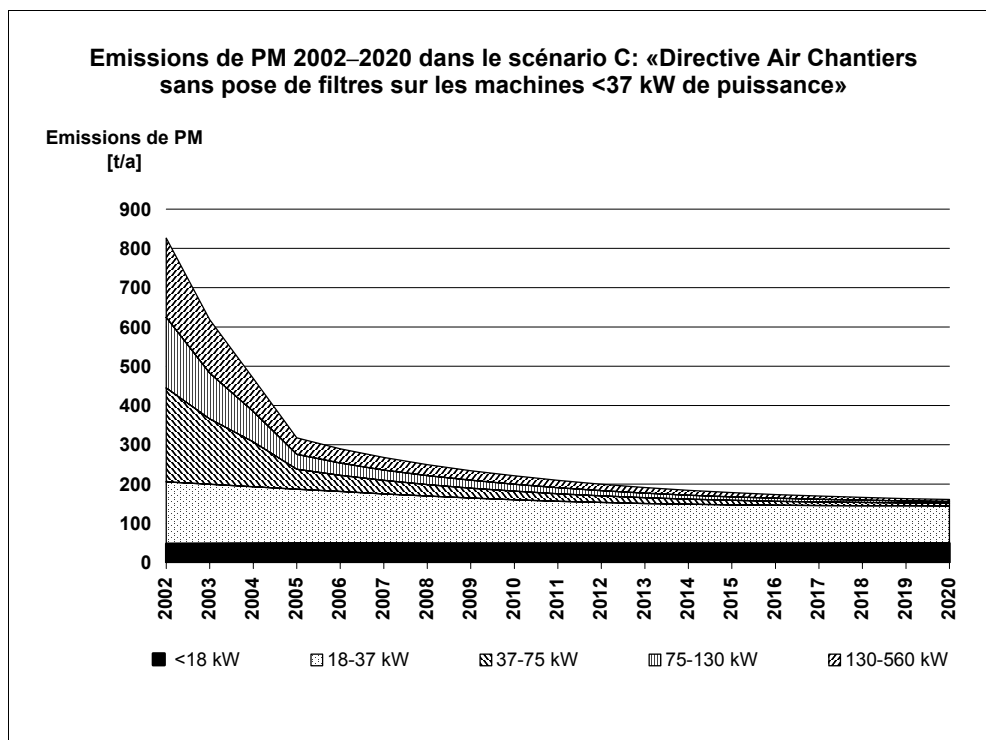
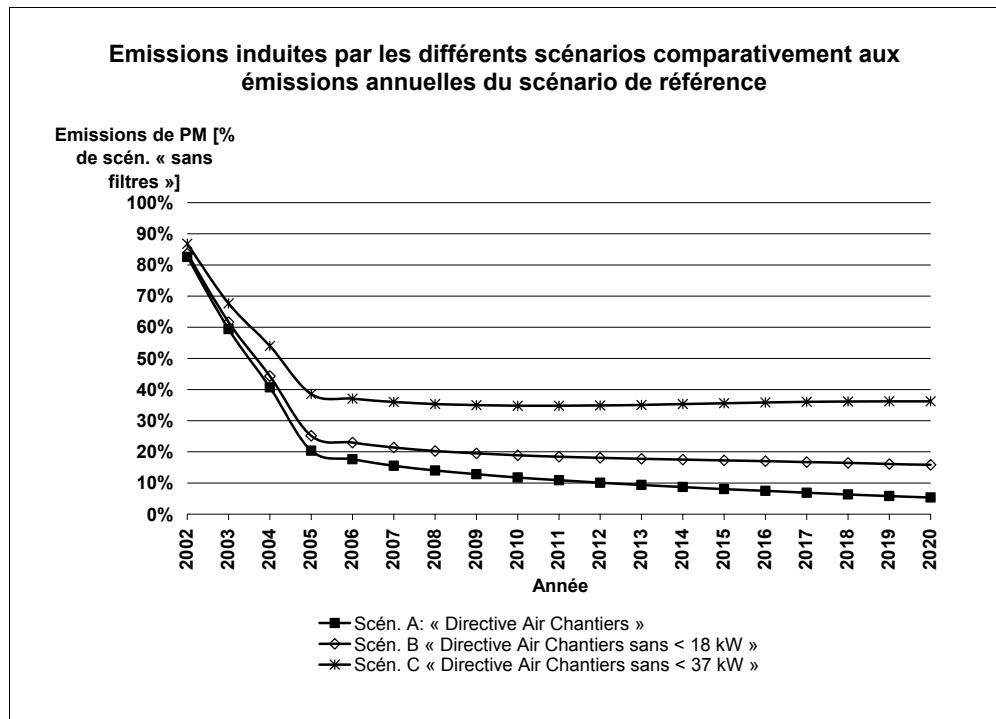
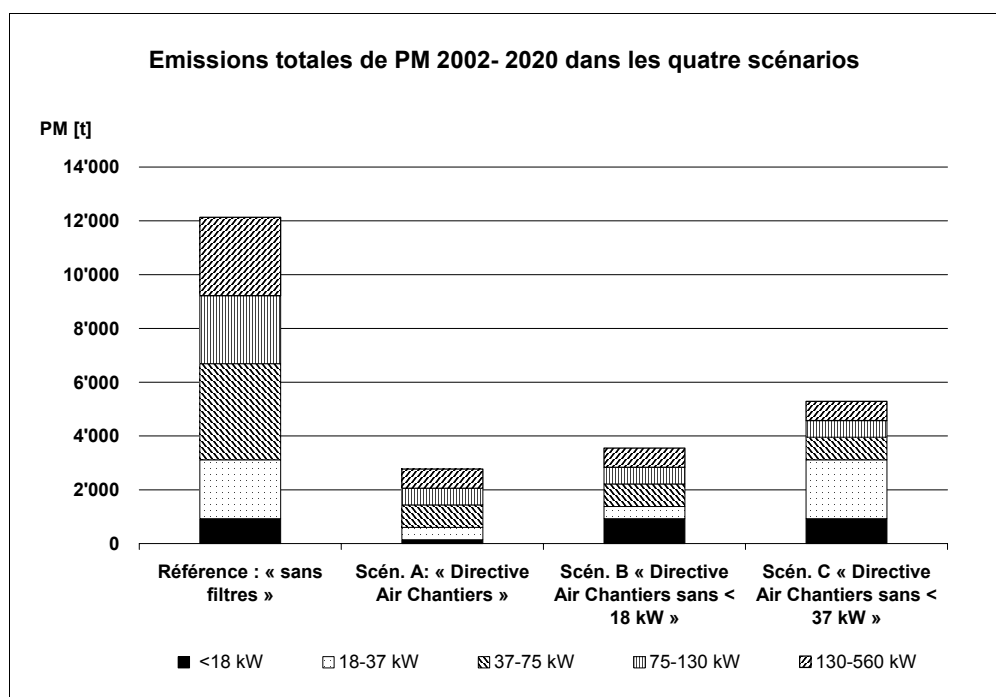


Figure 9:
Emissions annuelles relatives des scénarios rapportées au scénario de référence (= 100% dans l'année considérée)



Le schéma ci-après récapitule les réductions des émissions durant toute la période 2002–2020. Le scénario A: «Directive Air Chantiers» génère une réduction totale de 77% des émissions par rapport au cas de référence; le renoncement au rééquipement des petites machines ramène ces réductions, respectivement, à 71% et 56%.

Figure 10:
Emissions totales de PM en [t] durant la période 2002–2020 pour les divers scénarios



2.3 Coûts des scénarios

La figure ci-dessous montre les coûts totaux occasionnés par les réequipements (montage des filtres et coûts variables). Le scénario A: «Directive Air Chantiers» génère des coûts de 1,55 milliard de francs environ durant la période considérée (hypothèses concernant les coûts par machine, voir le chapitre 1.5), les autres scénarios induisent des coûts inférieurs de 11% et 31%, respectivement, à ceux du scénario A. Les chiffres figurent à l'annexe 4.

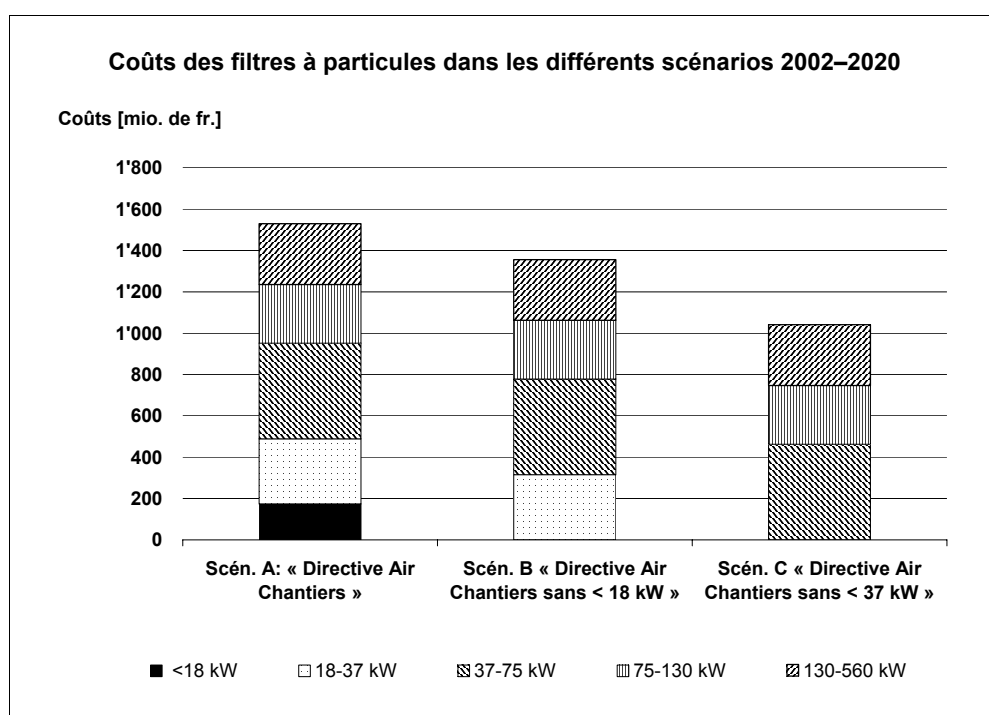


Figure 11;
Coûts totaux des différents scénarios de rééquipement, en mio. de fr.

Cependant, les coûts ne se répartissent pas uniformément sur l'ensemble de la période; il faut en réalité compter avec des besoins financiers plus élevés les premières années (voir Figure 12). Au-delà de 2005, seuls sont encore occasionnés les coûts variables et les coûts de rééquipement des machines neuves. La Figure 13 illustre la ventilation de ces coûts à l'exemple du scénario A: «Directive Air Chantiers».

Figure 12:
Coûts des différents scénarios de rééquipement en mio. de fr. entre 2002 et 2006

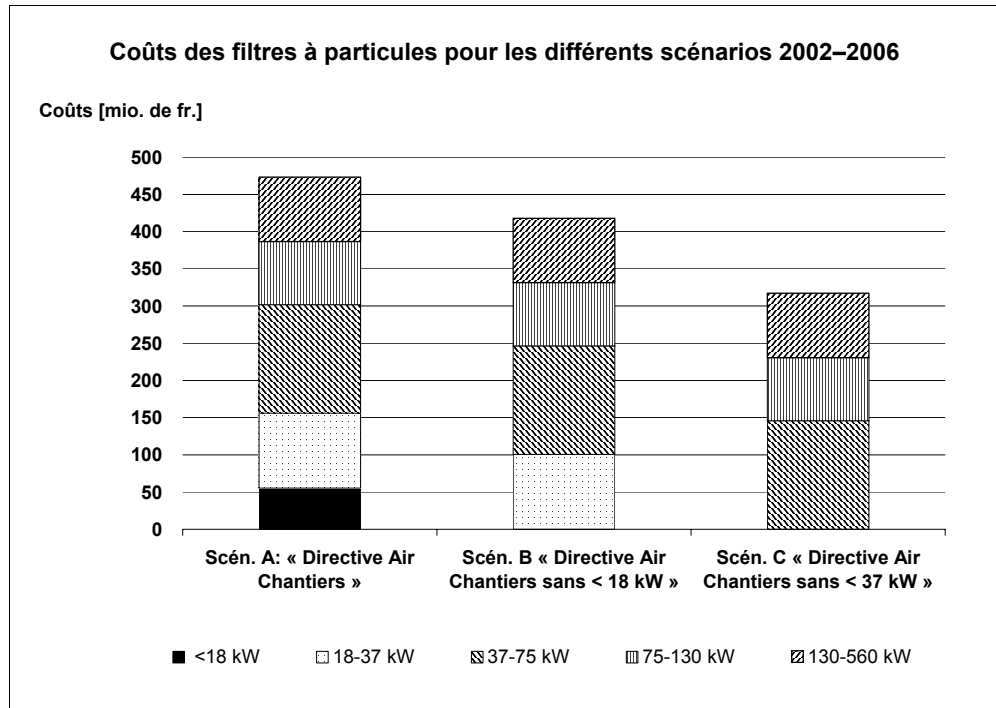
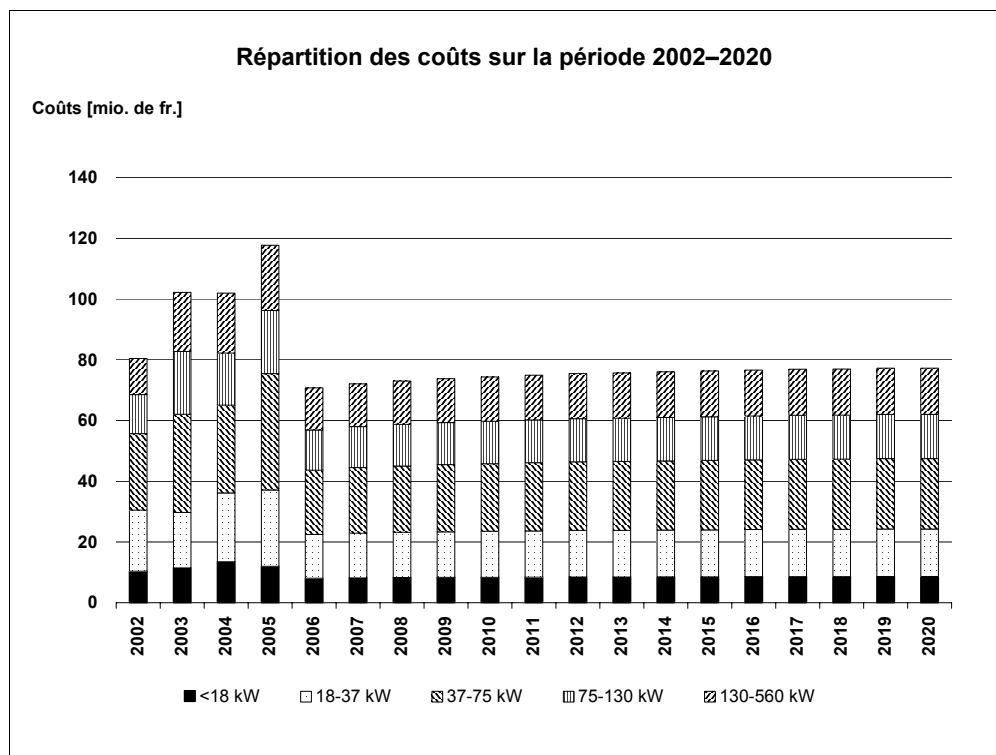


Figure 13:
Ventilation des coûts sur la période 2002–2020 pour le scénario A: «Directive Air Chantiers» (voir annexe 4).



3 Efficacité des coûts

3.1 Comparaison des scénarios

Le tableau ci-dessous montre l'efficacité des coûts de l'équipement des machines par classes de puissance et segments, exprimés en francs par tonne d'émissions de PM évitées. Il montre que la solution la plus efficace consiste à équiper d'abord les grandes machines parce qu'elles sont davantage utilisées et ont une plus grande espérance de vie. Les coûts de rééquipement et les coûts annuels inhérents à ces machines peuvent être répartis sur un plus grand nombre d'heures de service que pour les petites machines. Par conséquent, on peut admettre que les moyens financiers investis seront mieux utilisés et les coûts par tonne d'émissions de PM évitées plus faibles dans les scénarios où la limite inférieure de puissance des machines à équiper est plus élevée.

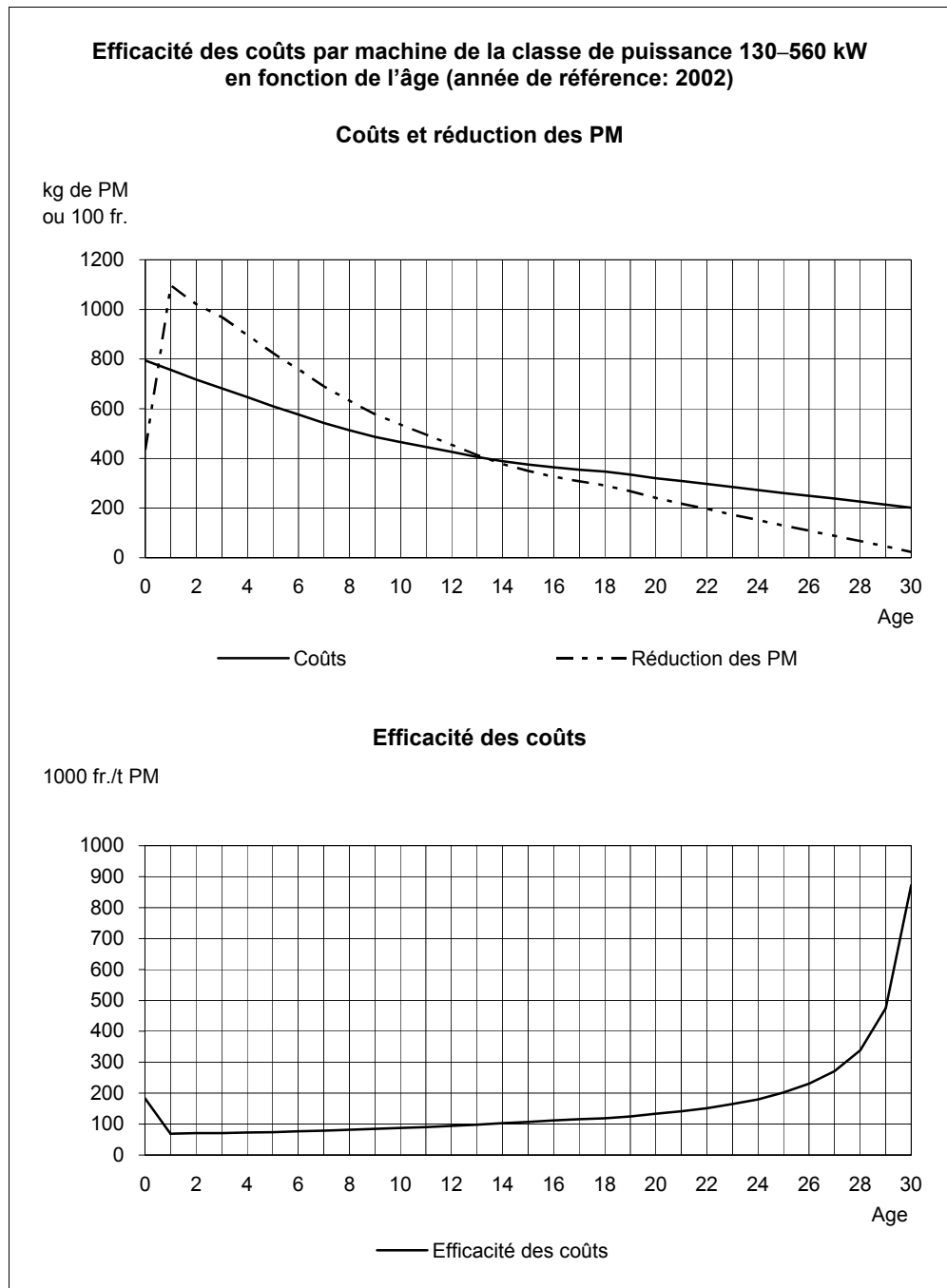
Tableau 5: Efficacité des coûts en fonction des scénarios d'équipement des machines et de l'équipement des diverses classes de puissance (remarque: ne sont considérés que les avantages et les coûts produits entre 2002 et 2020).

Efficacité des coûts 2002–2020 en [1000 Fr. par tonne d'émissions de PM évitées]	
	Coûts/avantages
Par classe de puissance	
<18 kW	222
18–37 kW	182
37–75 kW	169
75–130 kW	149
130–560 kW	133
Par scénario	
Moyenne «Directive Air Chantiers»	163
Moyenne «Directive Air Chantiers sans <18 kW»	158
Moyenne «Directive Air Chantiers sans <37 kW»	152

3.2 Optimisation de l'équipement

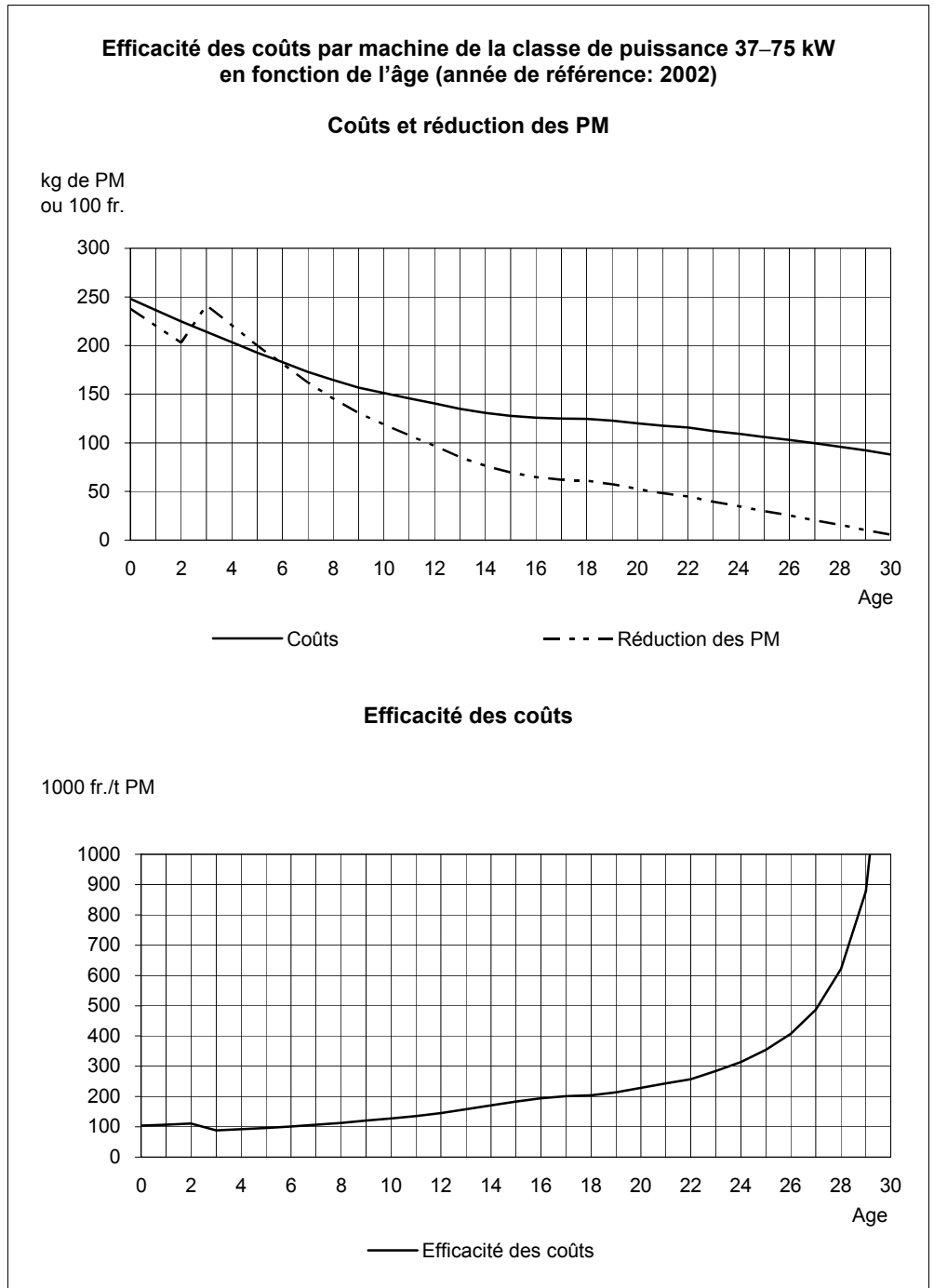
L'efficacité des coûts de l'équipement d'une machine à un moment donné ne varie pas seulement à l'intérieur d'une classe de puissance, mais peut aussi subir de fortes fluctuations suivant l'âge et le champ d'application de la machine (facteurs de charge différents, durées d'utilisation, etc.). Dans l'optimisation des coûts générés par les prescriptions en matière d'équipement complémentaire, il faudrait donc envisager une autre distinction en fonction de l'âge et du champ d'utilisation des engins. Dans cette perspective, il faut cependant appliquer une autre méthode (similaire à OFEFP 2000a): les pages suivantes indiquent la quantité d'émissions de PM évitées et les coûts générés, rapportés à leur longévité totale résiduelle jusqu'à leur mise hors service lorsque des engins de la même classe de puissance, mais d'âges différents sont équipés. Pour illustrer notre démarche, nous présentons le cas des classes de puissance 130–560 kW et 37–75 kW pour l'année 2002 en fonction de l'âge des machines (chiffres présentés à l'annexe 5).

Figure 14:
 Dans la partie supérieure de la figure sont indiqués le potentiel d'économies et le coût des filtres par machine de la classe de puissance 130–560 kW en fonction de l'âge; la partie inférieure présente l'efficacité des coûts en 1000 Fr. par tonne de PM.
 Exemple: Le rééquipement en 2002 d'une machine construite en 2002 occasionne des coûts totaux d'env. 80'000 Fr. durant la période 2002–2020 et réduit les émissions de PM d'environ 430 kg durant la même période. Le rééquipement en 2002 d'une machine de trois ans génère des coûts de 68'000 Fr. env. et évite 970 kg PM. (pour comparaison: les coûts d'achat d'une machine de cette classe de puissance sont de 350'000 Fr. env.)



Les graphiques ci-dessus montrent clairement l'effet des valeurs limites EU2 sur l'efficacité des coûts: comme les machines neuves en 2002 satisfont aux nouvelles valeurs limites, l'efficacité des coûts d'équipement diminue sensiblement. En revanche, la norme EU1 n'a quasiment pas d'incidence pour cette classe car elle ne limite pratiquement pas les coefficients d'émission spécifiques des machines.

Figure 15:
 Dans la partie supérieure de la figure sont indiqués le potentiel d'économies et le coût des filtres par machine de la classe de puissance 37–75 kW en fonction de l'âge; la partie inférieure présente l'efficacité des coûts en 1000 Fr. par tonne de PM.
 Exemple: Le rééquipement en 2002 d'une machine construite en 2002 occasionne des coûts totaux d'env. 25'000 Fr. durant la période 2002–2020 et réduit les émissions de PM d'environ 240 kg durant la même période. Le rééquipement en 2002 d'une machine de trois ans génère des coûts de 22'000 Fr. env. et évite 245 kg de PM. (pour comparaison: les coûts d'achat d'une machine de cette classe de puissance sont de 90'000 Fr. env.)



La comparaison entre les classes 37–75 kW et 130–560 kW montre clairement que la réduction des émissions de PM par franc investi est en moyenne moins bonne pour la première. Certaines classes d'âge des machines de 37–75 kW présentent toutefois une efficacité des coûts au moins similaire aux grosses machines. Cependant, la longévité relativement courte des machines (= taux de rebut élevé) augmente considérablement le coût de la réduction des PM à partir de 6 à 10 ans.

Du fait de l'introduction relativement tardive de la norme EU2, il n'y a pas encore de réduction d'efficacité pour les machines neuves; en revanche, on remarque le «coude» qui correspond à l'introduction de la norme EU1 en 2000 (donc en 2002 pour les machines de trois ans d'âge) car pour cette classe de puissance, il y a déjà une réduction perceptible des émissions spécifiques.

4 Conclusion

En résumé, on constate que la réduction des émissions de PM par franc investi dans l'équipement de machines de chantier en filtres est comparativement très bonne.

L'efficacité des coûts, c'est-à-dire la réduction des PM par franc investi s'élève en moyenne à quelque 163 francs par tonne d'émissions évitées. Pour garantir que les moyens financiers seront utilisés à bon escient, il faudrait cependant différencier les réglementations en fonction des classes de puissance. Les coûts par tonne d'émissions de particules évitées varient entre 133 francs (grosses machines) et 222 francs (petites machines). En moyenne, l'équipement complémentaire des petites machines permet donc de réduire moins efficacement que celui des engins lourds les émissions de particules par franc investi.

Cependant, dans l'optique de l'efficacité des coûts, l'âge et le niveau des émissions des diverses machines sont des facteurs au moins aussi importants que les classes de puissance. Le coefficient qui distingue l'efficacité des coûts de l'équipement des machines de la classe <18 kW de celle des machines de la classe >130 kW est de 1,7 environ; mais il est de 2,7 (classe de puissance >130 kW) entre une machine d'un an répondant à la norme EU1 et une machine neuve qui répond déjà à la norme EU2.

Etant donné les variations dans les durées d'utilisation et les charges des moteurs, une autre différenciation des analyses quant aux champs d'utilisation et aux types de machines pourrait montrer des différences similaires.

Les calculs montrent qu'il serait possible d'abaisser encore de deux tiers à trois quarts les émissions totales des machines de chantier au cours des vingt prochaines années grâce à leur équipement en filtres à particules. Les coûts de cette opération oscillent en moyenne entre 60 et 85 millions de francs par an. D'autres facteurs ayant une incidence sur l'efficacité des coûts sont l'âge et le niveau d'émission des diverses machines.

Les coûts totaux, cumulés jusqu'en 2020, de l'équipement des machines de chantier (non comprises les machines de moins de 18 kW de puissance) en filtres à particules – montage des filtres et coûts variables – s'élèvent à environ 1'360 millions de francs.

B Analyse des bénéfices

5 Situation initiale

5.1 Ordonnance sur la protection de l'air

Se fondant sur l'évaluation d'un grand nombre d'études scientifiques, en mars 1998, le Conseil fédéral a fixé dans l'ordonnance sur la protection de l'air (OPair) [OPair 1998] des valeurs limites d'immission pour les poussières fines susceptibles de pénétrer dans les poumons (PM10) afin de protéger la population de la Suisse. Tant la moyenne journalière de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ que la moyenne annuelle de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sont cependant dépassées dans de nombreuses régions du pays. Au total, 60% environ de la population vivent dans des zones où les valeurs limites ne sont pas respectées.

Les suies de diesel sont des poussières fines susceptibles de pénétrer dans les poumons et ont en outre un grand potentiel cancérigène [WHO 1989], raison pour laquelle elles sont inscrites comme substance cancérigène dans l'ordonnance sur la protection de l'air (annexe 1, chiffre 83 OPair), dans la liste des valeurs limites d'exposition au poste de travail (liste MAK) de la Suva [SUVA 1997] et dans les listes correspondantes d'autres pays. L'OPair fait obligation de minimiser les émissions de substances cancérigènes. La mise en place de filtres à particules permet de réduire de plus de 90% le potentiel cancérigène des gaz d'échappement diesel.

5.2 Définitions (PM10, PM2.5, suie)

Les PM10 sont des particules fines ayant un diamètre aérodynamique $\leq 10 \mu\text{m}$. On les subdivise en trois groupes suivant leurs tailles:

- particules ultrafines (jusqu'à $0,08 \mu\text{m}$)
- particules agglomérées ($0,08$ – $2,5 \mu\text{m}$)
- particules dites «grossières» ($2,5$ – $10 \mu\text{m}$).

Environ 75–80% des PM10 ont moins de $2,5 \mu\text{m}$ (PM2.5) et peuvent donc pénétrer très profondément dans les poumons.

Les PM10 sont un mélange physico-chimique complexe, composé de particules primaires émises et de particules secondaires d'origine naturelle et dues aux activités humaines.

- Les particules primaires sont produites par des processus de combustion de toute nature (transports, industrie et artisanat, ménages, agriculture et exploitation forestière). Elles sont surtout émises sous la forme de particules ultrafines. De plus, les PM10 se composent de particules primaires provenant de procédés mécaniques (usure, resuspension), et se présentant souvent sous la forme de particules de plus grandes tailles (supérieures à $2,5 \mu\text{m}$).
- Les particules secondaires ne sont formées que dans l'atmosphère, à partir des gaz précurseurs émis, NO_x (principalement dus au trafic routier), SO_2 (principalement dû à l'industrie/artisanat), NH_3 (principalement dû à l'agriculture) et COV (principalement dus à l'industrie/artisanat). Les particules secondaires composées de nitrates, sulfates ou d'ammonium ont généralement des diamètres moyens (entre $0,08$ et $2,5 \mu\text{m}$).

Du point de vue chimique, les PM10 sont composées de suie (carbone élémentaire: EC et carbone organique: OC), de nitrate, de sulfate, d'ammonium, d'aérosols organiques secondaires, de matériaux biogènes, de minéraux, de métaux lourds, de sel, d'eau et d'autres éléments dont certains ne sont pas encore identifiés.

Toutes les particules primaires contenant du carbone issues d'un procédé de combustion incomplète sont des particules de suie. Les particules de suie sont très fines (diamètre aérodynamique env. 0,001–0,3 μm), existent en très grand nombre et ont une surface périphérique active très grande par rapport à leur masse. Elles possèdent donc un grand potentiel toxique et cancérigène.

6 Apport de l'industrie et de l'artisanat

Le tableau ci-après décrit l'apport de l'industrie et de l'artisanat à la pollution de l'air par les PM10. On fait la distinction entre les émissions et les immissions. Par émissions, on entend la charge polluante se répandant dans l'atmosphère par l'échappement, les cheminées, par usure ou resuspension. Mais les immissions, c'est-à-dire les concentrations de substances polluantes à l'endroit où elles agissent, sont un paramètre plus déterminant en ce qui concerne les effets de ces substances.

6.1 Apport aux émissions de PM primaires

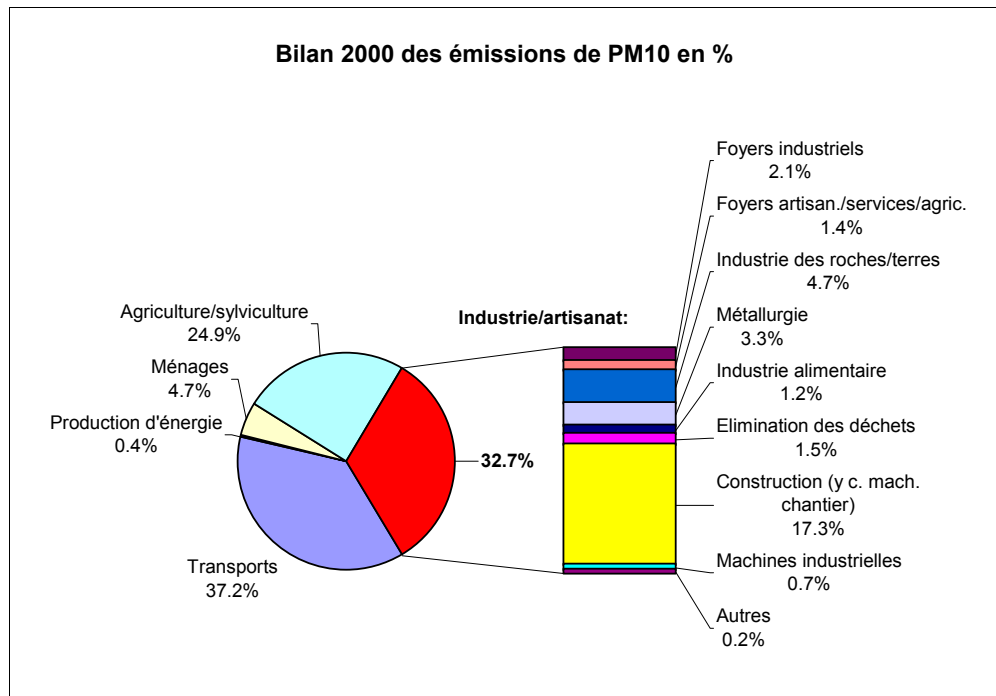
En 2000, les différentes sources existant en Suisse ont émis dans l'atmosphère quelque 26'500 tonnes de PM10. Avec environ 8'700 tonnes ou 33%, l'industrie et l'artisanat est la deuxième source de PM10 en importance après les transports (tableau 6, figure 16).

Tableau 6: Bilan 2000 des émissions de PM10 en Suisse (émissions primaires produites par la combustion, l'usure et les tourbillons) selon [OFEFP 2001]

Groupe de sources	Sources déterminantes	Emissions de PM10 en 2000	
		en tonnes	in %
Transports	Total	9'830	37.2
Production d'énergie	Total	104	0.4
Ménages	Total	1'251	4.7
Industrie/artisanat	Foyers industriels	551	2.1
	Foyers artisan./services/agric.	369	1.4
	Industrie des roches/terres	1'249	4.7
	Métallurgie	860	3.3
	Industrie alimentaire	314	1.2
	Elimination des déchets	409	1.5
	Construction (y c. mach. chantier)	4'578	17.3
	Machines industrielles	186	0.7
	Autres	124	0.2
	Total	8'639	32.7
Agriculture / sylviculture	Total	6'578	24.9
Total général		26'402	100.0

Sur les quelque 8'700 tonnes de PM10 du secteur industrie et artisanat, 4'580 tonnes (52%) sont occasionnées par l'industrie de la construction, dont 1000 tonnes sont de fines particules de suie produites par les moteurs diesel des machines de chantier. Le reste provient de procédés générateurs de poussières ainsi que des particules resuspendues lors d'activités de construction. Les émissions de suies de diesel des machines de chantier représentent env. 22% des émissions de PM10 de l'industrie de la construction. Comparées avec les émissions de suies de diesel de l'ensemble des transports (2'550 tonnes) représentent environ 40%. Ces émissions pourraient être réduites en majeure partie par l'installation de filtres à particules.

Figure 16:
Bilan 2000 des émissions de PM10 en Suisse
(émissions primaires)
selon [OFEFP 2001]



Cependant, ce ne sont pas les charges d'émissions sur l'ensemble de la Suisse qui sont déterminantes pour la santé de la population, mais les immissions qui en résultent compte tenu des aérosols primaires et secondaires.

Même quelques pour-cent ont une incidence sur la qualité de l'air

Bien que les quelque 1000 tonnes de fines particules de suie des machines de chantier ne représentent que 22% des émissions de PM10 de l'industrie de la construction, il est important de les réduire à l'échappement:

- Il en résulte des bénéfices plus que proportionnels pour la santé de la population et des travailleurs exposés du fait du grand potentiel toxique et cancérigène des particules de suie.
- Les machines de chantier dont les émissions sont considérablement réduites par les filtres à particules sont une source prépondérante d'émissions de PM10 et constituent, avec les transports (2'550 tonnes de suie) et l'agriculture et la sylviculture (970 tonnes), les principales sources d'émissions de suies de diesel en Suisse.
- Pour réduire les autres émissions de PM10 de l'industrie de la construction, comme les procès générants de la poussière, la suspension et la résuspension, la «Directive Air Chantiers» prévoit des mesures techniques et d'exploitation adéquates.
- Les quantités relatives d'émissions mentionnées plus haut constituent une moyenne pour l'ensemble de la Suisse. Localement, la part des émissions des machines de chantier à la pollution par les PM10 peut être sensiblement plus élevée.

7 Avantages écologiques des filtres à particules

7.1 Réduction du nombre de particules et de leur surface périphérique biologiquement active

Grâce au filtre à particules, il est possible de réduire d'au moins 98% le nombre des particules solides ultrafines (suies de diesel). La figure 17 montre que les filtres modernes peuvent réduire le nombre de fines particules solides de 2 à 3 ordres de grandeur, jusqu'aux concentrations normales dans l'air ambiant; pour d'autres types de filtres, on a établi des taux de rétention >99%. Les additifs au carburant, utilisés pour régénérer certains systèmes de filtres, sont également très fins (env. 0,01–0,03 μm), mais ils sont retenus dans les filtres.

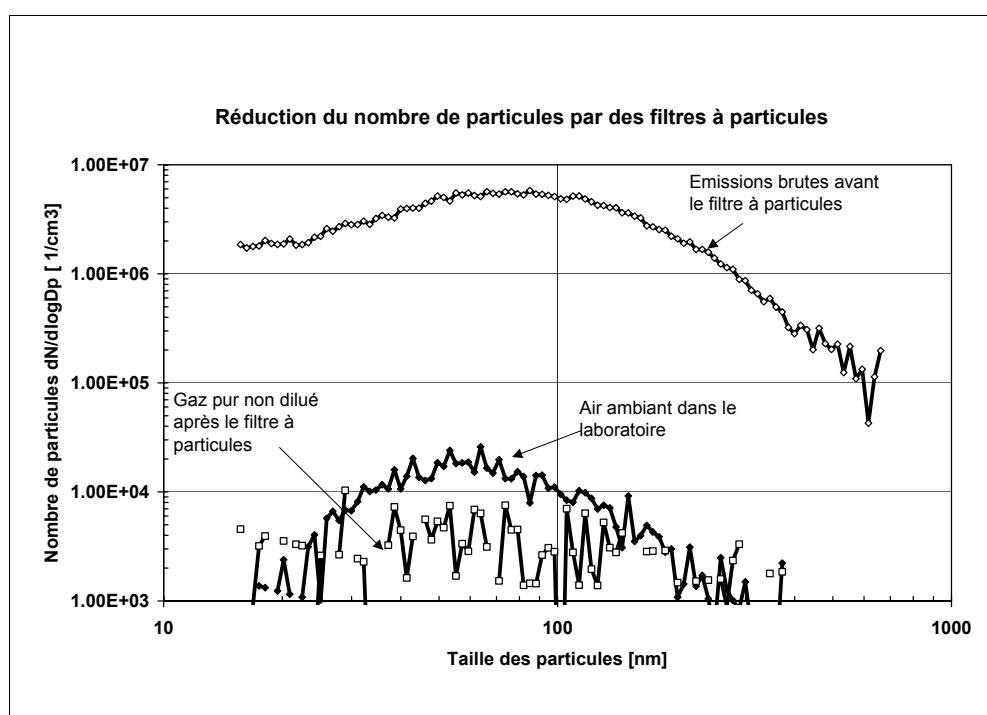


Figure 17:
Réduction du nombre de
particules par des filtres
[OFEFP 2000a]

A proximité de sources, par exemple de chantiers, pour une concentration moyenne de PM_{10} de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, il peut se trouver env. 10^{11} fines particules (= 100 milliards) dans un mètre cube d'air inhalé. Dans une station urbaine mesurant la charge de base, on a mesuré environ quatre fois moins de particules (env. 25 milliards) dans un mètre cube pour une concentration de PM_{10} de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [NABEL 2000, HARRISON 1999].

La surface périphérique biologiquement active des très fines particules (diamètre $0,02 \mu\text{m}$), par exemple, est supérieure à $3'000'000'000 \text{ m}^2$ par m^3 d'air [EPA 1996], alors que la surface périphérique des particules plus grandes (diamètre $2 \mu\text{m}$) est nettement plus faible avec env. $8'000'000 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Grâce aux filtres à particules, le nombre et la surface périphérique biologiquement active des particules au voisinage des chantiers sont donc très fortement réduits (plus de 95%).

7.2 Réduction de la masse des particules

Avec les systèmes de filtres à particules actuels, qui fonctionnent avec du carburant désulfuré (max. 10 ppm de soufre), on peut atteindre des réductions massiques de 95% en moyenne. On a même calculé des réductions massiques de 99% pour certains systèmes de filtres. Cependant, on a mesuré des rendements plus faibles avec l'utilisation de carburant contenant plus de soufre ou l'application de températures plus élevées. Il n'en demeure pas moins que l'emploi de carburants diesel désulfurés prend de l'essor. En Allemagne, il est prévu d'offrir sur tout le territoire du pays des carburants désulfurés dès le 1^{er} janvier 2003. En Suisse, les carburants de ce type bénéficieront d'allègements financiers à partir du 1^{er} janvier 2004. Au sein de l'UE, les ministres de l'environnement ont décidé à l'unanimité que leurs pays respectifs devraient offrir sur tous leurs territoires des carburants diesel et de l'essence désulfurés à partir de 2005. Les carburants contenant du soufre seront totalement interdits dès 2009.

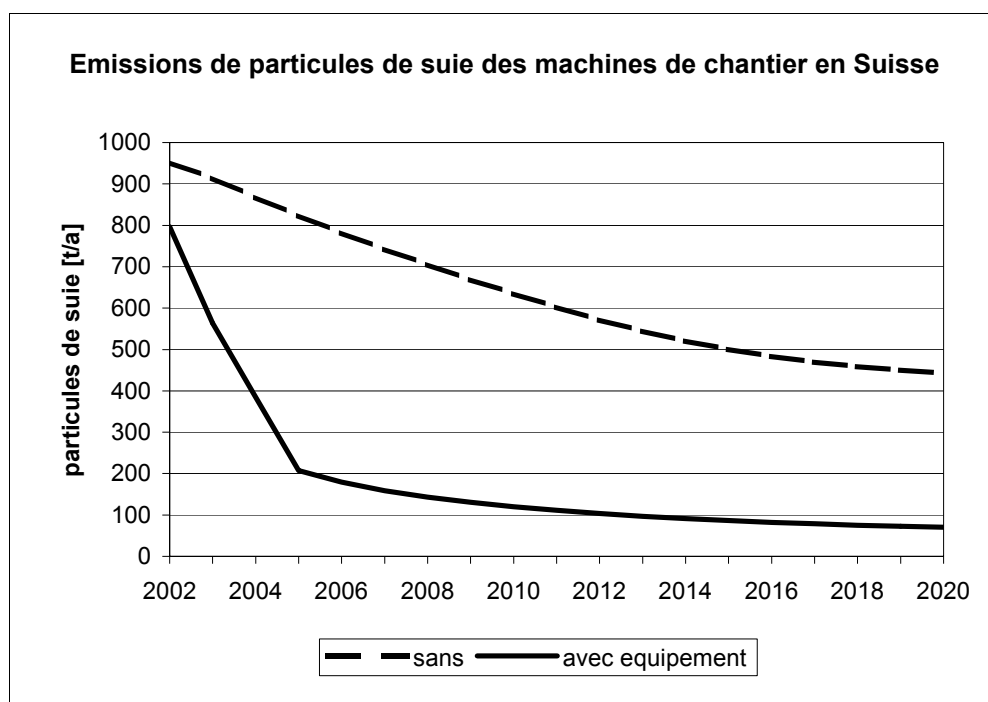


Figure 18:
Evolution des émissions de particules des machines de chantier en Suisse selon les scénarios «sans filtres» et «Directive Air Chantiers sans équipement des machines <18 kW» [INFRAS 2002].

La figure 18 présente l'évolution des émissions de PM des machines de chantier en Suisse de 2002 à 2020, d'une part, dans le scénario «sans filtres» et, d'autre part, dans le scénario «Directive Air Chantiers sans équipement des machines <18 kW de puissance» [INFRAS 2002].

Certes, grâce à l'évolution progressive du parc vers des machines de chantier produisant moins d'émissions (en vertu des prescriptions européennes en matière de gaz d'échappement pour les nouvelles machines), les émissions de particules vont lentement régresser dans le futur, même si l'on n'équipe pas de filtres les anciennes

machines. Cependant, si les machines de chantier en circulation étaient équipées de filtres à particules dès 2002 dans la perspective du scénario «Directive Air Chantiers sans équipement des machines <18 kW de puissance», leurs émissions de particules reculeraient fortement et se retrouveraient en 2004 déjà en dessous du niveau atteint en 2020 par rapport au scénario «sans filtres».

Selon le scénario «Directive Air Chantiers sans équipement des machines <18 kW de puissance», il serait possible, ces cinq prochaines années (2002–2006) de réduire les émissions de particules d'environ 2'210 tonnes (env. 440 tonnes par année). A l'horizon 2020, la réduction par rapport au scénario «sans filtres» se chiffre même à 8'600 tonnes de particules fines respirables.

7.3 Réduction de la toxicité totale et du potentiel cancérigène des gaz d'échappement des moteurs diesel

Grâce aux filtres à particules, la *toxicité totale des gaz d'échappement des moteurs diesel pour l'homme* se réduit de moitié environ. Ce résultat est dû à la nette diminution des émissions de particules et d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) (INFRAS 1998).

Mais ces filtres à particules réduisent encore plus nettement le *potentiel cancérigène* des gaz d'échappement des moteurs diesel.

Une étude réalisée sur mandat de l'office fédéral allemand de l'environnement (UBA) a évalué le potentiel cancérigène de différents gaz d'échappement [IFEU 1999]. Ses auteurs y ont déterminé le potentiel cancérigène des gaz d'échappement à partir des «risques unitaires» de différents composants cancérigènes de ces effluents tels que suie (diesel, carbone élémentaire), benzène et HAP (BaP) et des émissions correspondantes. Les filtres à particules sont très efficaces précisément dans la réduction de la suie diesel (abaissement d'au moins 98% du nombre de particules). L'étude a montré, par exemple, que le potentiel cancérigène des autobus diesel est réduit de plus de 90% grâce aux filtres à particules. On peut s'attendre à un effet similaire pour les machines de chantier.

8 Bénéfices pour la santé

8.1 Situation des immissions moyennes pondérées en fonction de la population

Plusieurs sources, situées en Suisse et à l'étranger, sont à l'origine de la charge de PM10 à laquelle la population est exposée. Deux études [SOMMER 1996, SEETHALER 1999] ont déterminé la moyenne annuelle de l'exposition aux PM10 en Suisse, pondérée en fonction de la population. A partir des émissions de PM10, ces études ont déterminé la concentration de ces particules sur chaque kilomètre carré et l'ont pondérée en fonction du nombre de personnes résidant sur ces portions de territoire. L'exposition ainsi obtenue de la population aux PM10 s'élève en moyenne annuelle à environ 21,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Sur ces 21,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10 (moyenne annuelle pondérée pour la population), la moitié environ (10,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) sont des particules secondaires provenant de l'étranger et de la Suisse [HELDSTAB 1999]; 3,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sont des particules primaires provenant de l'étranger et transportées sur de longues distances jusqu'en Suisse. De ce fait, 7,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de la moyenne des PM10 pondérée pour la population sont le fait des émissions de particules primaires produites en Suisse (voir tableau 7).

Tableau 7: Origine des différents apports de PM10 à la moyenne pondérée pour la population en Suisse.

Composants des PM10	Moyenne pondérée pour la population en $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Total	21.4
Particules secondaires de l'étranger	8.3
Particules primaires de l'étranger	3.0
Particules secondaires de Suisse	2.2
Particules primaires de Suisse	7.9

La moyenne pondérée pour la population de 7,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ résulte des émissions totales pour la Suisse de quelque 26'400 tonnes de particules primaires de PM10. Une réduction des émissions de 2'210 tonnes environ entre 2002 et 2006 ferait reculer cette moyenne d'environ 0,66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10. Une réduction des émissions de 8'600 tonnes entre 2002 et 2020 diminuerait même cette moyenne de 2,57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. On présume ici que la répartition spatiale des émissions supprimées est comparable à celle des émissions totales. Localement, la mise en place de filtres à particules sur des machines de chantier peut faire diminuer la charge de PM10 dans de plus fortes proportions que la moyenne pondérée pour la population. Le calcul des bénéfices pour la santé fondé sur la moyenne pondérée pour la population est donc une estimation prudente des bienfaits escomptés de l'installation de filtres à particules sur les machines de chantier pour la santé.

8.2 Effets sur la santé (maladies respiratoires et cardio-vasculaires, cancer)

A chaque respiration, des milliers de particules pénètrent dans nos poumons, où, suivant leur taille et leur mobilité, elles peuvent se déposer dans les voies respiratoires ou dans les zones où s'effectuent les échanges gazeux (alvéoles). Plus les particules sont petites, plus elles pénètrent profondément dans les poumons. Une fois déposées, les fines particules peuvent induire des phénomènes inflammatoires dans les bronches, les bronchioles et les alvéoles. Les inflammations peuvent entraîner une diminution des échanges gazeux et une hypoxie ainsi que la production de cytokines, des protéines qui jouent dans notre organisme un rôle de communication très important. Cela augmente le risque d'une élévation de la coagulation du sang et d'une diminution de la variabilité du rythme cardiaque, ce qui, à son tour, provoque une augmentation du risque de pathologies cardiaques et cardio-vasculaires et de mortalité consécutive à ces pathologies [POPE 2000]. Les très fines particules peuvent aussi passer des poumons dans le système sanguin. Des immissions excessives de fines particules, non seulement, nuisent aux voies respiratoires, mais encore peuvent agir sur l'évolution de pathologies cardio-vasculaires. Des immissions excessives de PM10 font apparaître davantage de crises d'insuffisance respiratoire, de toux et d'expectorations chroniques, de bronchite et de bronchite chronique, d'infections des voies respiratoires ainsi que d'autres troubles et maladies respiratoires chez les enfants et les adultes. Par ailleurs, elles peuvent aggraver des maladies existantes, détériorer la fonction pulmonaire et augmenter la fréquence des consultations dans les unités d'urgence et les hospitalisations nécessitées par l'asthme, la bronchite, la pneumonie et les maladies cardio-vasculaires. Il s'ensuit un grand nombre de journées à activité réduite tant dans la vie privée que dans le secteur professionnel.

Ces effets ont été constatés par plusieurs études épidémiologiques en Europe, aux Etats-Unis et en Asie, dans des conditions climatiques différentes, mais pour une composition similaire des substances polluantes [DOCKERY 1993, POPE 1995, CFHA 1996, ABBEY 1999]. Ils ont aussi été constatés par deux importantes études suisses, SAPALDIA [ACKERMANN-LIEBRICH 1997, ZEMP 1999] et SCARPOL [BRAUN-FAHRLÄNDER 1997], dans lesquelles quelque 10'000 adultes et 5'000 écoliers de différentes régions ont été examinés et interrogés quant aux effets de la pollution de l'air sur leur santé. Comme les fines particules polluantes actives pénètrent efficacement de l'air libre extérieur vers l'intérieur [OGLESBY 2000], les adultes et les enfants sont contraints de les inhaler pratiquement toute la journée.

Dans les études épidémiologiques, on a également observé une progression du nombre journalier de décès et de la mortalité totale (mortalité à long terme), ce qui induit un raccourcissement de l'espérance de vie. La mortalité totale englobe les décès dus aux maladies respiratoires, cardio-vasculaires et pulmonaires ainsi qu'au cancer du poumon. Par ailleurs, on a également observé des décès de nourrissons et d'enfants en bas âge lorsque la charge de fines particules était accrue (mort subite des nourrissons, SIDS) [WOODRUFF 1997].

En Suisse, plusieurs études effectuées en commun par des épidémiologues, des spécialistes de l'hygiène de l'air et des économistes [SOMMER 1996, KÜNZLI 2000] ont chiffré et converti en termes monétaires les effets de la pollution de l'air due aux transports sur la santé, sur la base des PM10, polluant générique déterminant pour les atteintes à la santé. Ces études parviennent au résultat suivant: en Suisse, la pollution de l'air provoque chaque année 3'300 décès prématurés et 4'300 hospitalisations dues à des maladies respiratoires et cardio-vasculaires. En outre, l'air respiré pollué provoque environ 45'450 cas de bronchite chez les enfants et 4'250 cas de bronchite chronique dans la population adulte. Par ailleurs, il en résulte quelque 2'762'700 journées d'activité réduite chez les adultes. Cela se traduit par des coûts de santé de l'ordre de 6,7 milliards de francs.

8.3 Evaluation du gain de l'installation de filtres à particules sur les machines de chantier pour la santé

La Suisse compte 7,08 millions d'habitants. On recense en moyenne 7'794 décès par an et par million d'habitants dans les régions où la pollution de l'air est faible ($7,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10). Si la pollution de l'air augmente en moyenne de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10, le nombre des décès par million d'habitants et par année augmente de 340 unités [SEETHALER 1999, KÜNZLI 2000]. Si, maintenant, la moyenne de la charge de PM10 pondérée en fonction de la population diminue de $0,66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ du fait d'une réduction de 2'210 tonnes des émissions de suie diesel, on peut admettre pour l'ensemble de la Suisse une diminution de 160 décès. Comme les fines particules à l'échappement présentent un plus grand potentiel toxique et cancérigène que les PM10 secondaires et d'origine naturelle, elles sont pondérées d'un facteur 2.

Par conséquent, l'équipement des machines de chantier en filtres à particules selon le scénario «Directive Air Chantiers sans équipement des machines <18 kW de puissance» permettrait d'éviter quelque 320 décès prématurés au cours des cinq prochaines années (2002–2006) dans la population adulte suisse, compte tenu d'une réduction de 2'210 tonnes des émissions de fines particules à l'échappement. D'ici en 2020, une réduction d'environ 8'600 tonnes de ces substances polluantes éviterait même 1'240 décès.

8.4 Autres bénéfices pour la santé

Si la charge de PM10 augmente de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, le nombre d'hospitalisations pour maladies respiratoires augmentera de 130 unités environ par million d'habitants et celui des hospitalisations dues à des maladies cardiaques et cardio-vasculaires, de 300 unités environ. A l'inverse, une diminution de $0,66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de la charge de PM10 devrait éviter environ 125 hospitalisations pour maladies respiratoires et 280 pour maladies cardio-vasculaires au cours des cinq prochaines années. A l'horizon 2020, cela pourrait éviter quelque 475 hospitalisations pour maladies respiratoires et 1'090 pour maladies cardiaques et cardio-vasculaires.

Une élévation de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de la charge de PM10 générerait une augmentation des cas de bronchite aiguë chez les enfants de 4'620 unités par million d'habitants et des cas de bronchite chronique chez les adultes de 430 unités. Si cette charge baisse de $0,66 \mu\text{g}/\text{m}^3$, cela évitera, quelque 4'320 cas de bronchite aiguë chez les enfants et 400 cas de bronchite chronique chez les adultes au cours des cinq prochaines années. D'ici en 2020, on aura ainsi évité environ 16'880 cas de bronchite aiguë chez les enfants et 1'570 cas de bronchite chronique chez les adultes.

Si la charge de PM10 augmente de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, le nombre de journées d'activité réduite pour les adultes croîtra d'environ 281'000 unités par million d'habitants. Si elle baisse de $0,66 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ce nombre diminuera de 265'000 unités environ au cours des cinq prochaines années, et de 1'025'000 d'ici en 2020.

Sur la base des PM10, il est possible de chiffrer, à l'aide de la notion de «cas attribués», le nombre de cas de cancer susceptibles d'être évités du fait de l'équipement des moteurs diesel des machines de chantier en filtres à particules. Ce concept a été appliqué pour la première fois en Suisse dans le projet «Basler Risikostudie Aussenluft, BRISKA» [Röösli 2000]. Se référant à trois grandes études en cohorte épidémiologiques américaines, on obtient le chiffre de 6,77 (CI = 0,82–12,72) cancers des poumons par 100'000 personnes-années et $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ supplémentaires de PM10 dans l'air ambiant. Les études américaines ne chiffrent le risque de cancer que pour les personnes de plus de 30 ans. En Suisse, deux tiers environ de la population totale sont âgés de plus de 30 ans (67%). Si l'on prend la même tranche de population qu'aux Etats-Unis, on obtient pour la Suisse 4'743'600 personnes-année. En cas de réduction de 2'210 tonnes des émissions de suie diesel et de la réduction consécutive de $0,66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de la charge de PM10 pondérée pour la population, il s'ensuivra une réduction de 45 unités environ des décès dus au cancer des poumons au cours des cinq prochaines années. La réduction de 8'600 tonnes de ces émissions d'ici en 2020 pourrait même faire reculer le nombre de ces décès de 170 unités environ.

La méthode de la disposition à nager permet de chiffrer en termes pécuniaires la réduction des effets. Elle détermine les coûts de la santé à l'aide du montant que la population exposée à la pollution de l'air serait prête à déboursier pour réduire le risque de la pollution sur sa santé. Pour éviter le risque d'un décès par exemple la valeur de ce montant s'élève à environ 2,3 millions de francs [JONES-LEE 1998]. La disposition à payer pour réduire le risque d'une maladie comporte les coûts matériels de traitement médical ambulatoire et/ou stationnaire, les pertes de production ainsi que les composantes immatérielles des coûts que sont la souffrance physique et morale, la peur et la perte de joie de vivre et la détérioration de la qualité de vie.

Au total, une réduction de quelque 2'210 tonnes de fines particules à l'échappement peut éviter des coûts de santé (mortalité et morbidité) de 1'030 millions de francs ces cinq prochaines années. Les coûts nécessaires pour éviter la mortalité prématurée représentent 70% des coûts totaux. A l'horizon 2020, une réduction de 8'600 tonnes de ces émissions pourrait même permettre d'économiser quelque 4'000 millions de francs sur les coûts de la santé.

Annexe

Annexe 1: Evolution du parc de machines

Tableau 8: Evolution du parc de machines de chantier selon le modèle

Evolution du parc de machines de chantier 1990–2020						
Année	<18kW	18–37kW	37–75kW	75–130kW	130–560kW	Somme
1990	10'190	12'755	14'143	5'518	3'367	45'973
1991	10'863	13'112	14'284	5'531	3'373	47'163
1992	11'044	13'160	14'230	5'509	3'356	47'301
1993	11'108	13'118	14'100	5'457	3'324	47'107
1994	11'361	13'249	14'135	5'463	3'324	47'532
1995	11'587	13'383	14'190	5'473	3'327	47'960
1996	11'561	13'348	14'117	5'439	3'306	47'771
1997	11'329	13'185	13'946	5'368	3'265	47'094
1998	11'340	13'243	13'979	5'371	3'265	47'200
1999	11'676	13'560	14'237	5'455	3'310	48'239
2000	11'703	13'562	14'199	5'433	3'294	48'191
2001	11'783	13'566	14'154	5'411	3'277	48'191
2002	11'880	13'566	14'101	5'386	3'257	48'191
2003	11'985	13'564	14'047	5'361	3'235	48'191
2004	12'085	13'560	13'996	5'337	3'213	48'191
2005	12'162	13'552	13'958	5'321	3'198	48'191
2006	12'191	13'547	13'945	5'316	3'192	48'191
2007	12'175	13'550	13'956	5'319	3'191	48'191
2008	12'147	13'555	13'973	5'325	3'192	48'191
2009	12'124	13'559	13'985	5'330	3'193	48'191
2010	12'107	13'564	13'994	5'332	3'192	48'191
2011	12'102	13'570	13'999	5'332	3'189	48'191
2012	12'103	13'574	13'999	5'330	3'185	48'191
2013	12'106	13'576	13'999	5'326	3'183	48'191
2014	12'110	13'579	13'998	5'322	3'182	48'191
2015	12'116	13'581	13'996	5'317	3'180	48'191
2016	12'128	13'582	13'991	5'312	3'177	48'191
2017	12'144	13'586	13'984	5'307	3'170	48'191
2018	12'159	13'590	13'977	5'301	3'163	48'191
2019	12'185	13'598	13'964	5'294	3'150	48'191
2020	12'208	13'603	13'957	5'285	3'138	48'191

Annexe 2: Evolution du parc en fonction des niveaux d'émission

Tableau 9: La composition du parc par niveaux d'émission et segments résulte de la superposition des nouvelles homologations, de la longévité des engins et des dates d'entrée en vigueur des niveaux d'émission.

Evolution du parc de machines de chantier par segments et niveaux d'émissions												
Année	<18 kW	18–37 kW		37–75 kW			75–130 kW			130–560 kW		
	avant EU	av. EU	EU2	av. EU	EU1	EU2	av. EU	EU1	EU2	av. EU	EU1	EU2
1996	11'561	13'348		14'117			5'439			3'306		
1997	11'329	13'185		13'946			5'368			3'265		
1998	11'340	13'243		13'979			5'371			3'265		
1999	11'676	13'560		14'237			5'455			3'310		
2000	11'703	13'562		13'290	910		5'106	328		3'112	182	
2001	11'783	12'547	1'019	12'334	1'820		4'756	655		2'913	364	
2002	11'880	11'527	2'039	11'371	2'730		4'403	983		2'711	364	182
2003	11'985	10'502	3'062	10'411	3'636		4'051	980	329	2'507	363	365
2004	12'085	9'492	4'068	9'469	3'619	907	3'707	975	656	2'307	360	546
2005	12'162	8'506	5'046	8'562	3'595	1'801	3'377	967	977	2'117	357	724
2006	12'191	7'543	6'005	7'703	3'553	2'689	3'066	955	1'294	1'940	353	899
2007	12'175	6'606	6'944	6'878	3'503	3'576	2'766	942	1'611	1'770	348	1'074
2008	12'147	5'711	7'844	6'092	3'427	4'453	2'481	919	1'925	1'607	340	1'246
2009	12'124	4'890	8'669	5'342	3'318	5'325	2'207	889	2'233	1'450	327	1'416
2010	12'107	4'153	9'411	4'655	3'160	6'179	1'954	842	2'537	1'303	310	1'580
2011	12'102	3'506	10'064	4'025	2'950	7'023	1'717	783	2'831	1'163	288	1'739
2012	12'103	2'935	10'639	3'454	2'707	7'839	1'500	717	3'113	1'032	266	1'888
2013	12'106	2'441	11'135	2'952	2'438	8'609	1'305	649	3'372	915	244	2'025
2014	12'110	2'016	11'563	2'513	2'168	9'317	1'131	581	3'610	810	221	2'152
2015	12'116	1'653	11'928	2'138	1'897	9'961	977	513	3'827	715	197	2'268
2016	12'128	1'351	12'231	1'815	1'633	10'543	843	447	4'023	628	175	2'374
2017	12'144	1'105	12'480	1'540	1'383	11'061	726	384	4'197	547	155	2'469
2018	12'159	910	12'680	1'308	1'158	11'510	623	330	4'349	474	137	2'552
2019	12'185	750	12'848	1'092	973	11'898	527	286	4'481	399	123	2'628
2020	12'208	617	12'987	905	830	12'222	437	254	4'594	330	114	2'694

Annexe 3: Evolution des émissions

Tableau 10: Emissions de PM par année et classe de puissance durant la période 2002–2020

Emissions par année et par scénario en tonnes de PM par an																				
cl. puissance.	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Somme
Scénario de référence: «pas d'équipement complémentaire»																				
<18 kW	47,8	48,2	48,6	48,9	49,1	49,0	48,9	48,8	48,7	48,7	48,7	48,7	48,7	48,8	48,8	48,9	48,9	49,0	49,1	926
18–37 kW	157,8	151,0	144,3	137,9	131,8	126,0	120,6	115,6	111,2	107,5	104,4	101,7	99,7	98,3	97,2	96,5	96,0	95,7	95,4	2'189
37–75 kW	290,5	284,2	268,4	253,2	239,0	225,6	212,8	200,3	188,5	177,1	166,2	156,4	147,7	140,2	133,6	128,5	124,5	121,4	119,0	3'577
75–130 kW	216,3	204,1	192,1	180,7	170,1	160,1	150,6	141,3	132,4	123,9	115,9	108,7	102,3	96,6	92,1	88,5	85,6	83,3	81,5	2'526
130–560 kW	239,5	226,8	214,4	202,7	192,0	181,9	172,2	162,8	153,7	144,9	136,5	129,1	122,2	116,4	111,4	107,2	103,8	100,8	98,2	2'916
Somme	952,0	914,2	867,8	823,5	782,1	742,6	705,0	668,8	634,6	602,1	571,7	544,5	520,7	500,2	483,1	469,5	458,8	450,1	443,2	12'135
Scénario A: «Directive Air Chantiers»																				
<18 kW	37,3	27,6	17,3	9,7	7,3	5,6	4,6	3,9	3,5	3,2	3,0	2,9	2,8	2,8	2,7	2,6	2,6	2,6	2,5	145
18–37 kW	127,9	96,0	60,3	27,4	21,7	17,4	14,3	12,1	10,4	9,3	8,3	7,6	7,0	6,5	6,1	5,8	5,5	5,3	5,1	454
37–75 kW	239,0	166,7	114,1	51,0	41,4	34,2	29,0	25,1	21,9	19,2	16,7	14,7	13,0	11,5	10,2	9,1	8,2	7,3	6,7	839
75–130 kW	179,8	116,5	77,6	37,6	31,3	26,6	23,1	20,2	17,6	15,3	13,3	11,6	10,1	8,8	7,7	6,7	5,9	5,1	4,5	619
130–560 kW	202,0	136,3	84,1	42,3	36,2	31,7	27,9	24,5	21,4	18,6	16,2	14,2	12,4	10,8	9,4	8,1	7,0	5,8	4,9	714
Somme	786,0	543,0	353,3	167,9	137,9	115,5	98,8	85,7	74,8	65,6	57,7	51,0	45,3	40,4	36,1	32,3	29,1	26,1	23,7	2770
Scénario B: «Directive Air Chantiers sans équipement des machines <18 kW»																				
<18 kW	47,8	48,2	48,6	48,9	49,1	49,0	48,9	48,8	48,7	48,7	48,7	48,7	48,7	48,8	48,8	48,9	48,9	49,0	49,1	926
18–37 kW	127,9	96,0	60,3	27,4	21,7	17,4	14,3	12,1	10,4	9,3	8,3	7,6	7,0	6,5	6,1	5,8	5,5	5,3	5,1	454
37–75 kW	239,0	166,7	114,1	51,0	41,4	34,2	29,0	25,1	21,9	19,2	16,7	14,7	13,0	11,5	10,2	9,1	8,2	7,3	6,7	839
75–130 kW	179,8	116,5	77,6	37,6	31,3	26,6	23,1	20,2	17,6	15,3	13,3	11,6	10,1	8,8	7,7	6,7	5,9	5,1	4,5	619
130–560 kW	202,0	136,3	84,1	42,3	36,2	31,7	27,9	24,5	21,4	18,6	16,2	14,2	12,4	10,8	9,4	8,1	7,0	5,8	4,9	714
Somme	796,5	563,6	384,6	207,2	179,7	158,9	143,1	130,6	120,1	111,1	103,3	96,8	91,2	86,4	82,2	78,5	75,4	72,5	70,2	3'552
Scénario C: «Directive Air Chantiers avec équipement des machines <37 kW»																				
<18 kW	47,8	48,2	48,6	48,9	49,1	49,0	48,9	48,8	48,7	48,7	48,7	48,7	48,7	48,8	48,8	48,9	48,9	49,0	49,1	926
18–37 kW	157,8	151,0	144,3	137,9	131,8	126,0	120,6	115,6	111,2	107,5	104,4	101,7	99,7	98,3	97,2	96,5	96,0	95,7	95,4	2'189
37–75 kW	239,0	166,7	114,1	51,0	41,4	34,2	29,0	25,1	21,9	19,2	16,7	14,7	13,0	11,5	10,2	9,1	8,2	7,3	6,7	839
75–130 kW	179,8	116,5	77,6	37,6	31,3	26,6	23,1	20,2	17,6	15,3	13,3	11,6	10,1	8,8	7,7	6,7	5,9	5,1	4,5	619
130–560 kW	202,0	136,3	84,1	42,3	36,2	31,7	27,9	24,5	21,4	18,6	16,2	14,2	12,4	10,8	9,4	8,1	7,0	5,8	4,9	714
Somme	826,4	618,6	468,7	317,8	289,8	267,5	249,4	234,1	220,9	209,3	199,4	191,0	184,0	178,2	173,3	169,2	165,9	162,9	160,5	5'287

Annexe 4: Evolution des coûts

Tableau 11: Coûts des filtres par année et classe de puissance durant la période 2002–2020

Coûts des filtres par année et scénario en mio de fr. par an																				
cl. puissance	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Somme
Scénario A: «Directive Air Chantiers»																				
<18 kW	10,4	11,5	13,5	12,0	8,0	8,2	8,3	8,3	8,4	8,4	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,6	8,6	8,6	8,6	174
18–37 kW	20,1	18,3	22,7	25,2	14,4	14,7	14,9	15,0	15,1	15,2	15,3	15,4	15,4	15,5	15,5	15,6	15,6	15,6	15,7	315
37–75 kW	25,2	32,3	28,9	38,3	21,2	21,6	21,9	22,1	22,3	22,5	22,6	22,7	22,8	22,9	23,0	23,1	23,1	23,2	23,2	463
75–130 kW	12,9	20,7	17,2	20,9	13,3	13,5	13,7	13,9	14,0	14,1	14,2	14,3	14,3	14,4	14,5	14,5	14,5	14,6	14,6	284
130–560 kW	11,9	19,5	19,8	21,5	13,9	14,1	14,3	14,4	14,6	14,7	14,8	14,9	15,0	15,0	15,1	15,2	15,2	15,2	15,2	294
Somme	80,4	102,2	102,0	117,7	70,8	72,1	73,0	73,8	74,3	74,9	75,4	75,7	76,0	76,3	76,6	76,9	77,0	77,2	77,2	1'530
Scénario B: «Directive Air Chantiers sans équipement des machines <18 kW»																				
<18 kW	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18–37 kW	20,1	18,3	22,7	25,2	14,4	14,7	14,9	15,0	15,1	15,2	15,3	15,4	15,4	15,5	15,5	15,6	15,6	15,6	15,7	315
37–75 kW	25,2	32,3	28,9	38,3	21,2	21,6	21,9	22,1	22,3	22,5	22,6	22,7	22,8	22,9	23,0	23,1	23,1	23,2	23,2	463
75–130 kW	12,9	20,7	17,2	20,9	13,3	13,5	13,7	13,9	14,0	14,1	14,2	14,3	14,3	14,4	14,5	14,5	14,5	14,6	14,6	284
130–560 kW	11,9	19,5	19,8	21,5	13,9	14,1	14,3	14,4	14,6	14,7	14,8	14,9	15,0	15,0	15,1	15,2	15,2	15,2	15,2	294
Somme	70,1	90,8	88,5	105,8	62,7	63,9	64,7	65,4	66,0	66,5	67,0	67,2	67,5	67,8	68,1	68,3	68,4	68,6	68,6	1'356
Scénario C: «Directive Air Chantiers avec équipement des machines <37 kW»																				
<18 kW	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18–37 kW	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
37–75 kW	25,2	32,3	28,9	38,3	21,2	21,6	21,9	22,1	22,3	22,5	22,6	22,7	22,8	22,9	23,0	23,1	23,1	23,2	23,2	463
75–130 kW	12,9	20,7	17,2	20,9	13,3	13,5	13,7	13,9	14,0	14,1	14,2	14,3	14,3	14,4	14,5	14,5	14,5	14,6	14,6	284
130–560 kW	11,9	19,5	19,8	21,5	13,9	14,1	14,3	14,4	14,6	14,7	14,8	14,9	15,0	15,0	15,1	15,2	15,2	15,2	15,2	294
Somme	49,9	72,5	65,8	80,6	48,3	49,2	49,8	50,4	50,8	51,3	51,6	51,8	52,1	52,3	52,5	52,7	52,8	52,9	53,0	1'041

Annexe 5: Coûts-avantages en fonction de l'âge (illustrations)

Tableau 12: Les coûts générés jusqu'à la mise hors circulation ou les émissions de PM évitées, et partant, l'efficacité des coûts, varient suivant l'âge de la machine qui a été équipée en 2002.

Age	Classe de puissance 130–560 kW, Equipement complémentaire en 2002			Classe de puissance 37–75 kW, Equipement complémentaire en 2002		
	Coûts (Fr.)	Réduction de PM (kg)	Efficience des coûts (kFr/t)	Coûts (Fr.)	Réduction de PM (kg)	Efficience des coûts (kFr/t)
0	79'431	433	183	24'800	238	104
1	75'655	1'096	69	23'647	220	107
2	71'792	1'020	70	22'476	203	111
3	68'234	968	70	21'417	241	89
4	64'622	896	72	20'348	221	92
5	61'023	824	74	19'274	200	96
6	57'669	757	76	18'297	181	101
7	54'275	689	79	17'299	162	107
8	51'366	631	81	16'458	146	113
9	48'640	577	84	15'680	130	120
10	46'591	535	87	15'114	119	127
11	44'624	495	90	14'568	108	135
12	42'646	454	94	14'039	97	145
13	40'605	413	98	13'494	85	158
14	38'900	378	103	13'068	76	171
15	37'510	350	107	12'773	70	183
16	36'374	326	112	12'579	65	194
17	35'478	307	115	12'481	62	201
18	34'668	291	119	12'469	61	205
19	33'455	268	125	12'285	57	214
20	32'052	241	133	11'995	52	229
21	30'862	218	141	11'760	48	244
22	29'736	197	151	11'576	45	257
23	28'460	173	164	11'225	39	284
24	27'305	152	180	10'927	35	314
25	26'087	129	202	10'605	30	355
26	24'934	108	230	10'293	25	407
27	23'806	88	270	9'950	20	487
28	22'606	67	339	9'588	15	621
29	21'373	45	474	9'215	10	879
30	20'102	23	872	8'813	5	1'645

Annexe 6: Bibliographie

- ABBEY D., NISHINO N., McDONNELL W. et al. 1999: Long-term inhalable particles and other air pollutants related to mortality in nonsmokers. *Am J Respir Crit Care Med* 1999; 159: 373–382.
- ACKERMANN U., LEUENBERGER P., SCHWARTZ J. et al. 1997: Lung function and long-term exposure to air pollutants in Switzerland (SAPALDIA study). *Am J Respir Crit Care Med* 1997; 155 (1): 122–129.
- BRAUN-FAHRLÄNDER C., VUILLE J., SENNHAUSER F. et al. 1997: Respiratory Health and long-term exposure to air pollutants in Swiss schoolchildren (SCARPOL study). *Am J Respir Crit Care Med* 1997; 155(3): 1042–1049.
- DOCKERY D., POPE A., XU X. et al. 1993: An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *N Engl J Med* 1993 329 (24); 1753–1759.
- CFHA Commission fédérale de l'hygiène de l'air 1996: Particules en suspension. Mesures et évaluation des effets sur la santé. Publication de l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage. Cahier de l'environnement n° 270, Berne 1996.
- EPA (United States Environmental Protection Agency) 1996: Air Quality Criteria for Particulate Matter. Vol. II-11. Research Triangle Park, 1996.
- HARRISON R., JOHNES M. AND COLLINS G. 1999: Measurements of the physical properties of particles in the urban atmosphere. *Atmospheric Environment* 1999; 33: 309–321.
- HELDSTAB J., KÜNZLE T., DE HAAN P. et al. 1999: Modélisation de la charge en PM10 sur le territoire suisse. Publication de l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage. Cahier de l'environnement n° 310, Berne 1999.
- HÜGLIN C., GEHRIG R., BALTENSPERGER U. et al. 2000: NFP 41 Verkehr und Umwelt. Projekt C4: Partikelemissionen (PM10) des Strassenverkehrs. Schlussbericht, Juli 2000.
- IFEU 1999: Immissionsnaher Risikovergleich von Diesel- und Ottoabgasen. Auswirkungen zukünftiger Emissionsgrenzwerte auf die Luftqualität und die Gesundheit, Institut für Energie- und Umweltforschung (zusammen mit dem Fraunhofer Institut für Toxikologie und Aerosolforschung und FOBIG Freiburg), im Auftrag des Umweltbundesamtes Berlin, Heidelberg, Dezember 1999.
- INFRAS 1998: Ecoprofiles de carburants. Publication de l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage. Doc. environnement n° 104, Berne 1998.
- JONES-LEE M. et al. 1998: On the contingent valuation of safety and the safety contingent valuation: Part 2 – The CV/SG «Chained» Approach. ExternE-Project. European Community 1998.
- KELLER M. DE HAAN P. 2000: Emissions polluantes du trafic routier. Publication de l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage. Cahier de l'environnement n° 255 complément, Berne 2000.
- KÜNZLI N., KAISER R., MEDINA S. et al. 2000: Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a European assessment. *Lancet* 2000; 356; 795–801.
- Nationales Messnetz für Luftfremdstoffe (NABEL) 2000: Messungen im Jahr 2000 (pas encore publié).

- OFEFP 1994: Schadstoffemissionen und Treibstoffverbrauch von Baumaschinen, Synthesebericht, Umweltmaterialien Luft Nr. 23, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern 1994
- OFEFP 2000a: Partikelfilter für schwere Nutzfahrzeuge, Technische Grundlagen zur Nachrüstung grosser Fahrzeugflotten, Umweltmaterialien Luft Nr. 130, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern 2000
- OFEFP 2000b: Emissions polluantes du trafic routier de 1950–2020, Cahier de l'environnement air n° 255 complément, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne 2000
- OFEFP 2000c: Schadstoffemissionen und Treibstoffverbrauch des Offroad-Sektors, Inventare 1990 und 1995 Entwicklung 1990–2030, Umweltmaterialien Luft Nr.49 Nachtrag, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern 2000 (Entwurf)
- OFEFP 2001: Mesures de réduction des émissions de PM10. Publication de l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Document environnement n° 136, Air, Berne 2001.
- OGLESBY L, KÜNZLI N., RÖÖSLI M. et al. 2000: Validity of ambient levels of fine particles as surrogate for personal exposure to outdoor air pollution. Results of the European Expolis-EAS study. *J Air and Waste Man Assoc* 2000; 50 1251–1261.
- Ordonnance fédérale sur la protection de l'air (OPair) 1998: RS 814.318.142.
- POPE C.A.III 2000: Epidemiology of fine particulate air pollution and human health: Biologic mechanisms and who's at risk? *Environmental Health perspectives* 2000; 108 (Suppl. 4), 713–723
- POPE C.A.III, THUN M., NAMBOODIRI M. et al. 1995: Particulate Air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of U.S. adults *Am J Respir Crit Care Med* 1995; 151 (3): 669–674
- RÖÖSLI M., KÜNZLI N., BRAUN-FAHRLÄNDER C. et al. 2000: Gesundheitsrisiko durch Luftschadstoffe in der Region Basel. 2. Bericht der Basler Risikostudie Aus-senluft BRISKA. Institut für Sozial- und Präventivmedizin der Universität Basel und Lufthygieneamt beider Basel, Basel und Liestal 2000.
- SEETHALER R. 1999: Health costs due to road traffic-related air pollution. Synthesis report. Prepared for the WHO Ministerial Conference on Environment and Health, London 1999. Federal Department of Environment, Transport, Energy and Communications. GVF-report 1/99, order number 801.633e; Bern 1999.
- SOMMER H., NEUENSCHWANDER R. 1996: Monetarisierung der verkehrsbedingten externen Gesundheitskosten, Synthesebericht. Studie im Auftrag des Dienstes für Gesamtverkehrsfragen des Eidg. Verkehrs- und Energiewirtschafts-Departementes. GVF-Auftrag Nr. 272, Bern 1996.
- SUVA 1997: Valeurs limites au poste de travail 1997 (émissions des moteurs diesel: p. 40; substances cancérigènes p. 109ss) Suva Lucerne 1997.
- TTM 2001: Partikelfilter für Baumaschinen-Systemkosten, Email vom 14.11.2001
- WHO 1989: International Agency for Research on Cancer IARC: Diesel and gasoline engine exhausts and some nitroarenes. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Vol. 46; IARC, Lyon 1989.
- WOODRUFF T.J., GRILLO J., SCHOENDORF K.C. 1997: The relationship between selected causes of postneonatal infant mortality and particulate air pollution in the United States. *Environmental Health Perspect.* 1997; 105/6: 608–612.

ZEMP E., ELSASSER S., SCHINDLER C. et al. 1999: Long-term ambient air pollution and chronic respiratory symptoms in adults (SAPALDIA study). *Am J Respir Crit Care Med* 1999; 159: 1257–1266.

Autres ouvrages

- American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) 1996: Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents, Biological Exposure Indices (Diesel Exhaust: p. 39). ACGIH, Cincinnati, Ohio 1996.
- Health Effect Institute 1996: Diesel exhaust: a critical analysis of emissions, exposure and health effects. Report 1996.
- HOFER et al. 2001: Im Auftrag des BUWAL: Health Effects, Measurement and Filtration of Solid Particles emitted from Diesel Engines, April 2001.
- JING L.; FORSS A.M., BACH CH., EGGENBERGER U. 1996: Umfassende, wirkungsorientierte Charakterisierung von Partikeln aus Dieselabgasen. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* 56 (1996): 139–145.
- KEITH W., MORGAN C. 1995: The Deposition and Clearance of Dust from the Lungs – Their Role in the Etiology of Occupational Lung Disease, in: *Occupational Lung Diseases*, 3rd ed., S. 111–126. Keith W., Morgan C., Seaton A. (ed.): W.B. Saunders Company, Philadelphia 1995.
- POTT F. 1991: Dieselmotorabgas – Tierexperimentelle Ergebnisse zur Risikoabschätzung. In: *Krebserzeugende Stoffe in der Umwelt – Herkunft, Messung, Risiko, Minimierung*. VDI-Bericht 888, S. 211–244. Düsseldorf: VDI-Verlag 1991.
- Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe der Deutschen Forschungsgemeinschaft 1987. Greim H. (Hrsg.): Dieselmotor-Emissionen. In: *Gesundheitsschädliche Arbeitsstoffe – Toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründungen von MAK-Werten (Maximale Arbeitsplatzkonzentration)*, 13. Lieferung 1987. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim.
- SIEGMANN K., SIEGMANN H.C. 1997: Molekulare Vorstadien des Russes und Gesundheitsrisiko für den Menschen. Laboratorium für Verbrennungsaerosole und Schwebeteilchen der ETH Zürich, Vortragsunterlagen 1997.
- US Environmental Protection Agency (EPA) 1987: *Air Quality Criteria for Particulate Matter*, Vol. I-III. Environmental Protection Agency, Washington D.C. 1996.
- McClellan, R.O.: Health Effects of Exposure to Diesel Exhaust Particles. *Annu Rev Pharmacol Toxicol* 1987; 27: 279–300.