

RAPPORT D'ÉTUDE  
N° DRC-09-103681-02123A

/2009

**Politiques combinées de gestion de la qualité de  
l'air et du changement climatique (partie 1):  
enjeux, synergies et antagonismes**

**INERIS**

maîtriser le risque |  
pour un développement durable |

# Politiques combinées de gestion de la qualité de l'air et du changement climatique (part 1): enjeux, synergies et antagonismes

Verneuil-en-Halatte (Oise)

Client :

MEEDDAT/DGEC

Liste des personnes ayant participé à l'étude :

Bertrand Bessagnet, Jean-Marc Brignon, Anne-Christine Le Gall, Frédéric Meleux, Simone Schucht, Laurence Rouïl

## PRÉAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	<b>Rédaction</b>	<b>Vérification</b>	<b>Approbation</b>
<b>NOM</b>	Simone Schucht Frédéric Meleux Anne-Christine Le Gall	Bertrand Bessagnet Jean-Marc Brignon	Laurence Rouïl
<b>Qualité</b>	Ingénieurs Unité EDEN Ingénieur Unité MOCA	Responsable Unité MOCA Responsable Unité EDEN	Responsable Pôle Modélisation Environnementale et Décision
<b>Visa</b>			

# TABLE DES MATIÈRES

<b>1. RESUME</b> .....	<b>5</b>
<b>2. GLOSSAIRE</b> .....	<b>7</b>
<b>3. INTRODUCTION</b> .....	<b>8</b>
<b>4. IMPACT DES POLLUANTS ATMOSPHERIQUES SUR LE CLIMAT</b> .....	<b>11</b>
4.1 FACTEURS CHIMIQUES DE L'ÉVOLUTION DU CLIMAT .....	11
4.2 SENSIBILITE DU CLIMAT ET RETROACTIONS .....	13
4.3 LES EFFETS DIRECTS, SEMI-DIRECTS ET INDIRECTS DES AEROSOLS .....	14
4.4 INCERTITUDES LIEES AUX COUPLAGES AEROSOLS/CLIMAT DANS LES MODELES CLIMATIQUES.....	15
<b>5. IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE</b> .....	<b>17</b>
5.1 FACTEURS D'ÉVOLUTION DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE SOUS L'INFLUENCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ....	17
5.1.1. <i>Le cycle de l'eau et la pollution de l'air</i> .....	18
5.1.2. <i>La circulation grande échelle des masses d'air.</i> .....	18
5.1.3. <i>La hausse des températures</i> .....	19
5.1.4. <i>Les effets liés à l'impact du changement climatique sur les écosystèmes</i> .....	19
5.2 QUANTIFICATION POSSIBLE DES EFFETS EN TERME DE NIVEAUX DE POLLUANTS ATMOSPHERIQUES.....	20
<b>6. SYNERGIES ET ANTAGONISMES ENTRE LUTTE CONTRE LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ET LUTTE CONTRE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE</b> .....	<b>24</b>
6.1 CONSIDERATIONS METHODOLOGIQUES GENERALES.....	24
6.2 SECTEUR DE L'ÉNERGIE .....	26
6.3 SECTEUR DU TRANSPORT : TRANSPORT ROUTIER ET ENGIN NON ROUTIERS.....	37
6.4 SECTEUR DU TRANSPORT : AVIATION.....	56
6.5 SECTEUR DU TRANSPORT : BATEAUX .....	58
6.6 SECTEUR DU TRANSPORT : TRAINS .....	62
6.7 SECTEUR DE L'INDUSTRIE : GENERAL.....	64
6.8 SECTEUR DE L'INDUSTRIE : INSTALLATIONS DE COMBUSTION.....	66
6.9 SECTEUR DE L'INDUSTRIE : CHIMIE ET PETROCHIMIE.....	70
6.10 SECTEUR DE L'INDUSTRIE : INDUSTRIES METALLURGIQUES.....	73
6.11 L'AGRICULTURE : AGRICULTURE ET ÉLEVAGE.....	75
6.12 L'AGRICULTURE : MESURES STRUCTURELLES .....	79
6.13 SECTEUR RESIDENTIEL ET CONSTRUCTION .....	81
<b>7. CONCLUSIONS</b> .....	<b>86</b>
<b>8. REFERENCES</b> .....	<b>88</b>

## 1. RESUME

Depuis plusieurs décennies la prise de conscience du grand public et des décideurs politiques vis-à-vis des questions environnementales et de leur lien avec la santé humaine a permis la mise en place d'instances scientifiques et politiques destinées à limiter et maîtriser les effets négatifs de nos activités polluantes. C'est ainsi que les émissions de certains polluants dans l'atmosphère ont été significativement réduites et sont surveillées dans le cadre de protocoles internationaux et de directives européennes réglementaires.

Cependant, à l'heure actuelle, les réglementations existantes ne traitent pas de manière conjointe et intégrée les questions du changement climatique et de qualité de l'air. Pourtant depuis quelques années, la littérature foisonne d'études démontrant l'intérêt, en termes d'efficacité et de coûts, de mettre en place des politiques combinées.

Ces études montrent que des co-bénéfices peuvent être engendrés pour la santé humaine, pour les écosystèmes, et que les coûts de gestion de la qualité de l'air peuvent être réduits en tirant parti de mesures de gestion du réchauffement climatique.

Elles se basent sur les interactions physiques et chimiques entre pollution atmosphérique et changement climatique, nombreuses et bilatérales:

- La pollution atmosphérique influence le changement climatique puisque la plupart des polluants atmosphériques agit directement ou indirectement sur les propriétés de transfert radiatif de l'atmosphère ;
- Le changement climatique modifie les mécanismes de formation des polluants atmosphériques et leur impact sur l'homme et les écosystèmes.

Mais la nature même de ces interactions implique que les effets positifs des politiques de contrôle des sources d'émissions des gaz à effet de serre et des polluants régissant la qualité de l'air ne se cumulent pas toujours. Certains choix se révèlent gagnant/gagnant (pour la qualité de l'air et le changement climatique) alors que d'autres peuvent s'avérer positifs pour un aspect et négatifs pour l'autre. Par exemple :

- Des politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre basées sur l'amélioration de l'efficacité énergétique des procédés conduisent généralement à des réductions d'émission des polluants atmosphériques; mais des mesures basées sur l'usage de certains combustibles alternatifs tels que la biomasse ou incitant à la mobilité (car une meilleure efficacité énergétique des moteurs peut abaisser le prix du kilomètre) engendrent une augmentation des émissions de ces mêmes polluants (les particules notamment).
- Réciproquement de nombreuses mesures dédiées à l'amélioration de la qualité de l'air (réduction de la vitesse des véhicules sur autoroute par exemple) réduisent aussi les émissions de gaz à effet de serre. Mais d'autres mesures (notamment les mesures dites « end of pipe » dans l'industrie, reposant sur l'ajout d'étapes dans le traitement des rejets de polluants atmosphériques) sont consommatrices d'énergie et induisent une augmentation des rejets de gaz à effet de serre.

L'objectif du présent travail est de consigner l'état des connaissances sur ce sujet afin d'amorcer une réflexion sur la mise en place future de politiques intégrées et concertées de gestion de la qualité de l'air et de lutte et d'adaptation au changement climatique.

Une analyse des effets réciproques du réchauffement climatique sur la qualité de l'air, basée sur une veille bibliographique la plus exhaustive possible et sur des travaux de R&D menés en interne à l'INERIS, est proposée. Elle synthétise les processus d'action et de rétroaction du climat sur la qualité de l'air. Les notions de transfert radiatif de l'atmosphère, l'une des variables de référence les plus utilisées pour qualifier l'effet de la composition chimique de l'atmosphère sur le climat, et de sensibilité du climat y sont illustrées.

Une attention particulière est accordée à la question des aérosols. En effet ils constituent l'un des principaux facteurs d'incertitude dans l'analyse des liens entre changement climatique et qualité de l'air. Les interactions peuvent être directes (propriétés de transfert radiatif) ou indirectes (via la formation des nuages). S'il ressort que de manière globale la présence d'aérosols aurait plutôt un effet « refroidissant » sur l'atmosphère, certains composés tels que le carbone élémentaire ont bien des propriétés d'absorption de la chaleur et donc un effet réchauffant. Les incertitudes sur ces questions sont explicitées dans le rapport.

La complexité des interactions pollution atmosphérique/changement climatique influence logiquement le choix des mesures de gestion et de réduction des émissions, si l'on vise des effets positifs sur les deux aspects (qualité de l'air et climat).

Un ensemble de mesures de lutte contre la pollution atmosphérique et le changement climatique est donc synthétisé, pour lequel les éventuels effets antagonistes ou synergiques sont pointés et commentés. Cette restitution est présentée sous forme de tableaux, pour une plus grande lisibilité. L'objectif est de dégager, au vu des mesures actuellement déployées ou envisagées dans le futur, celles qui semblent contre-productives (et les raisons de ce jugement) dans l'un ou l'autre des deux champs, et au contraire celles qui conduisent à des situations « gagnant/gagnant ». A noter qu'afin de disposer d'un apport immédiatement utilisable pour l'élaboration des politiques publiques, nous nous sommes focalisés sur des mesures contenues dans le Plan Climat, la stratégie nationale d'adaptation au changement climatique, la stratégie nationale de Développement Durable, et le projet de Loi lié au Grenelle de l'Environnement.

En conclusion, si un grand nombre de mesures sont effectivement à ranger dans la catégorie « gagnant-gagnant », on ne peut ignorer celles qui présentent des effets antagonistes. Il y a donc un réel potentiel d'amélioration de l'efficacité de ces politiques. De plus, lorsque l'ensemble de la chaîne de mise en œuvre est considéré, plusieurs actions présentent un bilan mitigé, ou leur efficacité est fortement dépendante des conditions de mise en œuvre et d'accompagnement de la mesure, et dans ce cas, les politiques publiques devront également en tenir compte.

La poursuite de ces travaux s'attachera notamment à réaliser une étude plus détaillée pour certaines mesures à enjeu. Pour celles-ci, l'analyse pourra inclure de façon simplifiée d'autres impacts sur l'environnement, et des aspects socio-économiques. Les mesures évaluées seront élargies aux mesures d'adaptation au changement climatique, et à l'évaluation de programmes d'actions nationaux complets.

## 2. GLOSSAIRE

AOP	Aérosols Organiques Primaires
AOS	Aérosols Organiques Secondaires
CC	Changement Climatique
CE	Commission Européenne
CEE-NU	Commission Economique pour l'Europe des Nations Unies
CH3	Ammoniac
CH4	Méthane
CLRTAP	Convention on Long-range Transboundary Air Pollution
CO2	Dioxyde de Carbone
COVNM	Composés Organiques Volatils Non Méthaniques
GAINS	Greenhouse Gas and Air Pollution Interactions and Synergies Model
GES	Gaz à Effet de Serre
ICTP	International Centre for Theoretical Physics
IIASA	International Institute for Applied Systems Analysis
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
N2O	Oxyde nitreux
NH3	Ammoniac
NOx	Oxydes d'Azote
PA	Pollution Atmosphérique
PL	Poids lourds
RAINS	Regional Air Pollution Information and Simulation Model
SOx	Oxydes de Soufre
VP	Voiture particulière

### 3. INTRODUCTION

Depuis plusieurs décennies la prise de conscience du grand public et des décideurs politiques vis-à-vis des questions environnementales et de leur lien avec la santé humaine a permis la mise en place d'instances scientifiques et politiques destinées à limiter et maîtriser les effets négatifs de nos activités polluantes. C'est ainsi que les émissions de certains polluants dans l'atmosphère ont été significativement réduites et sont surveillées depuis plusieurs décennies dans la logique de protocoles internationaux et de directives européennes réglementaires.

Cependant, pendant toutes ces années, les stratégies de réduction des émissions de polluants atmosphériques, régies par des objectifs en terme d'effet et par des contraintes technologiques et économiques, ont été établies de façon séparée, selon que l'on s'intéressait au problème du changement climatique (et donc aux émissions de gaz à effet de serre - GES), ou à celui des polluants atmosphériques que nous respirons dans les basses couches de l'atmosphère et qui impactent notre environnement (notés PA dans la suite).

Cela peut s'expliquer par différentes raisons dont les principales relèvent des propriétés physico-chimiques des différents polluants : les temps de résidence dans l'atmosphère des gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, méthane, ...) sont généralement bien plus importants que ceux des polluants atmosphériques « nocifs » pour l'homme et l'environnement (oxyde de soufre, oxyde d'azote, hydrocarbures, ozone, particules...) et donc la distribution spatiale de chacune de ces classes de polluants est différente. Les gaz à effet de serre constituent un problème à l'échelle du globe, alors que l'impact des PA peut se limiter à une zone industrielle, un quartier, une ville ou une région. En conséquence, les effets des politiques de gestion de la qualité de l'air nous sont plus rapidement perceptibles (au bout de quelques années) alors que ceux des politiques de contrôle du réchauffement climatique s'inscrivent dans le long terme (plusieurs décennies).

D'autres raisons expliquant la dichotomie GES/PA proviennent de la nature même des effets de ces composés. Les gaz à effet de serre sont responsables du réchauffement climatique mais ont généralement peu d'effets sur la santé alors que c'est l'inverse pour les autres types de polluants. Notons cependant le cas particulier de l'ozone qui est un gaz à effet de serre, et dont les effets néfastes sur la santé humaine et la végétation ne sont plus à démontrer.

Ainsi, à l'heure actuelle, les réglementations existantes ne traitent pas de manière conjointe les questions du changement climatique et de qualité de l'air. Pourtant depuis quelques années, la littérature foisonne d'études démontrant l'intérêt, en termes d'effets et de coûts, de mettre en place des politiques concertées (ACCENT 2006 et références contenues dans le rapport).

Ces études montrent que des co-bénéfices peuvent être engendrés pour la santé humaine, et pour les écosystèmes, et que les coûts de gestion de la qualité de l'air peuvent être réduits en tirant parti de mesures de gestion du réchauffement climatique.

Elles se basent sur les interactions physiques et chimiques entre pollution atmosphérique et changement climatique, nombreuses et bilatérales:

- La pollution atmosphérique influence le changement climatique puisque la plupart des polluants atmosphériques agit directement ou indirectement sur les propriétés de transfert radiatif de l'atmosphère ;
- Le changement climatique modifie les mécanismes de formation des polluants atmosphériques et leur impact sur l'homme et les écosystèmes.

Mais la nature même de ces interactions implique que les effets positifs des politiques de contrôle des sources d'émissions des gaz à effet de serre et des polluants régissant la qualité de l'air ne se cumulent pas toujours. Certains choix se révèlent gagnant/gagnant (pour la qualité de l'air et le changement climatique) alors que d'autres peuvent s'avérer gagnants pour un aspect et perdants pour l'autre. Par exemple :

- Des politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre basées sur l'amélioration de l'efficacité énergétique des procédés conduisent généralement à des réductions d'émission des polluants atmosphériques régissant la qualité de l'air ; mais des mesures basées sur l'usage de certains combustibles alternatifs tels que la biomasse ou incitant à la mobilité (car une meilleure efficacité énergétique des moteurs peut abaisser le prix du kilomètre) engendrent une augmentation des émissions de ces mêmes polluants (les particules notamment).
- Réciproquement de nombreuses mesures dédiées à l'amélioration de la qualité de l'air (réduction de la vitesse des véhicules sur autoroute par exemple) réduisent aussi les émissions de gaz à effet de serre. Mais d'autres mesures (notamment les mesures dites « end of pipe » reposant sur l'innovation technologique des procédés) sont consommatrices d'énergie et induisent donc des rejets de gaz à effet de serre en plus grande quantité.

Ainsi, le fait que chacune des deux politiques (de lutte contre la pollution atmosphérique ou contre le changement climatique) conçue séparément soit dotée d'un rapport coût/efficacité « optimal » ne signifie pas pour autant que leur addition le soit. D'où l'intérêt de privilégier des politiques combinées, conçues de façon globale, afin que des effets contre-productifs d'une des politiques sur l'autre puissent être évités ou minimisés, et les synergies entre les deux politiques maximisées.

C'est dans cette logique que s'inscrivent les études réalisées par l'IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis, [www.iiasa.ac.at](http://www.iiasa.ac.at)) avec le modèle intégré GAINS (Amman et al, 2004) pour le compte de la Commission Européenne et de la Convention sur le Transport des Polluants Atmosphériques à Longue Distance (CLRTAP) de la Commission Economique pour l'Europe des Nations Unies (CEE-NU). Ces études ont ainsi quantifié des gains économiques et en efficacité potentiellement substantiels issus de la mise en œuvre de stratégies intégrées.

Afin de comprendre et interpréter ces résultats, une première étape avant de concevoir des stratégies réellement intégrées est d'évaluer les conséquences de chacune des politiques sur l'autre. Ce sont ces éléments de base que l'on se propose de recenser et de commenter dans cette étude.

Les deux premières parties du rapport sont consacrées à l'analyse des effets réciproques du réchauffement climatique sur la qualité de l'air.

Une troisième partie synthétise un ensemble de mesures de lutte contre la pollution atmosphérique et le changement climatique et pointe les éventuels effets antagonistes ou synergiques pour chacune d'entre elles. Dans le présent document, nous avons pris le parti de présenter cette restitution sous forme de tableaux, pour une plus grande lisibilité. L'objectif est de dégager, au vu des mesures actuellement déployées ou envisagées dans le futur, celles qui semblent contre-productives (et les raisons de ce jugement) dans l'un ou l'autre des deux champs, et au contraire celles qui conduisent à des situations « gagnant/gagnant ».

A noter qu'afin de disposer d'un apport immédiatement utilisable pour l'élaboration des politiques publiques, nous nous sommes focalisés sur des mesures contenues dans les programmes nationaux et locaux de lutte et d'adaptation contre la Pollution Atmosphérique (PNRPA, PPA) et contre le changement climatique (Plan Climat, Stratégie Nationale d'Adaptation au Changement Climatique, Stratégie Nationale de Développement Durable, projet de Loi lié au Grenelle de l'Environnement).

Dans une étape ultérieure (2009), les enjeux technico-économiques associés à la mise en œuvre d'une sélection de ces mesures seront étudiés.

## 4. Impact des polluants atmosphériques sur le climat

### 4.1 Facteurs chimiques de l'évolution du climat

Le rapport de l'IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE) de Juin 2008 (accessible à <http://www.ipcc.ch>) dresse un état des lieux des effets de la pollution sur le changement climatique.

Les variations des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre et d'aérosols, du couvert terrestre et du rayonnement solaire influent sur le bilan énergétique du système climatique et ses variations. Ces fluctuations se répercutent sur les conditions d'absorption, d'émission et de diffusion du rayonnement dans l'atmosphère et à la surface de la Terre. Il s'ensuit des variations<sup>1</sup> positives (réchauffement) ou négatives (refroidissement) du bilan énergétique terrestre appelées **forçage radiatif (voir figure 4-1) et exprimées en Watt par m<sup>2</sup> (W/m<sup>2</sup>)**. Cette notion, désormais très commune, est utilisée pour comparer l'influence des facteurs de réchauffement ou de refroidissement du climat de la planète<sup>2</sup>.

Les activités humaines engendrent des émissions de quatre GES à longue durée de vie : le CO<sub>2</sub>, le méthane (CH<sub>4</sub>), l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O) et les hydrocarbures halogénés (un groupe de gaz contenant du fluor, du chlore ou du brome). Les concentrations atmosphériques de GES augmentent lorsque les émissions l'emportent sur les processus d'absorption. Sous l'effet des activités humaines, les concentrations atmosphériques de CO<sub>2</sub>, de CH<sub>4</sub> et de N<sub>2</sub>O se sont fortement accrues depuis 1750 ; elles sont aujourd'hui bien supérieures aux valeurs historiques déterminées par l'analyse de carottes de glace couvrant de nombreux millénaires.

En 2005, les concentrations atmosphériques de CO<sub>2</sub> (379 ppm) et de CH<sub>4</sub> (1 774 ppb) ont largement excédé l'intervalle de variation naturelle des 650 000 dernières années. La cause première de la hausse des concentrations de CO<sub>2</sub> est l'utilisation de combustibles fossiles ; le changement d'affectation des terres y contribue aussi, mais dans une moindre mesure. Il est très probable que l'augmentation observée des concentrations de CH<sub>4</sub> provienne surtout de l'agriculture et de l'utilisation de combustibles fossiles. Quant à la hausse des concentrations de N<sub>2</sub>O, elle est essentiellement due à l'agriculture.

La concentration atmosphérique mondiale de dioxyde de carbone est passée de 280 ppm environ à l'époque préindustrielle à 379 ppm en 2005. Le rythme d'accroissement annuel de la concentration moyenne de CO<sub>2</sub> a été plus rapide au cours des 10 dernières années (1,9 ppm par an en moyenne entre 1995 et 2005) qu'il ne l'a été depuis l'époque du début de la réalisation des mesures atmosphériques directes continues

---

<sup>1</sup> Différence entre l'énergie incidente et l'énergie réfléchie

<sup>2</sup> Certaines études s'intéressent plutôt au « Potentiel de Réchauffement Global » (GWP pour Global Warming Potential) qui indique de combien une masse donnée de gaz à effet de serre ou d'aérosols peut contribuer au réchauffement global comparé à la même masse de CO<sub>2</sub>. Mais cette notion présente de nombreuses incertitudes et la quantification du GWP ne fait pas l'unanimité dans la communauté scientifique (Boucher et Reddy, 2008)

(1,4 ppm par an en moyenne entre 1960 et 2005), bien qu'il puisse varier d'une année à l'autre.

La concentration atmosphérique mondiale de CH<sub>4</sub> est passée d'environ 715 ppb à l'époque préindustrielle à 1 732 ppb au début des années 1990, pour atteindre 1 774 ppb en 2005. Le taux de croissance a fléchi depuis le début des années 1990, en cohérence avec les émissions totales (somme des sources anthropiques et naturelles), qui sont restées pratiquement constantes au cours de cette période. La concentration atmosphérique globale de N<sub>2</sub>O est passée de 270 ppb à l'époque préindustrielle à 319 ppb en 2005.

La concentration de nombreux hydrocarbures halogénés (dont les hydrofluorocarbones) a augmenté, essentiellement sous l'effet des activités humaines, alors qu'elle était proche de zéro à l'ère préindustrielle.

On peut affirmer avec un degré de confiance très élevé qu'en moyenne, les activités humaines menées depuis 1750 ont eu globalement un effet de réchauffement net, avec un forçage radiatif de + 1,6 [+ 0,6 à + 2,4] W/m<sup>2</sup>. Le forçage radiatif cumulé résultant de l'augmentation des concentrations de CO<sub>2</sub>, de CH<sub>4</sub> et de N<sub>2</sub>O est de + 2,3 [+ 2,1 à + 2,5] W/m<sup>2</sup>, et son taux d'accroissement pendant l'ère industrielle est très probablement sans précédent depuis plus de 10 000 ans. Le forçage radiatif du dioxyde de carbone a augmenté de 20 % entre 1995 et 2005, ce qui représente le plus grand changement survenu en une décennie depuis plus de 200 ans au moins. En comparaison, on estime que les variations de l'éclairement énergétique solaire ont provoqué, depuis 1750, un léger forçage radiatif de + 0,12 [+ 0,06 à + 0,30] W/m<sup>2</sup>.

L'ozone, d'après la figure 4-1 serait le 4<sup>ième</sup> gaz à effet de serre et est un polluant atmosphérique bien connu pour ses propriétés irritantes sur les muqueuses respiratoires et oculaires. Les niveaux d'ozone se sont considérablement accrus depuis le début du XX<sup>ième</sup> siècle (Derwent et al, 2007) et ont tendance à stagner depuis ces dix dernières années, en dépit des politiques de réduction des émissions de ses précurseurs (oxydes d'azote et composés organiques volatils notamment).

Enfin il est important de noter le cas particulier des aérosols et particules, qui ont des effets sur la santé et sur le climat. La figure 4-1 fait état d'un pouvoir plutôt refroidissant pour la masse totale d'aérosols via des effets directs et indirects (cf. § 4.3) mais les différentes espèces constituant les particules ont des comportements différents. Parmi ces espèces on identifie généralement :

- Les sulfates issus des émissions industrielles de SO<sub>2</sub>,
- Les nitrates créés à partir des émissions d'oxydes d'azotes et d'ammoniac,
- Les aérosols organiques émis à partir d'activités de combustions (y compris les feux de forêt) et créés à partir des COV émis par les activités anthropiques ou naturellement,
- Le carbone suie ou carbone élémentaire qui résulte des processus de combustion incomplète et dont les émissions ne cessent de croître en Asie et en Inde,
- Les poussières minérales dues à l'érosion du vent sur la surface du sol et certaines pratiques agricoles et industrielles.

### Composantes du forçage radiatif

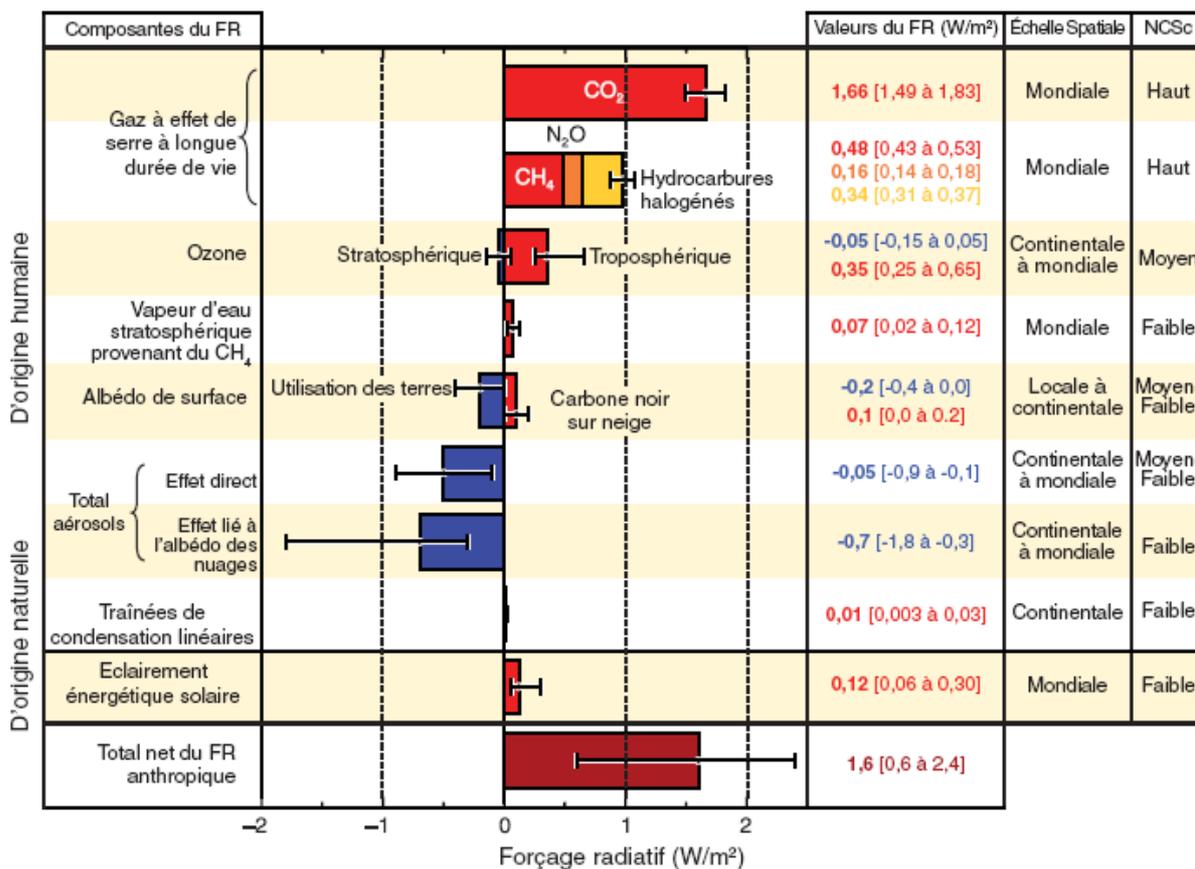


Figure 4-1 : Les différents forçages radiatifs

## 4.2 Sensibilité du climat et rétroactions

La sensibilité du climat à l'équilibre est un indicateur de la réponse du système climatique à un forçage radiatif constant. Elle est définie comme le réchauffement moyen à l'équilibre à la surface du globe sous l'effet d'un doublement de la concentration de CO<sub>2</sub>. Les progrès réalisés depuis le troisième Rapport d'évaluation de l'IPCC permettent d'affirmer qu'elle se situe probablement entre 2 et 4,5 °C, la valeur la plus probable s'établissant à 3 °C environ, et qu'il est très improbable qu'elle soit inférieure à 1,5 °C. Des valeurs nettement supérieures à 4,5 °C ne peuvent être exclues, mais la concordance des modèles et des observations n'est pas aussi bonne pour ces valeurs.

Les rétroactions peuvent amplifier ou atténuer la réponse à un forçage donné. L'émission directe de vapeur d'eau (un gaz à effet de serre) liée aux activités humaines joue un rôle négligeable dans le forçage radiatif. Ainsi, l'augmentation de la concentration de vapeur d'eau dans la troposphère sous l'effet de l'accroissement de la température moyenne à la surface du globe ne représente pas un facteur de forçage du changement climatique, mais elle peut être à l'origine de rétroactions positives qui amplifient le réchauffement. Les variations de la concentration de vapeur d'eau, qui constituent la principale rétroaction influant sur la sensibilité du climat à l'équilibre,

sont aujourd'hui mieux connues qu'à l'époque du troisième Rapport d'évaluation de l'IPCC. Cependant, les rétroactions liées aux nuages restent la plus grande source d'incertitude.

Les rétroactions relatives à l'albédo des glaces de mer ont tendance à renforcer la réponse aux hautes latitudes. De plus, à cause du dépôt de particules carbonées qu'elles subissent, les glaces de la banquise perdent leur pouvoir réfléchissant, ce qui conduit à une modification sensible de l'albédo et une accélération de la fonte des glaces. La conséquence in fine est un accroissement du réchauffement. Celui-ci nuit à la fixation du CO<sub>2</sub> atmosphérique dans les terres émergées et les océans, et augmente indirectement la partie des émissions anthropiques qui reste dans l'atmosphère. Cette rétroaction positive du cycle du carbone renforce l'accroissement des teneurs en CO<sub>2</sub> atmosphérique et entraîne des changements climatiques potentiellement plus importants que les effets directs attendus pour un scénario d'émissions donné. Cependant, l'ampleur de cet effet de rétroaction varie considérablement selon les modèles.

### **4.3 Les effets directs, semi-directs et indirects des aérosols**

En diffusant et absorbant la lumière ou en modifiant le pouvoir réfléchissant des nuages, les aérosols constituent un cas particulier et exercent plusieurs effets sur le climat : direct, semi-direct et indirect.

Les aérosols anthropiques dans leur globalité (essentiellement formés de sulfates, du carbone organique, du carbone élémentaire, de nitrates et de poussières) produisent in fine un effet direct de refroidissement, avec un forçage radiatif direct total de - 0,5 [- 0,9 à - 0,1] W/m<sup>2</sup> et un forçage indirect dû à l'albédo des nuages de - 0,7 [- 1,8 à - 0,3] W/m<sup>2</sup>.

En revanche les aérosols de carbone élémentaire isolé, principalement émis par les processus de combustion, captent l'énergie radiative et la convertissent en chaleur et augmentent sensiblement la température de la masse d'air. L'impact radiatif global serait d'environ +0.2 [+0.05 à +0.35] W/m<sup>2</sup>.

**L'effet direct** n'est autre que l'effet de blocage direct et donc de réflexion du rayonnement solaire. Il réside dans le phénomène de diffusion, éventuellement accompagnée d'absorption, du rayonnement solaire par les particules. La diffusion est l'effet majeur aux longueurs d'ondes solaires, en particulier dans le cas d'aérosols de pollution ; elle est généralement négligeable dans l'infrarouge thermique. Il s'agit d'un effet refroidissant, sauf dans le cas d'aérosols absorbants au-dessus d'une surface très réfléchissante.

Les aérosols qui absorbent de façon plus ou moins importante le rayonnement solaire, modifient les profils de température dans l'atmosphère et, par conséquent, ont un impact sur les conditions de formation des nuages, entraînant leur disparition ou modifiant leur extension géographique. C'est ce qu'on appelle **l'effet semi-direct**.

**L'effet radiatif indirect** des aérosols résulte quant à lui des interactions entre aérosols et nuages, qui ont eux mêmes un impact fort sur le bilan énergétique de la Terre. Ainsi les aérosols peuvent servir de noyaux de condensation lors de la formation des nuages,

de sorte qu'à contenu en eau fixé, un nuage issu d'une masse d'air pollué contient un nombre de gouttelettes supérieur à un nuage moins pollué. Bien que les gouttelettes soient plus petites, un tel nuage sera plus réfléchissant que celui issu d'une masse d'air sans aérosols. C'est le premier effet indirect, refroidissant. Dans un second temps, puisque les gouttelettes sont plus petites, elles n'atteindront pas la taille critique au-delà de laquelle apparaît la précipitation et la durée de vie moyenne du nuage sera augmentée. La couverture nuageuse moyenne sur la Terre sera donc plus importante et plus « protectrice » vis-à-vis du réchauffement. Enfin, en réchauffant l'atmosphère à des niveaux où se forment généralement des nuages, les aérosols peuvent conduire à leur évaporation. L'ensemble de ces processus constitue le deuxième effet indirect des aérosols sur le climat, qui peut être refroidissant ou réchauffant, notamment selon l'altitude du nuage.

#### **4.4 Incertitudes liées aux couplages aérosols/climat dans les modèles climatiques**

Les modèles couplés océan-atmosphère participant à l'IPCC permettent de donner des prévisions d'évolution du climat pour le 21<sup>ème</sup> siècle à l'échelle du globe en prenant en compte les rétroactions de l'évolution de la composition de l'atmosphère, notamment des aérosols, sur le climat. Les différents effets précédemment évoqués sont simulés par des schémas plus ou moins complexes suivant les modèles. **Tous les modèles donnent un forçage radiatif total négatif dû aux aérosols.** La présence d'aérosols (notamment les sulfates) dans l'atmosphère aurait donc un pouvoir refroidissant bienvenu dans une optique de gestion des problèmes liés au changement climatique. Bien entendu le constat inverse est fait lorsque l'on s'attache aux effets sur la santé humaine des aérosols auxquels on attribue plus de 300 000 décès prématurés par an en Europe. **A cause de cette dualité, la question des émissions, de la formation et du transport des particules dans l'atmosphère constitue donc un sujet particulièrement sensible lorsque l'on s'intéresse aux liens entre le changement climatique et la qualité de l'air.** Ce point sera développé lorsque l'on s'intéressera à l'analyse des mesures de réduction des émissions des polluants particuliers (cf. paragraphe 6)

Ainsi il est important de noter les nombreuses incertitudes qui subsistent encore sur la connaissance du couplage entre les concentrations d'aérosols et l'évolution du climat. Les principales lacunes des modèles actuellement disponibles sont listées ci-dessous, pointant les hypothèses sur lesquelles il convient d'être vigilant dans l'analyse des effets des polluants atmosphériques sur le climat:

- Généralement, dans les modèles de climat les espèces suivantes sont prises en compte : sulfate, carbone organique, carbone élémentaire, sels marins, poussières désertiques. Certaines espèces comme les nitrates et l'ammonium ne sont généralement pas considérés dans les modèles de climat, et leurs effets ne sont pas étudiés.
- Le traitement de l'effet indirect nécessite de bien connaître les conditions d'activation des gouttelettes d'eau nuageuse qui résultent d'un processus très dépendant de la composition des aérosols. Ces processus sont pourtant encore mal connus ce qui conduit à des incertitudes dans les modèles.

- Par essence, les émissions de poussières désertiques sont particulièrement difficiles à quantifier ; les modules d'émissions disponibles produisent des résultats très variables et particulièrement sensibles aux variables météorologiques.
- Les émissions d'ammoniac sont très fortement dépendantes des conditions météorologiques. Cette espèce influence la quantité d'aérosol formée notamment près des zones agricoles. Les modèles globaux ne traitent pas de façon dynamique le couplage entre l'évolution du climat et les émissions de NH<sub>3</sub>.
- Les processus de formation des particules sont sensiblement différents d'un modèle à l'autre ; par exemple certains modèles émettent directement des particules de sulfate alors que d'autres traiteront l'acide sulfurique par les processus de condensation, il en résulte des dynamiques de dépôt variables d'un modèle à l'autre et donc un impact radiatif différent.
- La formation des espèces organiques secondaires (AOS) est largement méconnue, les émissions des précurseurs ne sont pas bien quantifiées, les processus de formations sont ultra-simplifiés dans les modèles. De récents travaux scientifiques ont mis en évidence le rôle des espèces primaires organiques (AOP) dans la formation des AOS.
- Récemment il a été mis en évidence que l'augmentation des concentrations en CO<sub>2</sub> pouvait limiter les émissions de précurseurs biotiques (l'isoprène par exemple) et donc la formation d'AOS et ainsi possiblement contrebalancer l'effet de l'augmentation de la température ou du rayonnement qui accroît ces émissions. La façon dont l'équilibre s'organise entre les deux processus est encore mal connue.
- La résolution spatiale des modèles classiquement utilisés est de l'ordre de 1° à 3° à l'échelle du globe, ce qui permet d'accéder à une information très lissée notamment dans les régions fortement urbanisées où les émissions anthropiques sont importantes. Des études sont donc nécessaires pour mieux cerner l'impact des zones fortement urbanisées et des très grandes agglomérations sur le climat régional. Des projets Européens ont été lancés en 2008 sur le sujet (MEGAPOLI et CITIZEN , 7<sup>ième</sup> PCRD).
- Le calcul des bilans radiatifs nécessite auparavant le calcul des propriétés optiques telles que l'épaisseur optique, le facteur d'asymétrie et l'albédo de simple diffusion dues aux particules d'aérosols. Ces propriétés optiques sont très sensibles au modèle de mélange utilisé pour représenter les aérosols. Deux types de mélanges sont généralement utilisés, le mélange interne ou homogène (particules parfaitement mélangées) et les mélange externes (une distribution par espèce chimique). Il n'existe pas de consensus sur le choix de l'une ou l'autre méthode qui peuvent cependant donner des résultats différents. Des méthodes plus récentes dites de « core shell » s'appuient sur une structure plus réaliste des particules d'aérosols et sont en cours de test. Elles devraient à terme améliorer sensiblement la prise en compte des aérosols dans le calcul du bilan radiatif.

L'INERIS a débuté un travail de régionalisation des effets climatiques sur la pollution de l'air et travaille aussi sur l'impact de la prise en compte d'une méthode « core shell » dans le calcul des propriétés optiques des particules. Une première publication dans *Geophysical Research Letter* donne une réponse très claire (et positive) quant à la pertinence de l'utilisation d'une telle méthode lorsqu'elle est comparée aux observations (Figure 4-2, travaux de thèse Laboratoire d'Aérodologie/INERIS : Péré et al., 2009).

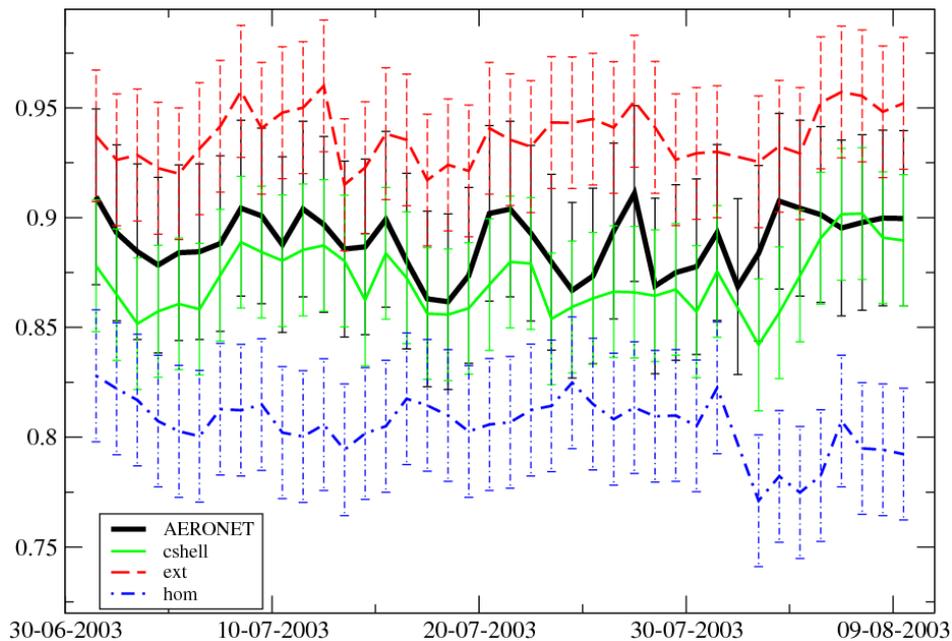


Figure 4-2 : Evolution pour l'été 2003, de l'albédo de simple diffusion pour les trois types de mélange : « core shell », externe et homogène. On voit nettement la capacité du modèle « core-shell » à reproduire plus fidèlement les observations du réseau AERONET.

## 5. Impact du changement climatique sur la pollution atmosphérique

### 5.1 Facteurs d'évolution de la pollution atmosphérique sous l'influence du changement climatique

L'évolution de la qualité de l'air résulte de la combinaison du comportement des émissions et des conditions météorologiques. Les épisodes de pollution apparaissent très souvent lorsque la météorologie devient favorable au dessus ou à proximité des sources d'émission.

La plupart des situations responsables des hausses de concentrations des espèces chimiques est liée à une dynamique atmosphérique qui disperse peu les polluants favorisant leur accumulation au dessus de la surface terrestre. C'est notamment le cas lorsqu'un anticyclone recouvre l'Europe de l'Ouest. Ce cas de figure est la cause principale des épisodes de pollution hivernaux (notamment de particules et de dioxyde d'Azote). A cela, peut s'ajouter une situation également propice à une forte activité physico-chimique, caractérisée par des températures élevées qui conduit à la formation massive de polluants secondaires, tels que l'ozone pour les gaz ou une forte présence de composés organiques secondaires (AOS) dans les aérosols. La conjonction de ces deux conditions induit inmanquablement de forts épisodes de pollution photochimique.

Les changements climatiques énoncés par l'IPCC résultant d'études de modélisation prospectives réalisées au niveau global et régional en incorporant des scénarios d'évolution de la population mondiale promeuvent l'idée d'impacts conséquents sur la qualité de l'air.

En effet, les principaux paramètres météorologiques qui influent la dispersion des polluants vont connaître dans le futur d'importantes variations. Ainsi, la vitesse du vent, la convection, la fréquence et l'intensité des situations anticycloniques évolueront par rapport à ce qu'elles sont actuellement, ce qui influencera la fréquence et la durée d'événements de pollution atmosphérique.

Bien que non exhaustif, le bilan dressé dans les paragraphes 5.1.1 à 5.1.4 fournit des éléments d'appréciation des conséquences possibles du changement climatique sur la pollution atmosphérique et ses effets.

#### **5.1.1. Le cycle de l'eau et la pollution de l'air**

Un important réchauffement au dessus de l'hémisphère Nord aux moyennes latitudes est prévu par quasiment tous les modèles climatiques globaux. Un changement qui s'accompagnera d'une fréquence accrue de vagues de chaleur et qui aura des répercussions sur le cycle de l'eau. En effet, l'évaporation des océans augmentera et perturbera le rythme des précipitations qui sera supérieur en moyenne annuelle aux niveaux actuels sur l'Europe du Nord mais inférieurs sur l'Europe du Sud, reflétant un large contraste Nord-Sud. D'un point de vue général, l'humidité spécifique sera plus importante dans l'air, mais l'humidité relative ne sera pas susceptible de changer énormément, avec toujours une importante variabilité spatiale et saisonnière. Les modèles prédisent une plus grande fréquence d'événements extrêmes en été avec une pluviométrie instantanée très importante, et moins d'épisodes pluvieux en hiver sur le sud de l'Europe<sup>3</sup>.

Aux latitudes de la France, ces évolutions du cycle de l'eau se répercuteront sur l'activité physico-chimique de l'atmosphère, notamment en période estivale. Les dépôts humides seront plus faibles, conséquence de la diminution des événements pluvieux, ce qui signifie que l'atmosphère sera lessivée moins régulièrement, favorisant ainsi l'accumulation des polluants dans la couche limite atmosphérique. La baisse de la couverture nuageuse permettra une activité photochimique plus intense car le filtrage des rayons solaires atteignant le sol sera plus faible qu'actuellement.

L'eau sous forme gazeuse en quantité plus importante dans l'air, interviendra également dans le cycle de formation de l'ozone, vraisemblablement en réduisant la production d'O<sub>3</sub>. Moins de précipitations signifie également une diminution de l'irrigation des sols donc un assèchement de ceux-ci, ce qui est propice à la remise en suspension naturelle de poussières telluriques.

Enfin le dernier effet abordé attribuable au cycle de l'eau est l'augmentation de la convection profonde liée à l'augmentation de la vapeur d'eau et donc de la chaleur latente qui pourrait occasionner une hausse de l'activité orageuse notamment responsable d'émissions de NO<sub>2</sub> en moyenne troposphère.

#### **5.1.2. La circulation grande échelle des masses d'air.**

Les simulations numériques annoncent aussi des perturbations du comportement des dépressions qui constituent le principal facteur de lessivage de l'atmosphère et de

---

<sup>3</sup> Ces conclusions sont à nuancer en fonction de la localisation géographique des zones d'intérêt. Les effets du climat sur le cycle de l'eau auront tendance à « se régionaliser » en fonction des concentrations en polluants atmosphériques et notamment en aérosols présentes dans les différentes zones géographiques considérées et selon les processus directs et indirects (cf §4.3).

transport des polluants à travers l'Europe principalement de l'Ouest vers l'Est. Leur parcours devrait à l'avenir être plus au Nord qu'actuellement, jouant ainsi un rôle sur la ventilation de l'air en France.

Un accroissement des périodes anticycloniques est également prévu par les modèles, avec des situations de blocage météorologique, tel que celui responsable de la canicule de 2003, plus fréquentes sur l'Europe de l'Ouest. Le réchauffement devrait aussi intervenir sur la couche de mélange terrestre dont l'épaisseur devrait être plus importante mais il n'y a pas encore de tendance claire énoncée par l'IPCC à ce sujet.

### **5.1.3. La hausse des températures**

L'ensemble des modèles globaux s'accordent sur la hausse des températures, tout en présentant une plage de valeurs assez variable selon le type de scénario et le modèle considéré. Cette hausse pourrait atteindre 6 °C en 2100.

Or, il s'avère que les projections de l'IPCC pour 2008 sont en deçà de la réalité, ce qui pourrait nous amener à considérer à minima le scénario le plus pessimiste comme réaliste.

De telles hausses de température affecteront inévitablement l'activité chimique et notamment celle de l'ozone via plusieurs paramètres. D'une part, les taux de réaction chimique très dépendant de la température deviendront plus importants, conduisant à une intensification de l'activité chimique. D'autre part, les émissions d'espèces biotiques, dont le rôle est important dans la production d'ozone en zone rurale (et d'aérosols organiques secondaires), augmenteront de manière conséquente, galvanisant la formation d'espèces chimiques secondaires. Ce dernier point s'il est admis depuis plusieurs années, et actuellement remis en question par une étude américaine établissant un lien d'inhibition des émissions biotiques par le CO<sub>2</sub>. C'est-à-dire que la croissance des teneurs en CO<sub>2</sub> dans l'air aurait tendance à contrebalancer l'impact de la hausse de la température sur les émissions de COV naturelles. L'équilibre entre les deux processus fait encore l'objet de travaux de recherche.

### **5.1.4. Les effets liés à l'impact du changement climatique sur les écosystèmes**

La pollution atmosphérique a des effets bien identifiés (acidification, eutrophisation, dommages à la végétation par l'ozone,...) sur les écosystèmes, qui sont également affectés par le changement climatique. Les effets dus à la pollution sont largement étudiés dans le cadre de la Convention sur le Transport des Polluants à Longue Distance de la CEE-NU par le Groupe de travail sur les effets (<http://www.unece.org/env/lrtap/WorkingGroups/wge/welcome.html>) qui publie régulièrement sur ces sujets. Un domaine plus récent d'investigation est l'analyse de la façon dont les manifestations du réchauffement climatique peuvent affecter les écosystèmes et les conséquences (généralement une amplification) sur les effets connus de la pollution atmosphérique. On peut lister par exemple :

- Les évènements exceptionnels :
  - Tempêtes : dans les régions côtières, elles amènent des sels marins qui génèrent des pics d'acidification.
  - Sécheresses suivies d'inondations : Elles génèrent des pics de sulfates dans les eaux qui conduisent à l'acidification des milieux.
  - Sécheresse et diminution de l'humidité des sols : favorisent l'érosion des sols et la formation de particules telluriques.

- Températures plus élevées :
  - Elles favorisent la croissance et le développement des végétaux ravageurs, déjà amplifiés par une augmentation des concentrations de nitrates dans les plantes (effets d'eutrophisation). Ces effets perdureront jusqu'au retour à une situation où l'azote deviendra à nouveau élément limitant la croissance des plantes. Il en résulte que le changement climatique peut conduire à une situation où la disponibilité de l'azote limite la séquestration du carbone.
  - Elles favorisent la nitrification et la minéralisation dans les sols et donc le lessivage d'azote inorganique.
  - Elles conduisent à moins de précipitations neigeuses et donc une plus faible isolation des sols qui deviennent, paradoxalement, plus froids en hiver. Le lessivage des nitrates du sol en est augmenté, ce qui conduit à de plus fortes concentrations de nitrate dans les eaux et des problèmes potentiels d'acidification et d'eutrophisation.
  - Une couverture neigeuse plus faible et présente sur une période hivernale réduite conduit également à un stock d'azote déposé plus faible sur la neige. Lors de la fonte des neiges, le pic de nitrate habituellement observé est alors réduit.
- Inondations :
  - Elles conduisent à des perturbations du flux des rivières et à la destruction des refuges des invertébrés, premières espèces recolonisant le milieu après des périodes d'acidification.

## ***5.2 Quantification possible des effets en terme de niveaux de polluants atmosphériques***

Les premières études menées par l'INERIS sur ce sujet ont été réalisées en collaboration avec l'ICTP (International Centre for Theoretical Physics, Unesco/AIEA) en charge d'études sur le changement climatique. Le travail entrepris a été de coupler le modèle CHIMERE de prévision de la qualité de l'air utilisé dans la plateforme Prev'Air avec des prédictions climatiques pour la fin du XXIème siècle et de les analyser au regard des conditions présentes. Cette étude a été menée sous des hypothèses fortes, car les émissions futures de polluants atmosphériques étaient considérées égales à celles de la situation présente et les flux de polluants atmosphériques entrant en Europe ne subissaient pas de variations entre présent et futur. L'objectif de telles contraintes était d'isoler l'impact du réchauffement climatique sur la qualité de l'air sans prendre en compte l'effet de possibles scénarios de réductions d'émission des PA ou encore une évolution de l'activité mondiale qui auraient changé les composantes d'import de PA en Europe drastiquement.

Sous ces conditions, l'évolution climatique conduit à une importante augmentation des niveaux d'ozone lors des périodes estivales, menant à une croissance moyenne des pics journaliers en Europe de l'Ouest par rapport au niveau actuel de l'ordre de 25 à 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  selon le scénario climatique IPCC pris en compte.

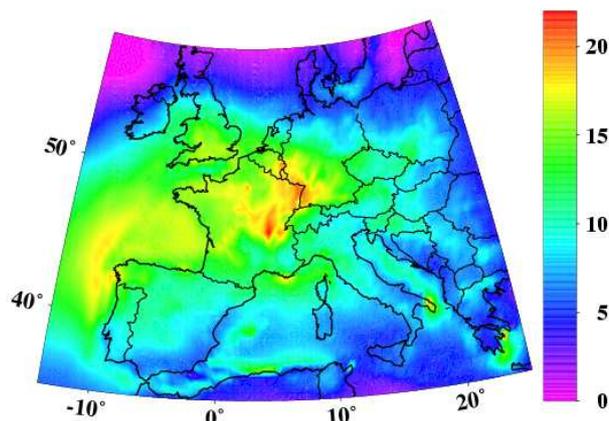


Figure 5-1 : Différence (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) entre les moyennes passées (1960-1990) des pics d’ozone journaliers estivaux et les moyennes futures (2070-2100).

A l’échelle de l’Europe, la France apparait fortement touchée par l’accroissement des concentrations, ce qui se traduit également par un nombre de dépassements des seuils d’information ( $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) et d’alerte ( $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) beaucoup plus fréquent qu’actuellement (voir figure 5-2). Outre cet aspect sur la fréquence, la persistance des épisodes d’ozone est aussi accrue. En conséquence, les résultats obtenus attestent que les fortes concentrations d’ozone relevées durant l’été 2003 pourraient devenir « normales » à la fin de ce siècle.

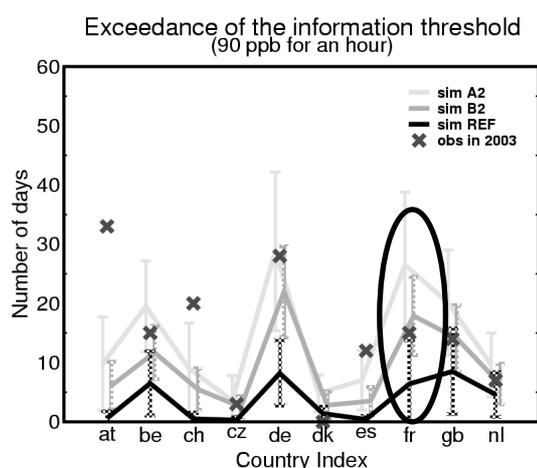


Figure 5-2: Nombre moyen de jours avec dépassements du seuil de  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les conditions actuelles (1960-1990 en noir), les conditions de l’été 2003 (croix noires), et les conditions futures selon les scénarios A2 (en gris clair) et B2 (en gris foncé) de l’IPCC, avec leurs variabilités interannuelles (barres verticales superposées).

Concernant les particules, les changements sont à considérer saison par saison car les processus incriminés varient en cours d’année.

Dans les mêmes conditions que précédemment, les prédictions numériques affichent une décroissance des moyennes journalières de PM10 en hiver de quelques microgrammes par mètre cube, certainement sous l’effet de températures futures plus douces défavorisant le développement des aérosols par exemple en augmentant

l'évaporation du nitrate d'ammonium. La dynamique atmosphérique et notamment l'épaississement de la couche limite terrestre jouerait également un rôle en favorisant la dispersion des polluants évitant ainsi leur accumulation à proximité de la surface.

**A contrario, l'été**, les changements climatiques prévus engendreraient une augmentation des teneurs en PM10 de plusieurs  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pouvant aller jusqu'à  $5\text{-}6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en France. La hausse de la température a en période estivale un impact opposé à son rôle hivernal en intervenant fortement sur la formation des aérosols organiques secondaires notamment ceux ayant l'isoprène comme précurseur. Elle affecte également la faculté d'érosion des sols, surtout associée à la baisse des événements pluvieux, en augmentant le potentiel d'émission des poussières telluriques lié à l'assèchement des sols.

Ces conséquences sont illustrées par la figure 5-3.

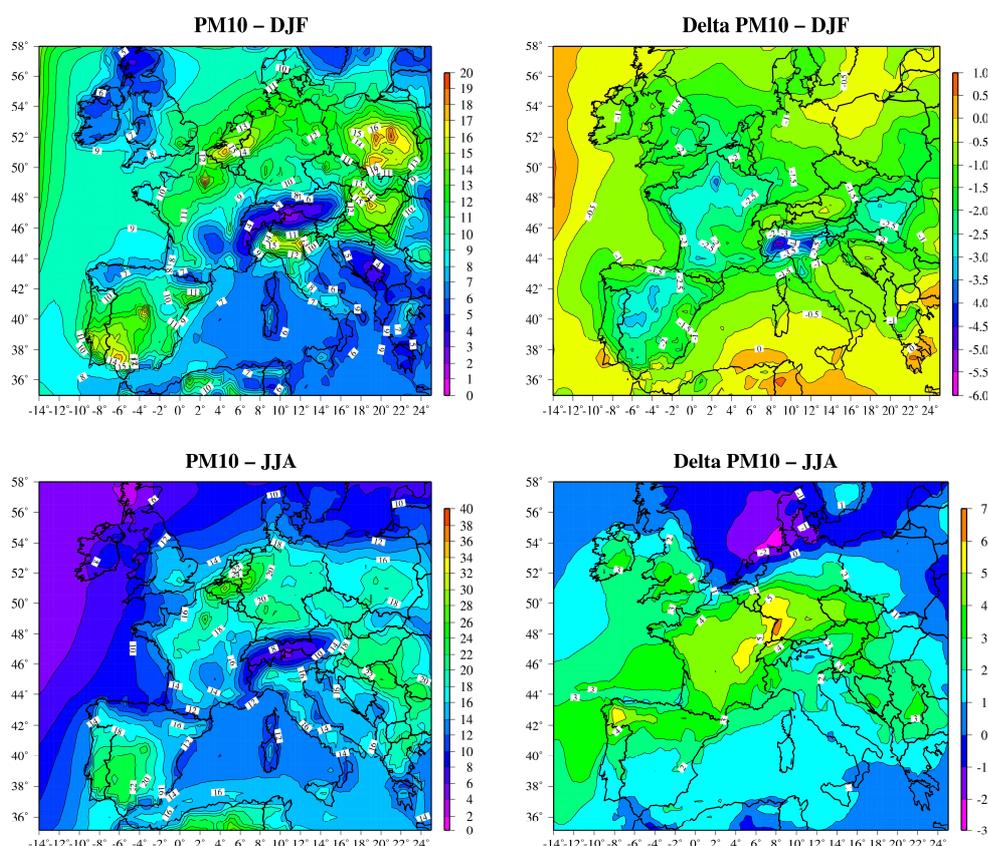


Figure 5-3 : Concentrations moyennes journalières ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de PM10 actuelles (à gauche) et leurs variations simulées pour 2070-2075 (à droite), respectivement en hiver (haut) et été (bas), selon le scénario A2 de l'IPCC.

L'INERIS poursuit ces travaux étudiant la relation entre le climat et la qualité de l'air, à travers plusieurs projets de recherche (programme 189, 7<sup>ième</sup> PCRD) avec des protocoles de simulation dont le réalisme a évolué car fixés pour des échéances moins lointaines (2020-2050). Les enjeux maintenant sont de mieux cerner les émissions futures et donc de les intégrer dans les plateformes de modélisation climat-qualité de l'air tout en y adjoignant des conditions aux limites aux frontières de l'Europe plus vraisemblables fournies par des modèles globaux couplant climat et qualité de l'air.

Enfin, il faudra également à terme intégrer les rétroactions de la qualité de l'air sur le climat telles qu'identifiées dans le paragraphe 4. A l'heure actuelle ce couplage réciproque n'est pas opérationnel dans les modèles et demeure un sujet de recherche.

## 6. Synergies et antagonismes entre lutte contre le changement climatique et lutte contre la pollution atmosphérique

### 6.1 Considérations méthodologiques générales

Les aspects scientifiques de la question des liens entre le changement climatique et la pollution atmosphérique ayant été posés dans les paragraphes précédents, il s'agit maintenant d'analyser les effets des mesures de lutte contre le réchauffement sur la pollution atmosphérique dans les basses couches de l'atmosphère, et réciproquement. Les travaux menés sur le sujet démontrent l'évidence de l'intérêt de développer une vision générale et intégratrice qui prenne en compte les synergies et les antagonismes possibles vis-à-vis de chacun des problèmes (EEA, 2004 et 2006 ; AQEG, 2007).

Dans cette section du rapport, un ensemble de mesures de lutte contre la pollution atmosphérique et/ou contre le réchauffement climatique est identifié et ces mesures listées. Elles résultent des informations rassemblées dans les programmes nationaux et locaux de lutte et d'adaptation contre la Pollution Atmosphérique (PNRPA, PPA) et le Changement Climatique (Plan Climat), de la stratégie nationale de Développement Durable (SNDD), du projet de loi « Grenelle ». Pour chaque mesure, une analyse de leur degré de synergie PA/CC est proposée et commentée. L'objectif étant d'évaluer à terme les programmes français, on s'est essentiellement intéressé à leur contenu, mais des mesures de programmes d'autres pays de l'Union Européenne, et certaines mesures provenant d'autres sources d'information (documents BREF) ont toutefois également été prises en compte.

Certaines difficultés méthodologiques ont été identifiées :

- 1) Pour estimer rigoureusement le degré de synergie, on devrait prendre en compte plusieurs facteurs :
  - la réduction annuelle des émissions de polluants (pour la PA et pour le CC), à la fois en termes de variations relative et en termes de baisse absolue
  - la pérennité des réductions d'émissions dans le temps
  - l'impact sur la qualité de l'air locale.Pour établir le présent rapport, seules les baisses d'émissions ont été prises en compte, et ces considérations feront l'objet d'études ultérieures pour une sélection de mesures.
- 2) Nous n'avons pas étudié les mesures de sensibilisation et d'éducation au changement climatique, qui sont nombreuses dans le Plan Climat ou la SNDD. Elles sont pour la plupart bénéfiques pour la pollution atmosphérique locale, mais leur efficacité est difficile à estimer.
- 3) Rigoureusement, pour évaluer l'effet d'une mesure sur la pollution atmosphérique ou le changement climatique, il faudrait prendre en compte l'ensemble des filières impactées et de leur cycle de vie. Par exemple, pour des nouveaux équipements anti-pollution atmosphérique, comme l'équipement d'une centrale thermique existante en dispositifs de filtration des particules, les

émissions liées à la construction de l'équipement devraient être prises en compte. Pour le renouvellement d'équipements existants (par exemple remplacement d'une flotte de véhicules par des véhicules « propres »), la question est à la fois celle des émissions liées aux destructions des véhicules anciens et à la fabrication de nouveaux véhicules d'une part, et est d'autre part celle de savoir comment comptabiliser ou non les émissions qui auraient eu lieu de toute façon (puisque un certain renouvellement des véhicules a lieu de toute façon). Ces questions sont trop complexes, et les données nécessaires (c'est à dire pour l'analyse du cycle de vie) trop rares, pour pouvoir être prises en compte. Cependant, lorsque des études existantes le permettaient, des éléments qualitatifs sont fournis.

Différents types de mesures visant une réduction d'émissions et/ou de gaz à effet de serre ont été étudiés :

- Les techniques empêchant la formation d'émissions à la source (**mesures primaires**) par opposition à celle traitant les émissions à l'aval des procédés qui les génèrent (**mesures 'end-of-pipe'**),
- Des améliorations d'efficacité permettant de maintenir un même niveau d'une activité en utilisant moins de ressources et en créant moins d'émissions,
- Des substitutions de combustibles ou carburants, par des combustibles ou carburants moins polluants,
- Des réductions de la demande d'un produit ou d'un service,
- Des changements de comportement substituant par exemple une activité plus polluante par une activité moins polluante (e.g. changement modal du transport individuel vers le transport collectif).

Avant d'aborder les évaluations individuelles de chaque mesure dans des tableaux sectoriels (sections suivantes), on donne ici quelques indications générales sur les degrés de synergie et d'antagonisme pour certains types de mesures en général :

Les mesures basées sur l'amélioration de l'efficacité de procédés, et celles basées sur une réduction de la demande sont les plus susceptibles d'avoir des bénéfices conjoints pour la pollution atmosphérique et le changement climatique.

Certains types de mesures sont susceptibles de déplacer les émissions liées à l'utilisation vers des émissions dans la phase de production d'une technologie ou d'un produit (e.g. biocombustibles). Il serait alors important de tenir compte des émissions sur l'ensemble du cycle de vie.

Pour toute mesure qui affecte l'utilisation de l'électricité, les impacts dépendent de la façon dont l'électricité est produite, c'est-à-dire sur la base de quels combustibles ou énergies. Ce paramètre, incertain sur le long terme, affecte l'évaluation que l'on peut faire de la mesure. Dans cette étude, nous prenons en compte le mix énergétique actuel de la France.

Le développement des énergies renouvelables et du nucléaire ont pour objectif premier la lutte contre le changement climatique plus que la pollution atmosphérique.

Leur effet sur la PA, qui peut être important, mais se fait indirectement par effet de substitution. Nous focalisons cette première version du rapport sur les mesures ayant des effets directs en termes de CC et de PA, et donc nous les étudierons ultérieurement.

Dans le domaine du transport et de l'énergie, nous avons évalué les mesures individuellement. Ces évaluations sont parfois incertaines, car l'efficacité d'une mesure peut fortement dépendre des autres mesures prises conjointement dans ce domaine. Par exemple, les mesures encourageant à prendre les transports collectifs ne peuvent être efficaces que si une mesure d'amélioration de leur offre est prise conjointement. Autre exemple : la désulfuration des carburants peut être vue comme une mesure conduisant à augmenter les émissions de CO<sub>2</sub> des raffineries, mais, conjointement avec une mesure d'introduction d'énergies renouvelables sur les raffineries, le bilan de la mesure est changé.

## **6.2 Secteur de l'énergie**

Mesure / instrument (Origine de la mesure)	Description	Effet sur l'émission de PA	Effets sur l'émission de GES	Conclusion
<b>Mesures « End of Pipe »</b> <sup>(2)</sup>				
<b>Capture du CO<sub>2</sub></b> <sup>(1)</sup> (SNDD)	<p>Post-combustion (extraction à l'aide de solvants)</p> <p>Oxy-combustion (non opérationnelle)</p> <p>Pré-combustion (non opérationnelle, conversion du combustible en un gaz de synthèse)</p>	<p>↓SO<sub>2</sub> qui est éliminé comme impureté par l'unité de post-combustion ↑ NH<sub>3</sub> par dégradation des solvants</p> <p>↓éventuelle des NO<sub>x</sub> et des PM pour les mêmes raisons ↑ éventuelle des NO<sub>x</sub> du fait d'une plus grande consommation d'énergie pour le procédé et le transport du CO<sub>2</sub></p>	<p>↓ CO<sub>2</sub> (80-90% des émissions d'une installation sans capture évitées) par définition malgré les pénalités d'efficacité</p>	<p>Mesure difficile à classer. Certains experts la considèrent plutôt comme une mesure gagnant/gagnant in fine, malgré les nuances à apporter sur la perte d'efficacité et le besoin de traitements complémentaires (NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>).</p> <p>Son efficacité dépendrait du type d'installation : pénalité d'efficacité plus élevée pour les centrales à charbon que pour les centrales à gaz (40 à 10% d'énergie supplémentaire requise).</p> <p>En attente (2025) des performances futures des procédés d'oxy-combustion et de pré-combustion.</p>
<b>Désulfuration des gaz (FGD)</b>	Capture du SO <sub>2</sub>	<p>↓ SO<sub>2</sub> (80-95% de réduction dans les procédés secs, 89-92 % dans les procédés humides) ↓ PM</p>	<p>↑ CO<sub>2</sub> car augmentation de la consommation d'électricité (2% environ) et production de CO<sub>2</sub> nette avec les procédés utilisant des panaches humides et du calcaire</p>	<p>Mesure à effets antagonistes : réduction des émissions de PA au détriment des émissions de CO<sub>2</sub></p>
<b>Réduction Catalytique Sélective (SCR)</b>	Réduction des NO <sub>x</sub> par injection	<p>↓NO<sub>x</sub> (80-90% de réduction) ↑ NH<sub>3</sub> par définition</p>	<p>↑ N<sub>2</sub>O par production à partir</p>	<p>Mesure à effets antagonistes Toutefois, selon le 'BREF</p>

	d'ammoniac		des NOx ↑ CO2 car augmentation de la consommation d'électricité	Economic and Cross-Media », malgré cet antagonisme, le bilan environnemental global de la SCR peut être positif dans certains cas.
<b>Réduction Catalytique non Sélective (SNCR)</b>	Réduction des NOx par injection d'ammoniac ou d'urée	↓ NOx (40 - 70%) de réduction ↑ NH3 par définition	↑ N2O par production	Mesure à effets antagonistes Toutefois, selon le 'BREF Economic and Cross-Media », malgré cet antagonisme, le bilan environnemental global de la SCR peut être positif dans certains cas.
<b>Mesures primaires</b>				
<b>Réduction de l'excès d'air</b>	Réduction des émissions de NOx par réduction de l'oxygène présent dans la zone de combustion	↓ NOx, SO2 risque de combustion incomplète et de formation d'imbrulés dans les cendres (e.g. carbone et particules carbonées) et de CO	Pas besoin d'énergie supplémentaire	Mesure plutôt sans effets antagonistes, mais pas non plus synergiques
<b>Bruleurs bas-NOx</b>	Réduction des émissions de NOx via une modification de l'introduction de l'air dans le combustible, retardant ainsi leur mélange, réduisant la disponibilité d'oxygène et réduisant la température de la flamme	↓ NOx (20 à 60 % selon le procédé) Risque de formation de CO et d'imbrulés solides	Possible ↑ CO2 à cause d'une augmentation de la consommation d'énergie si recirculation des gaz de combustion externe	Pas de réelle synergie. Effets antagonistes possibles sous certaines conditions.
<b>Recirculation des fumées</b>	Réduction des émissions de NOx via une réduction de l'oxygène présent	↓ NOx	Risque ↑ CO2 lorsque des quantités excessives des gaz sont mises	Pas de réelle synergie. Effets antagonistes possibles sous certaines conditions

	dans la zone de combustion et une réduction de la température de flamme		en recirculation à cause d'une augmentation de consommation d'énergie pour les ventilateurs	
<b>Reburning (combustion étagée)</b>	Réduction des émissions de NOx par création de différentes zones de brûlage dans le four, et injection étagée de combustibles et d'air. La mesure vise une réduction des oxydes d'azote	↓ NOx Risque de formation de cyanure d'hydrogène (HCN) et d'ammoniac (NH3) Risque de combustion incomplète qui peut être réduit en utilisant du gaz comme combustible, et en appliquant la mesure dans des chaudières ayant un long temps de résidence	↑ CO2, possibilité de surconsommation de combustible secondaire	Pas de réelle synergie des mesures, effets antagonistes possibles
<b>Réduction du préchauffage de l'air</b>	Réduction des émissions de NOx via une réduction de la température de flamme dans la zone de combustion	↓ NOx	↑ CO2 ; risque d'augmentation de la consommation de combustibles car une plus grande partie de l'énergie thermique dans les gaz ne peut pas être utilisée et finit par s'échapper via les cheminées. Ce risque peut être réduit en utilisant des méthodes de conservation d'énergie	Mesure à effets potentiellement antagonistes
<b>Moyens de production et combustibles</b>				

<p><b>Utilisation de la biomasse<sup>(3)</sup></b> (Plan Climat)</p>	<p>Réduction des émissions de carbone par substitution des énergies fossiles par l'énergie de la biomasse</p> <p>Combustion combinée : remplacement du charbon</p> <p>Combustion combinée : remplacement du gaz</p>	<p>Effets mitigés et souvent négatifs ; ↑ PM avérée et éventuellement d'autres polluants atmosphériques. Les effets dépendent du type et origine de la biomasse et des installations dans lesquelles ils sont utilisés</p> <p>↓ SO2 et autres polluants atmosphérique car teneur en soufre généralement plus faible que celui du charbon et si installations équipées de systèmes sophistiquées de réduction des émissions</p> <p>↑ pollution atmosphérique, sous l'hypothèse que les techniques de réduction des émissions installées sur ce type d'installations sont moins performantes pour gérer les émissions de polluants</p>	<p>↓ CO2</p>	<p>Mesure à effets plutôt antagonistes qui peuvent être réduits par l'utilisation de procédés très performants et donc onéreux</p>
<p><b>Utilisation du bois thermique<sup>(4)</sup></b> (Plan Climat)</p>	<p>Combustion du bois dans des appareils domestiques</p>	<p>↑PM, HAP, COVNM, NOx, dioxines et furannes qui dépend du type d'installation et de bois utilisés</p>	<p>↓ CO2 Neutre en carbone si la filière de bois est prise en compte. Par contre, l'effet de l'augmentation des émissions des COV qui sont des précurseurs de l'ozone est à déduire du bilan de</p>	<p>Mesure antagoniste : réduction des émissions de CO2 au détriment des PA.</p> <p>Le degré d'antagonisme dépend du combustible substitué, du type de bois et du type d'installation</p>

			gaz à effet de serre.	
<b>Charbons à faible teneur en soufre (PPA)</b>	Réduction des émissions de SO2 par substitution de combustible	↓ SO2  Si ce charbon est importé de pays plus éloignés, l'impact du transport supplémentaire pourrait être négatif	Si ce charbon est importé de pays plus éloignés, l'impact du transport supplémentaire pourrait être négatif	Mesure a priori sans effet synergique  Autres effets : Possibilité de modification de cendres pour des charbons de teneur en soufre inférieure à 4%, ce qui pourrait affecter le rendement des dépoussiéreurs électrostatiques et entraîner le besoin d'un traitement de conditionnement par agent chimique (ammoniac, ...) des cendres en amont du dépoussiéreur
<b>CHP - Production combinée électricité-chaaleur</b>	Méthode de haute efficacité de génération de l'électricité et de chaleur	Potentiel de ↓ PA (dépend des combustibles utilisés)	↓ CO2	Mesure à potentiel synergique Nécessite une demande locale de chaleur (proximité de procédés industriels ou zones résidentielles)
<b>IGCC - Centrale à cycle combinée à gazéification intégrée</b>	Combustion de charbon à haute efficacité utilisant un réacteur pressurisé	↓ SO2 (réduction 90 - 99%) ↓ NOx (70-80% en dessous des émissions centrales à charbon classiques) ↓ PM	↓ CO2	Mesure à potentiel synergique Production d'un gaz de synthèse (mélange de CO, H2, CO2)
<b>Réseaux de distribution</b>				
<b>Réduction des émissions des réseaux de gaz (Plan Climat 2004-2012)</b>	Réduction des émissions via une réduction des fuites du réseau de distribution de gaz naturel	Effet négligeable a priori	↓ GES (notamment CH4)	Mesure a priori sans synergies importantes, ni antagonismes
<b>Actions sur la demande d'énergie</b>				
<b>Consommation des appareils</b>	Réduction de la consommation des	↓ de polluants atmosphériques (émissions évitées lors de la	↓ de GES (émissions évitées lors de la	Mesure gagnant-gagnant

<b>électroménagers</b> <sup>(5)</sup> (Plan Climat 2004-2012)	appareils (exclure du marché les équipements les plus consommateurs, suppression du mode veille des appareils, ...)	production d'électricité et dues à la réduction de la consommation)	production d'électricité et dues à la réduction de la consommation)	
<b>Certificats d'économie d'énergie</b> (Plan Climat 2004-2012)	Dispositif obligeant les fournisseurs d'énergie à réaliser des économies d'énergie (ou à les faire réaliser par leurs clients) pour lesquelles ils obtiennent des certificats  Des certificats peuvent également être obtenus pour une substitution d'une source énergétique non renouvelable par une source renouvelable	↓ de polluants atmosphériques liés à la production et utilisation d'énergie via une économie d'énergie  ↑↓ PA	↓ de GES liés à la production et utilisation d'énergie via une économie d'énergie  A priori ↓ CO2	Mesure gagnant-gagnant dans la mesure où les certificats amènent à une économie d'énergie  Mesure à effets potentiellement antagonistes (e.g. dans le cas d'un développement de la biomasse/du bois comme source d'énergie)
<b>Fiscalité de l'énergie en fonction du contenu carbone</b> (Plan Climat 2004-2012)	Taxation des énergies en fonction de leur contenu en carbone	↓ PA si l'instrument incite à l'utilisation plus efficace de l'énergie  ↑ potentielle de PA si l'instrument incite à des substitutions de combustibles	↓ CO2	Mesure à effets potentiellement antagonistes (par exemple si l'instrument augmente le recours aux biocarburants ou à la biomasse)

		(par exemple par de la biomasse)		
<b>TVA réduite pour les abonnements aux réseaux de chaleur</b> <i>(Plan Climat 2004-2012)</i>	Ramener le taux de la TVA pour les réseaux de chaleurs au même taux que pour le gaz et l'électricité  Le taux réduit de TVA s'applique également aux fournitures de chaleur provenant de 50% au moins de la biomasse, de la géothermie, des déchets, de l'énergie de récupération	↑ potentielle de PA si l'instrument contribue au développement des réseaux de chaleur sur la base de bois (dépend également du type d'énergie remplacé par du bois)  ↑ potentielle de PA également dans la mesure où la réduction de la facture de chauffage augmente la consommation d'énergie (possibilité d'effets du type 'rebond')	↓ CO2 a priori  ↓ des GES mais ↑ potentielle si il y a un effet « rebond » (la réduction de la facture de chauffage augmente la consommation d'énergie)	Mesure à effets potentiellement antagonistes

(1) Il y a trois types de procédés de capture de CO<sub>2</sub> (EGTEI, 2008), (Hammingh et al, 2008) :

- Les procédés de post combustion : il s'agit d'extraire le CO<sub>2</sub> qui est dilué dans les gaz de combustion. Des solvants sont utilisés pour la capture du CO<sub>2</sub>. Les solvants qui seront probablement le plus utilisés sont des solvants chimiques, comme des amines. D'autres solutions de capture post combustion consistent en l'absorption, l'adsorption, l'antisublimation et l'utilisation de membranes.
- Le procédé d'oxy-combustion : il s'agit de brûler un combustible dans de l'oxygène et des gaz de combustion recyclés. Les gaz produits par ce procédé consistent principalement en de l'eau et du CO<sub>2</sub>, qui peut être facilement séparé.
- Les procédés de précombustion : il s'agit d'une conversion (gazéification et oxydation partielle) d'un combustible en un gaz de synthèse (monoxyde de carbone et hydrogène) qu'on fait ensuite réagir avec de la vapeur afin de convertir le CO en CO<sub>2</sub>. Le CO<sub>2</sub> est ainsi concentré et peut être séparé par des absorbants physiques.

Seuls les procédés de post combustion sont actuellement disponibles et testés dans des pilotes de petite taille. Des grandes installations pilotes sont planifiées pour 2015. La mise en place à grande échelle est jugée possible vers 2020-2025.

D'autres effets indirects de la capture : a) Risque de prolongation de l'exploitation du charbon au détriment d'un développement d'énergies alternatives et renouvelables, b) l'effet bénéfique de cette technologie sur les émissions de GES dépend de l'hypothèse d'absence de fuites de carbone durant le stockage et d'effets négatifs sur le sous-sol, ce qui est, à l'heure actuelle, encore incertain.

**(2) Remarque sur les mesures « end of pipe » :**

Les mesures du type 'end-of-pipe' utilisées dans le secteur des centrales sont à la source de pertes d'efficacité de production d'électricité ('pénalité d'efficacité') lorsqu'elles consomment elles-mêmes de l'énergie.

Les effets antagonistes associés, aussi bien sur les gaz à effet de serre que sur les polluants atmosphériques, dépendront du type de technologie de réduction des émissions, et des installations dans lesquelles la quantité supplémentaire d'énergie est produite afin de compenser les pertes d'efficacité dues à l'installation de la technologie de réduction des émissions.

L'ampleur de la pénalité d'efficacité dépendra également du niveau de dépollution visé, et sera différente par exemple entre les systèmes de désulfuration des gaz (FGD) et la réduction catalytique sélective (SCR). Barrett & Holland (2008) constatent qu'une combinaison de techniques peut parfois amener à une pénalité d'efficacité moins importante - et coûter moins cher - que l'utilisation d'une seule technologie (e.g. la combinaison de 50% de réduction par des brûleurs bas NOx avec une réduction de 90% par SCR conduisant à une réduction de 95%, au lieu de la seule utilisation d'une SCR à efficacité de 95%).

**(3) Remarques sur l'utilisation de la biomasse :**

L'intérêt principal d'un remplacement d'énergies fossiles par des biocombustibles est la réduction des émissions de carbone. Les effets sur la pollution atmosphérique sont mitigés et souvent négatifs. Le bilan de l'utilisation des biocombustibles dépend de leur type et origine et des installations dans lesquelles ils sont utilisés.

Selon l'origine on distingue :<sup>4</sup>

- le bois : bûches, granulés et plaquettes;
- les sous-produits de la filière bois : l'ensemble des déchets produits par l'exploitation forestière (branchage, écorces, sciures...), par les scieries (sciures, plaquettes...), par les industries de transformation du bois (menuiseries, fabricants de meubles, parquets) et par les fabricants de panneaux ainsi que les emballages tels que les palettes;
- les sous-produits de l'industrie : tels les boues issues de la pâte à papier (liqueur noire) et les déchets des industries agroalimentaires (marcs de raisin et de café, pulpes et pépins de raisin etc.);

---

<sup>4</sup> [http://www.industrie.gouv.fr/energie/renou/biomasse/se\\_biom.htm](http://www.industrie.gouv.fr/energie/renou/biomasse/se_biom.htm)

- les produits issus de l'agriculture traditionnelle : résidus tels que la paille, la bagasse (résidus ligneux de la canne à sucre) et les nouvelles plantations à vocation énergétique telles que les taillis à courte rotation (saules, miscanthus, etc);
- les déchets organiques : tels que les déchets urbains comprenant les boues d'épuration, les ordures ménagères, et les déchets en provenance de l'agriculture tels que les effluents agricoles.

La valeur calorifique des bioénergies est généralement faible par rapport à celui des sources fossiles ce qui impacte sur l'efficacité énergétique. Pour cette raison l'Air Quality Expert Group (2007) conseille de les utiliser dans des installations de cogénération, ainsi utilisant également la chaleur générée par leur combustion. En revanche, de telles installations ont besoin d'être situées en proximité des zones résidentielles, ce qui augmente le risque d'exposition aux polluants atmosphériques émis. Pour les Pays-Bas, Hammingh et al (2008) concluent que la combustion combinée de la biomasse dans des grandes installations à charbon peut avoir un impact positif sur la pollution atmosphérique car la teneur en soufre de la biomasse est généralement plus faible que celle du charbon. De plus, ces centrales sont généralement équipées de systèmes sophistiqués de réduction des émissions, donc l'impact sur les niveaux de pollution atmosphérique est généralement limité. En revanche, une substitution de gaz naturel par de la biomasse est susceptible d'augmenter les émissions atmosphériques. Cependant les techniques de réduction des émissions généralement implantées sur ce type d'installations sont aujourd'hui moins performantes pour gérer les gaz qui se trouvent plus chargés de polluants lorsque des biocombustibles ou de la biomasse sont utilisés.

L'augmentation de l'utilisation de la biomasse ou des biocombustibles dans des petites installations de combustion risque également d'augmenter la pollution atmosphérique. Pour ce type d'installations les valeurs limites d'émissions sont relativement moins strictes que pour les grandes installations. Dans ce contexte, le développement et l'utilisation d'appareils domestiques de chauffage au bois performants est crucial afin de ne pas augmenter la pollution atmosphérique.

<sup>(4)</sup> **Remarques sur l'utilisation du bois-thermique :**

La combustion de bois est à la source de forts effets antagonistes.

Le bois-énergie aurait l'avantage environnemental principal d'être neutre en termes de gaz à effet de serre, hypothèse qui devrait encore être confirmée si l'on prenait en compte les rejets de l'ensemble de la filière bois. En revanche, il est à la source d'autres polluants, et représente souvent une part significative des émissions dans l'atmosphère pour certains paramètres : des particules, des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et des dioxines et furannes (Richert, 2007).

La combustion de bois dans des appareils domestiques est à la source également d'émissions de COVNM et de NOx. Les émissions de particules et de COV dépendent fortement des conditions de combustion (température, ...), du type de bois utilisé et du type des appareils (EGTEI, 2005).

Une étude italienne (Caserini et al, 2007) montre l'importance du chauffage au bois comme source de PM<sub>2,5</sub> et des émissions toxiques (par exemple HAP) en Italie. Cette étude supporte les hypothèses du groupe EGTEI sur les facteurs d'émission qui dépendraient fortement du type d'installation et du type de bois utilisés, notamment pour les polluants suivants : PM<sub>10</sub>, COV, CO, HAP, dioxines, et dans une moindre mesure, pour les NOx.

**(5) Remarque sur la Consommation des appareils électroménagers**

Le Plan Climat (2004) vise une réduction de la consommation de tout appareil consommant de l'énergie, comme des appareils électroménagers ou audiovisuels. Dans ce but, la France soutient la Directive 2005/32/CE dite 'écoconception'<sup>5</sup> ayant pour but d'améliorer la performance environnementale du produit concerné et de prendre en compte des aspects environnementaux dès la conception des produits. Plus précisément, le Plan Climat propose d'exclure progressivement du marché les équipements les plus consommateurs (par exemple, les appareils de catégories F et G de chaque famille, les luminaires avec mauvais rendement d'éclairage...). Il évoque également les réductions possibles des consommations d'électricité des appareils en mode veille.. De telles mesures sont a priori des options gagnant-gagnant pour la pollution atmosphérique et le changement climatique. En réduisant la consommation d'électricité, tout polluant émis dans la production d'énergie sera réduit.

---

<sup>5</sup> Directive 2005/32/CE du Parlement européen et du Conseil, du 6 juillet 2005, établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicables aux produits consommateurs d'énergie et modifiant la directive 92/42/CEE du Conseil et les directives 96/57/CE et 2000/55/CE du Parlement européen et du Conseil.

### **6.3 Secteur du transport : transport routier et engins non routiers**

Mesure / instrument	Description	Effet sur l'émission de PA	Effets sur l'émission de GES	Conclusion
<b>Mesures techniques sur les véhicules</b>				
<b>Nouveaux moteurs</b> (Plan Climat 2004 - 2012)	Réduction des émissions de CO2 via un progrès de la motorisation	↑↓PA selon le type de technologie adopté	↓CO2	Effets synergiques non garantis et même potentiellement antagonistes car les liens entre les émissions de CO2 et celles des polluants atmosphériques (notamment PM, NOx et COVNM) sont très variables et complexes pour les moteurs de VP et de PL <sup>(1)</sup>
<b>Huiles moteur à faible viscosité</b> (Plan Climat 2004 - 2012)	Réduction de CO2 via une réduction de la consommation de carburant (de l'ordre 2 % possible)	↓ PA lié à la réduction de la consommation de carburant	↓ CO2	Mesure à effets synergiques potentiels, mais effet positif sur les émissions PA de véhicules non garantis Réduction PA liée à la réduction possible de la consommation de carburant
<b>Affichage des émissions de CO2</b> (Plan Climat 2004 - 2012)	Instrument (label CO2 comportant 7 classes) visant à inciter les consommateurs à acheter des véhicules émettant moins de CO2	↑↓ PA	↓ CO2	Effets synergiques non assurés, et même potentiellement antagonistes.  Les émissions en PA du véhicule (notamment de PM) peuvent être disparates, et différente des tendances des émissions de CO2.  Effets pervers d'une labellisation limitée aux seuls GES possible, e.g. orientation vers des VP diesel plus émetteurs de PM et de NOx Une différenciation du label également entre diesel/essence ou selon PA émis serait préférable.

<b>Renforcer les contrôles techniques</b> (Stratégie Nationale de Développement Durable)	Renforcement de contrôles technique au bord de la route, notamment sur la mesure des émissions polluantes (présumant la création d'aires de contrôle aménagées à cet effet)	Effets dépendant des critères visés par les contrôles techniques	Effets dépendant des critères visés par les contrôles techniques	Effets synergiques possibles mais non assurés.  Synergies éventuellement possibles si la mesure vise le bon fonctionnement de techniques de réduction des émissions de véhicules et le bon réglage de moteurs <sup>(1)</sup> .
<b>Carburants et leur utilisation</b>				
<b>Raccordement des autocars au réseau électrique lors d'arrêts prolongés</b> (PPA)	Réduction des émissions via un arrêt du moteur tout en maintenant les services à bord, en particulier la climatisation	↓ PA	↓ CO2	Mesure à effets synergiques pour PA et changement climatique dont l'importance dépend du mélange des sources d'énergie utilisées pour la production d'électricité et des carburants utilisés (et substitués lors des arrêts) par les autocars. Notons qu'un arrêt des services à bord (donc des moteurs) pendant des arrêts prolongés d'autocars, notamment du chauffage et de la climatisation, serait plus efficace.
<b>Réduction du SO2 dans les carburants : limite de 10 ppm pour tous les véhicules en 2009</b> (PREPA)	Transposition en droit français de la Directive 2003/17/CE du 3 mars 2003 modifiant la directive 98/70 relative à la qualité de l'essence et des carburants diesel	↓ SO2, NOx	↑ CO2 (5 - 10%)	Mesure à effets antagonistes sur l'ensemble de la filière; la réduction du contenu en soufre est un procédé intensif en énergie, augmentant les émissions des raffineries in fine
<b>Engins mobiles non-routiers : exigence de combustibles moins soufrés</b> (PREPA)	substitution du fioul domestique (FOD) actuellement utilisé par du gazole	↓SO2, NOx	Effet négligeable a priori	Mesure a priori sans effets synergiques Effets antagonistes, possibles dans la mesure où le gazole à faible contenu en soufre doit être utilisé

				car la réduction de la teneur en soufre des carburants risque d'augmenter les émissions des raffineries (cf. mesure précédente)
<b>Augmentation du nombre de stations services équipées pour récupérer les vapeurs d'essence (PPA)</b>	Abaissement du seuil en débit d'essence à partir duquel une récupération d'au moins 80% des émissions fugitives de COV lors du ravitaillement en essence des véhicules est mise en place	↓ COV	Difficile à évaluer, les effets des émissions COV sur le climat sont complexes et peuvent être positifs ou négatifs	Bilan de la mesure à investiguer en analysant les propriétés de transfert radiatif des COV et des polluants dont ils sont les précurseurs (ozone, aérosols organiques secondaires)
<b>Développement des énergies renouvelables : biocarburants <sup>(2)</sup></b>	Objectif d'augmenter la part des énergies renouvelables dans la demande finale d'énergie afin de réduire les émissions de CO2  Biodiesel Bioéthanol	↑ PM10, NOx, NH3 (↓ SO2 possible) à l'échappement	↑ ↓CO2, N2O sur le cycle de vie est possible et dépend du cas d'espèce ↓ CO2 à l'échappement	Mesure à effets fortement antagonistes, voir négatifs pour la pollution atmosphérique et le changement climatique (pour les biocarburants 1 <sup>ère</sup> génération)
<b>Plus d'usage de pétrole à la RATP dans 20 ans (Actualisation du Plan Climat 2004 - 2012)</b>	Remplacement par du carburant Diester30 (70% de gazole et 30% d'Esther Méthylique d'Huile Végétale [EMHV]) qui est déjà utilisé ; tests avec Diester100 en cours et avec de véhicules fonctionnant	↑ PA possible si le bilan est comparable à celui de l'utilisation de biocarburants dans les VP	↓ CO2	Mesure potentiellement à effets antagonistes Les effets sur la PA pourraient être plus positifs en optimisant les moteurs pour l'utilisation de ces carburants

	à l'Ethanol 95 (E95)			
<b>Actions sur la demande, aménagement urbain et report modal</b>				
<b>Augmenter la part des transports collectifs ou non motorisés dans les déplacements urbains</b> (Plan Climat 2004 - 2012)	Réduction des émissions via une réduction de l'utilisation des modes de transports les plus polluants	↓ PA (potentiellement PM, NOx, COV, CO)	↓ CO2	Mesure à effets a priori synergiques ; Une évaluation précise dépendra des hypothèses sur les technologies et les carburants utilisés ainsi que sur les taux d'occupation de véhicules <sup>(3)</sup>
<b>Changement modal</b> <sup>(3)</sup>	Modification des parts relatives des différents modes de transport utilisés  Exemple de mesure gagnant-gagnant : changement de mode de trajets courts en avion vers le train à haute vitesse (généralement électrifiés)	↓↑ PA  ↓ CO, NOx, COV, SO2, PM possibles	↓↑ CO2  ↓ CO2 possible	Sans d'avantage de précisions, il est évident que des changements entre différents modes de transport offrent une grande variété d'options qui peuvent conduire à des situations gagnant-gagnant ou non  L'évaluation exacte dépend des énergies à partir desquelles l'électricité est produite
<b>Zones de trafic à basses émissions</b> <sup>(4)</sup> (Low Emission Zones) (PPA)	L'objectif est généralement une réduction de la pollution locale via des restrictions d'accès de ces zones à certains véhicules. Différents critères sont possibles, e.g. type de véhicule, âge ou technologie utilisée	↓ PA, dans la zone considérée mais il faut analyser les effets sur l'ensemble de l'agglomération (report de charge sur d'autres zones)	↓↑ CO2, éventuellement ↑N2O. L'effet est à analyser sur l'ensemble de l'agglomération	Mesure à effets potentiellement synergiques, mais non garantis Lorsque cet instrument conduit a) à la mise en place de post-équipement de véhicules (e.g. filtres à particules, techniques pour réduire les NOx) des légères pénalités de CO2 et des émissions supplémentaires de N2O sont possibles b) à un remplacement accéléré de

				véhicules par des véhicules plus récents et moins polluants, les effets peuvent être synergiques Autres incertitudes : l'effet de l'instrument peut être transitoire jusqu'à ce que la flotte de véhicules évolue, sauf si la sévérité de l'instrument s'accroît avec le temps
<b>Densification de la ville</b> (Grenelle, Plan Climat 2004 - 2012)	Objectif d'une réduction des émissions de CO2 via une réduction des déplacements urbains	↓ émissions atmosphériques dues au transport, l'impact des émissions de la ville, prise dans sa globalité sur la qualité de l'air est incertain	↓ CO2 du transport	Effets synergiques pour les émissions, mais pas nécessairement pour la qualité de l'air ; Celle-ci dépend des concentrations des polluants, qui risquent d'être plus élevées dans une ville plus dense <sup>(5)</sup>
<b>Sécurisation/séparation des modes non motorisés</b>	Allocation d'espaces à des piétons et cyclistes	↓ de l'impact de la qualité de l'air sur les piétons et cyclistes (via une amélioration de la QA et une réduction de l'exposition sur ces voies dédiées aux modes non motorisés) ↓ PA si changement modal vers des modes non motorisés à lieu	↓ CO2 si changement modal vers des modes non motorisés à lieu	Mesure à effets potentiellement gagnant-gagnant pourvu qu'un changement modal vers des modes non motorisés ait lieu. Effet positif concernant la qualité de l'air pour les piétons et cyclistes utilisant les voies séparées.
<b>Utilisation de véhicules plus légers, moins puissants</b>	Réduction des émissions de CO2 par une réduction de la consommation des	↓ PA À évaluer sur l'ensemble du cycle de vie (notamment	↓ CO2 due à la réduction de la consommation de carburants. Une évaluation précise	Mesure gagnant-gagnant, mais peut-être plus efficace pour les GES que pour la PA <sup>(1)</sup>

	véhicules	en incluant les raffineries)	devrait se faire sur l'ensemble du cycle de vie.	
<b>Gestion du trafic</b>				
<b>Réduction de la vitesse des véhicules</b> <sup>(6)</sup> (Plan Climat 2004 - 2012)	Le Plan Climat (2004) vise une réduction des émissions de CO2 via le respect des limites de vitesse. Dans d'autres pays des réductions de vitesses visent parfois des améliorations dans la qualité de l'air locale	↓ NOx, PM sur autoroutes et routes rapides, mais ↑ possible en milieu urbain (zones limitées à 30 km/h par exemple)	↓ CO2 sur autoroutes et routes rapides	Mesure à effets gagnant-gagnant sur des autoroutes et routes rapides En revanche, effets gagnant-gagnant non assurés en ville En ville il pourrait être plus utile de mettre en place des mesures contre la congestion bien dimensionnées afin de réduire les émissions.
<b>Eco-conduite</b> (Plan Climat 2004 - 2012)	Réduction des émissions de CO2 par une réduction de la consommation de carburants	↓ pollution atmosphérique locale (e.g. NOx, HC, CO)	↓ CO2	Mesure gagnant-gagnant Des mesures d'accompagnement seraient utiles pour que les modifications de comportements soient durables <sup>(7)</sup>
<b>Fluidification du trafic par régulation des vitesses</b> (Actualisation 2006 du Plan Climat 2004 - 2012)	Fluidification du trafic dans des zones régulièrement congestionnées pour obtenir des vitesses plus optimales	↓ PA	↓ CO2	Instrument à effets gagnant-gagnant dans la mesure où la gestion dynamique de trafic réduit la congestion et conduit à des vitesses plus optimales en termes d'émissions de PA et de CO2
<b>Voies d'autoroutes urbaines/périurbaines dédiées aux transports en communs ou aux véhicules privés suffisamment occupés</b>	Objectifs de telles politiques à l'étranger : réduction de la congestion et ainsi amélioration de la qualité de l'air locale,	↓↑ PA ?	↓↑ CO2 ?	Mesure à potentiel gagnant-gagnant si la congestion est réduite en totalité, si le nombre de véhicule-kilomètres est réduit, si les vitesses sont optimisées ... En revanche, augmentation

(PPA)	optimisation des vitesses, réduction du temps de trajets des véhicules concernés, amélioration du transport de marchandises ; réduction de la consommation de carburant via une réduction du nombre de véhicules et la réduction de la congestion ; amélioration et augmentation d'options de transport plus durables			potentielle de la congestion sur les autres voies (notamment si une voie existante est transformée en voie dédiée) Manque d'études sur les effets nets entre les avantages en termes d'émissions émanant des voies dédiées, et une augmentation potentielle de la congestion sur les autres voies
<b>Autres instruments incitatifs</b>				
<b>Engins mobiles non-routiers : incitation au renouvellement du parc (PREPA)</b>	Objectif d'une modernisation du parc de véhicules	↓↑ PA ?	↓↑ CO2 ?	Mesure à potentiel gagnant-gagnant dans l'utilisation des engins (si les véhicules récents respectent des valeurs limites plus strictes pour les polluants atmosphériques et s'ils sont plus économes en consommation de carburant) Toutefois, les effets nets pour la PA et les GES dépendront des impacts du cycle de vie : a) liés à la fin de vie des véhicules remplacés b) liés à la fabrication des véhicules additionnels
<b>Modulation des péages autoroutiers en fonction du niveau de</b>		↓↑ PA ?	↓↑ CO2 ?	L'effet de l'instrument dépendra des critères environnementaux selon lesquels les péages sont

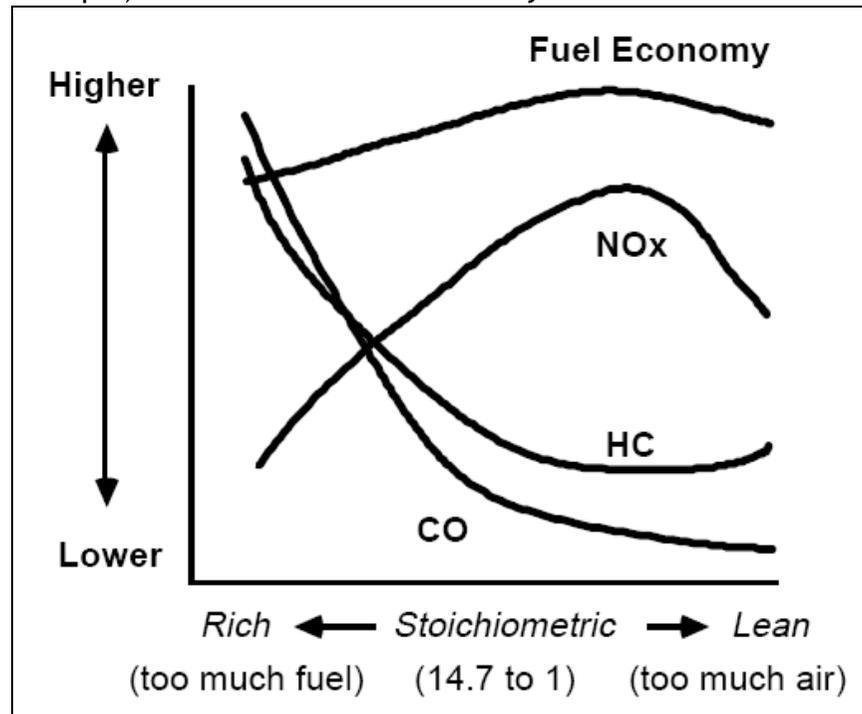
<p><b>pollution et/ou d'émissions de CO2 des véhicules</b> (Actualisation 2006 du Plan Climat 2004 - 2012)</p>				<p>différenciés. Les émissions en PA des véhicules peuvent être disparates, et différentes des tendances des émissions de CO2. Si, par exemple, les niveaux des péages dépendent uniquement du niveau des émissions de CO2, des effets antagonistes pour la PA sont possibles (e.g. via une favorisation de véhicules diesel).</p>
<p><b>Taxe sur les poids-lourds</b> (Actualisation 2006 du Plan Climat 2004 - 2012, Grenelle)</p>	<p>Taxation des poids lourds pour l'utilisation des routes en fonction du poids autorisé ou du nombre d'essieux et en fonction des km parcourus</p>	<p>↓ PA possible</p>	<p>↓ CO2 possible</p>	<p>Possibilité d'un effet gagnant-gagnant. Les effets d'un tel instrument sur le comportement des transporteurs, et donc sur les émissions de polluants vont dépendre du niveau de la taxe (si incitatif ou non), et du design spécifique de cet instrument économique. Les modifications de comportement permettant d'éviter la taxe dépendent des critères de la taxation et des alternatives disponibles au transport par la route. <sup>(8)</sup></p>
<p><b>(Proposition de) Marché européen du CO2 dans la construction automobile</b> (Actualisation 2006 du Plan Climat 2004 - 2012)</p>	<p>Obligation pour les constructeurs de respecter une limite pour les émissions moyennes par véhicule neuf vendu, mais autorisant des échanges possibles entre constructeurs</p>	<p>↓↑ PA ?</p>	<p>↓ CO2</p>	<p>Instrument dont les effets synergiques ne sont pas assurés. Les émissions des PA des véhicules peuvent être différentes des tendances des émissions de CO2. Des effets pervers pour la PA sont imaginables, par exemple via une favorisation de véhicules diesel. Si le marché de quotas conduit à la</p>

	et/ou revendeurs			construction de véhicules plus légers (cf. plus haut), des effets positifs également sur la PA sont possibles.
<b>Péages urbains</b> (Stratégie Nationale de Développement Durable)	Instrument instaurant un péage pour les conducteurs de (certains) véhicules entrant dans la zone visée par la mesure ; instrument visant souvent en premier lieu la congestion plutôt que la pollution	↓ PA (NOx, PM) dans la zone Mais ↑ potentielle en dehors	↓ CO2 dans la zone Mais ↑ potentielle en dehors	Effets synergiques de cet instrument pour la PA et les GES souvent constatés en pratique, du moins dans la zone concernée par le péage (via une réduction de la congestion, un report modal vers des transports publics, déplacements évités). En revanche, des contournements de la zone sont également souvent constatés (augmentation potentielle des émissions à l'extérieur de la zone), mais des analyses sur les effets nets manquent Dans le futur les effets de péages urbains sur la PA pourraient être moins importants que ceux sur les gaz à effet de serre, à cause de l'amélioration des véhicules <sup>(9)</sup>
<b>Bonus-Malus CO2</b> (Plan Climat 2004 - 2012)	Réduction du prix d'une voiture en dessous d'un certain niveau d'émissions de CO2 émises, majoration du prix au dessus de ce niveau	↓↑ PA ?	↓ CO2	Effet synergique de l'instrument non assuré, et potentiellement antagoniste Les PA du véhicule (notamment les émissions de PM) peuvent être différents des tendances des émissions de CO2.  De plus, une orientation vers des voitures diesel plus émettrices de particules et de NOx est possible, effet pervers qui pourrait être évité

				par une différenciation du bonus / malus entre les VP diesel et essence
<b>Taxe sur les véhicules de société assise sur les émissions de CO2</b> <i>(Actualisation du Plan Climat 2004 - 2012)</i>	Taxe annuelle due par toutes les sociétés possédant ou utilisant des voitures particulières et dont le montant est déterminé en fonction des émissions de CO2 ou de la puissance fiscale	↓↑ PA ?	↓ CO2	Les mêmes considérations que pour l'instrument « bonus - malus » s'appliquent également à cet instrument
<b>Incitations aux renouvellements des flottes</b>	Instrument non spécifié qui vise à remplacer des véhicules anciens par des véhicules plus récents	↓↑ PA ?	↓↑ CO2 ?	L'utilisation de véhicules (équivalents) plus récents pourrait réduire les émissions de PA et de CO2 (pourvu qu'ils respectent des normes Euro plus strictes et consomment moins de carburant). Toutefois, les effets nets pour la PA et les GES dépendront des impacts du cycle de vie : a) liés à la fin de vie des véhicules remplacés b) liés à la fabrication des véhicules additionnels (pour des véhicules à combustion remplaçant des véhicules à combustion) Le bilan d'un tel instrument serait plus positif si des anciens véhicules étaient remplacés par des véhicules à faible niveau d'émissions, comme par exemple des hybrides.

(1) Remarque sur la mise au point de nouveaux moteurs

L'objectif d'un progrès de la motorisation vise en premier lieu la réduction des émissions de gaz à effet de serre (Plan Climat, 2004). D'une façon générale, les liens entre les émissions de CO<sub>2</sub> et celles des polluants atmosphériques, notamment les PM et les NO<sub>x</sub>, sont très variables et complexes pour les moteurs de voitures et de poids lourds. Alors que les émissions de CO<sub>2</sub> sont proportionnelles à la consommation de carburant d'un véhicule, les émissions de NO<sub>x</sub> augmentent lorsque le moteur est réglé pour optimiser la combustion du carburant (rapport air-carburant stœchiométrique, cf. également Graphique ci-dessous). Les émissions d'autres polluants vont plutôt dépendre du niveau auquel le moteur est maintenu (sil est proche du rapport air-carburant stœchiométrique) et de l'efficacité des catalyseurs utilisés.



L'effet du ratio air-carburant (source : US EPA, non daté)

Dans ce contexte il est intéressant de noter que actuellement les valeurs limites des normes Euro sont définies en g/km et indépendamment de la puissance ou du poids du véhicule, qui sont des variables importantes de la consommation de carburant. Ce n'était pas le cas pour les réglementations antérieures des émissions de véhicules.

Toutefois, il pourrait y avoir des réductions d'émissions de polluants atmosphériques lorsque le cycle de vie est pris en compte, notamment dans les raffineries. On bénéficierait du même effet positif sur la PA lorsque la réduction de CO<sub>2</sub> est atteinte via une réduction du poids de véhicules, permettant l'utilisation de moteurs plus petits et moins consommateurs en carburants (Air Quality Expert Group, 2007).

(2) Air Quality Expert Group, 2007 ; CAS, 2008b ; EUCAR, JRC et CONCAWE, 2005 ; Hammingh et al, 2008 : Les gains en termes de CO<sub>2</sub> sont très variables suivant les filières et modes de production. De plus, les installations industrielles de production de biocarburants peuvent conduire à des émissions importantes de GES à travers leur consommation d'énergie d'origine fossile. Le bilan GES est incertain notamment à cause du N<sub>2</sub>O émis lorsque des fertilisants azotés sont utilisés dans la production de la biomasse. Le niveau des PA émis dépend également de la façon dont les biocarburants sont utilisés (purs ou en mélange), du type de véhicule et de son optimisation pour l'utilisation de ce type de carburant. Plus ces carburants sont utilisés de façon pure, plus il est difficile de respecter les VLE des normes européennes. La conversion de la biomasse en biocarburants conventionnels n'est pas efficace d'un point de vue énergétique et il serait plus efficace d'utiliser des biocarburants directement dans des installations de combustion fixes. D'autres risques apparaissent en termes de conséquences environnementales lorsque la biomasse est produite en utilisant des pratiques agricoles intensives et en monoculture (conséquences pour l'eau, les sols, l'utilisation massive de produits phytosanitaires, etc.). La production de biocarburants risque également de venir en concurrence de productions alimentaires.

(3) **Remarque sur l'augmentation des transports collectifs en milieu urbain et le changement modal**

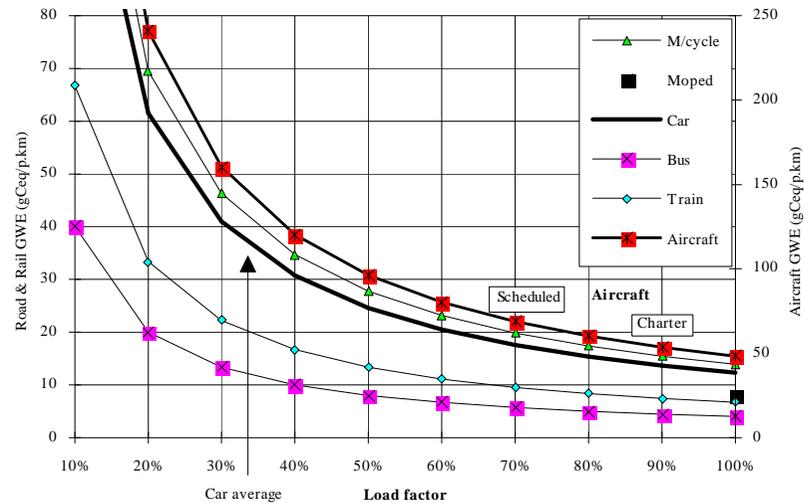
Le Plan Climat (2004) vise une politique globale des transports, incluant non seulement l'organisation des transports en commun, mais également le développement des déplacements non émetteurs d'émissions comme le vélo ou la marche à pied, solution à effets synergiques pour la qualité de l'air et le changement climatique.

En ce qui concerne un changement modal du transport individuel motorisé vers les différentes options de transport en commun, les effets pourraient également être positifs pour les deux thématiques. En revanche, l'évaluation précise dépendra des hypothèses sur les technologies et carburants utilisés ainsi que des taux d'occupation de véhicules.

Le graphique suivant, publié dans Barrett (1992) donne des indications sur les émissions de gaz à effet de serre, exprimées en équivalent de carbone par personne-kilomètre de différents modes de transport. Ces données sont uniquement indicatives, car en détail les résultats dépendent du carburant et de la technologie du véhicule utilisé, et du moins pour les voitures également du poids et de la vitesse à laquelle le véhicule roule.

Selon le Graphique, les émissions de gaz à effet de serre augmentent dans l'ordre des moyens de transport suivants pour un taux d'utilisation équivalent : bus, train, scooter, voiture et moto. Plus le taux d'utilisation est élevé, moins les différences entre ces différents modes de transport sont importantes (elles restent toutefois positives). Toutefois, les

facteurs d'émissions exprimés en voyageur-kilomètres dépendent du taux de remplissage. Un bus tournant à vide aurait des émissions pas voyageur-kilomètre plus élevées qu'une voiture occupée au maximum.



### Potentiel de réchauffement climatique de différents modes de transport (Barrett, 1992)

Les effets du report modal sur la pollution atmosphérique peuvent être évalués indirectement au travers certaines expériences de péages urbains. On peut en effet citer différentes expériences, qui, même si elles ont en premier visé une réduction de la congestion, ont eu des effets sur le report modal. C'était par exemple le cas à Londres avec une réduction des émissions de particules et des NOx et à Stockholm avec une réduction des émissions de particules, des NOx, de COV, de CO et de CO2. Ces réductions sont du moins en partie dues à un report modal, mais en partie également à des déplacements évités et des contournements (cf. EEA, 2008b ; SLB, 2006 ; Nagl et al, 2006 ; Beevers, 2009).

D'autres effets d'un report modal sont généralement une réduction de la congestion et également des risques pour les personnes. Toutefois, l'impact sur le risque pour des personnes remplaçant le transport individuel motorisé par le vélo ou la marche dépend de façon importante de l'existence ou non de voies sécurisées.

#### (4) Remarques sur Zones de trafic restreint

Différents modèles sont appliqués en pratique. A Londres, une 'low emission zone' a été mise en place en février 2008. Les bus et poids lourds entrant dans la zone sont obligés de respecter la norme Euro III à partir de 2008 et Euro IV à partir de 2012. Les grands camions et minibus doivent respecter la norme Euro III à partir de 2010. Les véhicules respectant ces normes peuvent circuler librement. A défaut, ils sont obligés de payer un péage journalier : 200 £ pour les poids lourds, bus et caravanes au dessus de 3,5 tonnes, 100 £ pour les grands camions et caravanes en dessous de 3,5 tonnes et pour les minibus en dessous de 5 tonnes. Des pénalités élevées sont imposées aux véhicules ne payant pas ces péages. L'objectif de cette politique à Londres était de réduire les émissions de PM10 et de NOx, et les premières analyses montrent que ces polluants ont en effet été réduits (Hutchinson, 2009 ; <http://www.tfl.gov.uk/roadusers/lez/default.aspx>).

Contrairement à Londres, la zone de trafic restreint à Prague est basée sur une réglementation interdisant la circulation à certains véhicules lourds. L'accès au centre ville est restreint pour des véhicules supérieurs à 3,5 tonnes, cette zone est entourée par une deuxième où l'accès est restreint pour des véhicules supérieurs à 6 tonnes. Cet instrument a pour but de faire évoluer le parc des véhicules vers des véhicules moins lourds et plus récents qui produisent moins d'émissions atmosphériques, moins de bruit et qui ont moins d'effets sur le trafic urbain dans sa totalité. Chaque véhicule transportant des biens et entrant dans la zone doit se procurer un permis d'accès. L'instrument a réduit le trafic de véhicules lourds de 85% sur les routes les plus utilisées. La plus grande partie de ce trafic a été déviée vers des routes plus appropriées. Il y a également une tendance à l'utilisation de véhicules moins polluants. Selon des estimations, les émissions de CO2 émises dans la zone ont été réduites de 1650 tonnes/an et les émissions des NOx et des PM10 de 43,5 et 3 tonnes/an respectivement. Des effets positifs annexes ont également été constatés : une réduction du bruit, et une augmentation de l'attractivité du centre ville (EEA, 2008b).

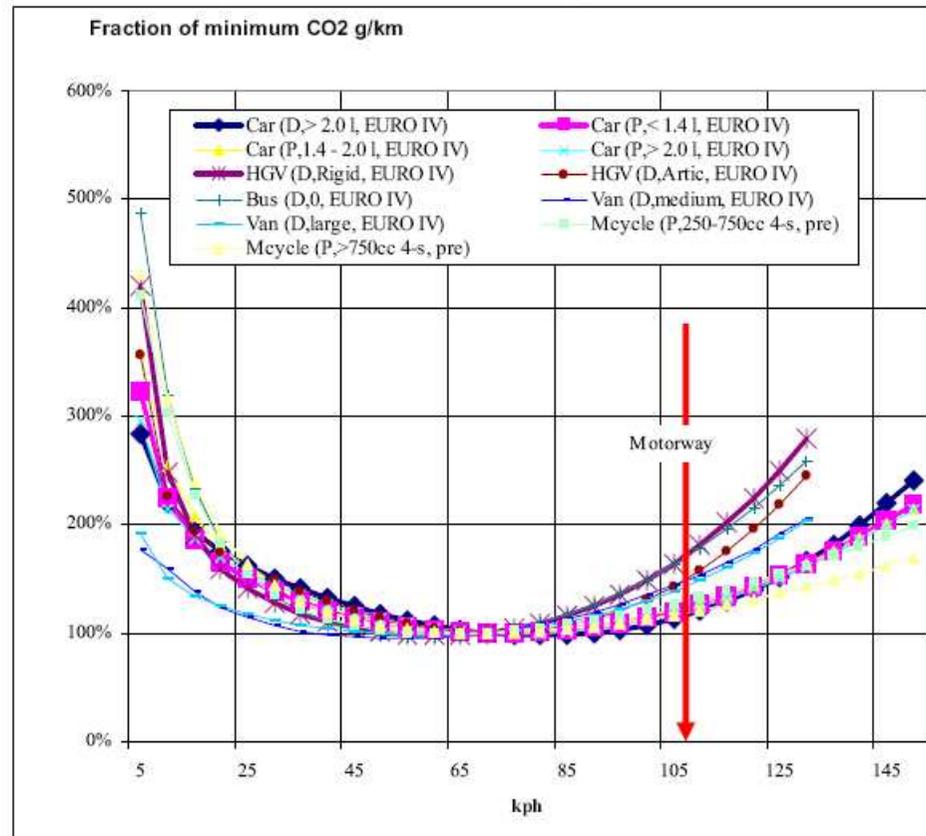
Pour les deux exemples cités ci-dessus, aucune information n'est disponible sur les effets, en termes d'émissions, hors la zone réglementée.

<sup>(5)</sup> **Remarques sur densification de la ville**

Condition nécessaire pour que l'effet sur la qualité de l'air soit positif : les réductions relatives des émissions doivent être plus fortes que la réduction relative des espaces (les émissions d'autres secteurs devraient également être réduites, car ils risquent d'induire des concentrations également supérieures).

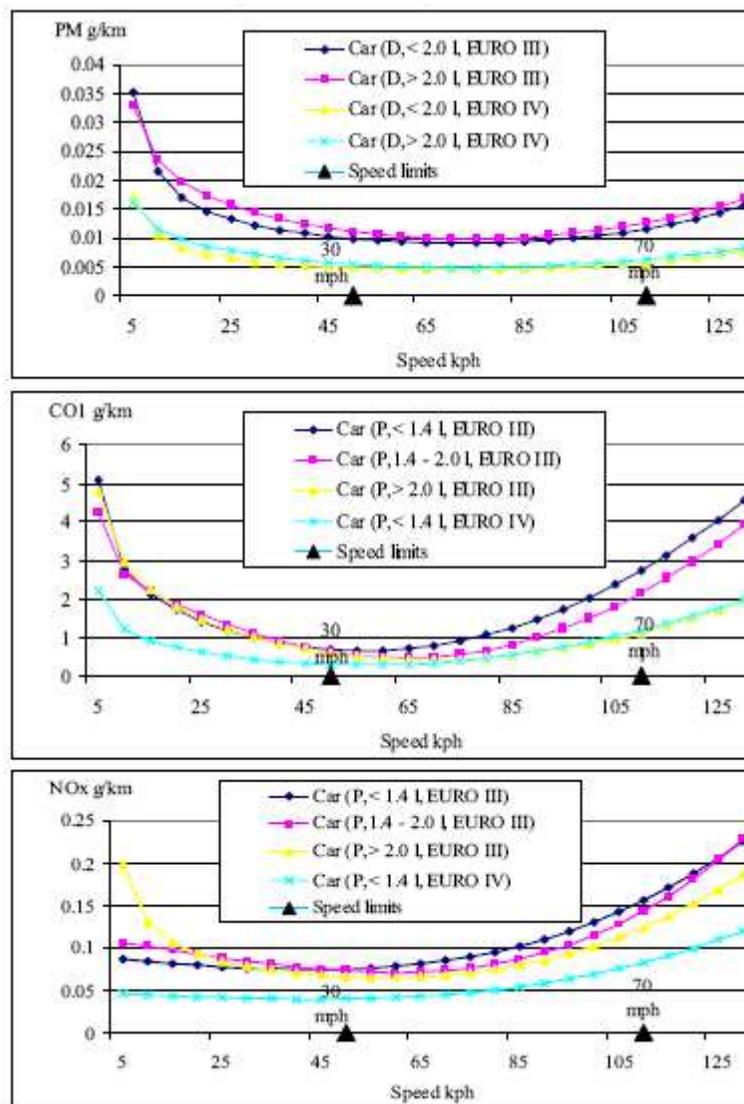
<sup>(6)</sup> **Remarque sur la réduction de vitesse des véhicules**

Pour la plupart des polluants émis il existe une vitesse optimale à laquelle les émissions sont le moins élevées, comme le montrent les graphiques suivants :



Source: AEAT, 2005

**Emissions de CO2 et vitesse (source : Barrett, 2007)**



Vitesse et émissions de PM, CO et NOx (source : Barrett, 2007)

Ces graphiques montrent que des réductions de vitesses sur des autoroutes et routes rapides devraient conduire à des effets synergiques pour la réduction des gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques.

En 2003, l'ADEME a chiffré les réductions d'émissions de gaz à effet de serre qui pourraient être atteintes via une réduction des vitesses réglementaires.<sup>6</sup> Selon cette estimation, une réduction de la vitesse sur autoroute de 130 à 120 km/h permettrait une réduction de carburant de 600 kt et de 2 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>. Une réduction de la vitesse sur voie rapide de 110 à 100 km/h permettrait une réduction de carburant de 250 kt et de 750 Kt de CO<sub>2</sub>. Enfin, pour une réduction des vitesses sur route de 90 à 80 km/h les réductions correspondantes seraient 400 Kt de carburant et 1,3 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>.

Les effets d'une expérience de réduction de la vitesse de 120 km/h à 80 km/h sur une autoroute traversant la banlieue de Rotterdam, strictement suivie par une série de caméras de surveillance avec pénalités automatiques immédiates en cas de non respect, ont été rapportés dans EEA (2008b). Les buts de la mise en place de cette politique étaient multiples : réduire les effets négatifs sur la qualité de l'air et la santé dus au transport, réduire la congestion et augmenter la fluidité du trafic et réduire les risques dus au trafic. Les effets constatés comprennent : une réduction de la vitesse moyenne entraînant une fluidification du trafic et une réduction de congestion, des réductions des émissions qui sont estimées à 15-25% pour les NO<sub>x</sub>, 25-35% pour les PM<sub>10</sub>, 21% pour le CO et 15 % pour le CO<sub>2</sub>. Concernant la qualité de l'air, des réductions de concentrations de NO<sub>2</sub> et PM<sub>10</sub> ont également été constatées. Enfin, il y a d'autres effets très positifs : une réduction de 60% du nombre d'accidents, une réduction de 90% du nombre des morts et une réduction du bruit de 50%.

Les effets d'une réduction des vitesses sur l'autoroute entourant Amsterdam de 100km/h à 80 km/h ont été rapportés dans Dijkema et al (2008) : réduction des concentrations de PM<sub>10</sub>, PM<sub>1</sub> ainsi que des fumées noires, en revanche, aucun effet significatif n'a été constaté sur les émissions des NO<sub>x</sub>.

Tandis qu'une réduction des vitesses maximales sur des autoroutes et routes rapides peut généralement être considérée comme une mesure gagnant-gagnant pour la lutte contre la pollution de l'air et le changement climatique, ce n'est pas garanti pour une application en ville. Etant donné la forme des courbes vitesse-émissions, il paraît plutôt utile d'augmenter des vitesses très basses par des mesures contre les embouteillages pour réduire les émissions (sans pour autant générer d'appel de trafic supplémentaire).

#### (7) Remarque sur l'éco-conduite

Selon des mesures faites par le TNO et rapportées dans une brochure Suisse sur l'éco-conduite<sup>7</sup>, par rapport à une

<sup>6</sup> <http://www.actu-environnement.com/ae/news/340.php4>

<sup>7</sup> <http://raga.ouvaton.org/pratique/Dossiers/Eco%20conduite/brochure%20ecodrive.pdf>

conduite sportive, l'éco-conduite permettrait de réduire les émissions de CO de 78%, du HC de 63% et des NOx de 50%. Un bénéfice environnemental annexe est une réduction du bruit.

**(8) Remarque sur la taxe poids lourds**

D'autres caractéristiques de la taxe dont pourraient dépendre ses effets : Lorsque la taxe est différenciée selon les émissions polluantes du véhicule, elle représente une incitation à la modernisation du parc de véhicules, respectant des normes environnementales plus strictes. Lorsque la taxe ne concerne que les poids lourds au dessus d'un certain poids total autorisé (e.g. > 12 t), l'effet pourrait être une utilisation plus forte de poids lourds restant en dessous du seuil des 12 tonnes. Lorsqu'il n'existe pas de différenciation de la taxe à l'intérieur du groupe des véhicules les plus lourds, il pourrait y avoir une tendance à l'utilisation de poids lourds plus grands. Lorsque la taxe varie selon les heures de la journée elle pourrait en premier lieu influencer les heures auxquelles les poids lourds utilisent les routes soumises à la taxe, sans avoir un effet sur le trafic dans sa totalité (report dans le temps). En revanche, même dans ces conditions, un effet positif sur l'environnement est possible lorsque la taxe réduit la congestion. Lorsque la taxe kilométrique ne s'applique qu'à certains types de routes il pourrait y avoir une déviation du trafic vers d'autres types de routes, non taxées. Ceci pourrait augmenter les effets de la pollution atmosphérique, par exemple lorsque le trafic poids lourds passe ainsi plus près de zones résidentielles. Enfin, l'utilisation des recettes de la taxe peut jouer un rôle important pour l'effet à moyen et long terme de l'instrument : notamment un changement modal vers l'utilisation d'autres modes de transport, comme le rail, dépendra des infrastructures disponibles. En général, une taxation des poids lourds au kilomètre réduit le nombre de trajets à vide (ou en partie à vide), ce qui peut réduire le nombre de véhicules-kilomètres parcourus.

**(9) Remarque sur les péages urbains**

Des péages avec des charges différenciées selon le niveau d'émissions pourraient renforcer les effets positifs pour l'environnement (modernisation du parc de véhicules vers des véhicules moins polluants)

## **6.4 Secteur du transport : aviation**

Mesure / instrument	Description	Effet sur l'émission de PA	Effets sur l'émission de GES	Conclusion
<b>Mesures techniques</b>				
Réduction de la consommation réacteurs	Augmentation de l'efficacité en termes de la consommation de carburants (par amélioration des moteurs et du design de l'appareil)	↓ PA ↑ NOx	↓ CO2	Effets antagoniste entre PA et GES constatés dans le passé. L'augmentation de l'efficacité des carburants augmente les températures de combustion et donc les émissions des NOx
<b>Carburants et alimentation</b>				
Electricité pour APU sur aéroports	L'équipement des points de stationnement des avions en alimentation électrique permettant de limiter l'utilisation des moteurs auxiliaires de puissance (APU) sur les plates formes	↓ NOx	↓ CO2	Mesure à effet synergique, dont l'effet dépend du mix énergétique dans la production d'électricité
<b>Changement modal</b>				
Transfert modal air => rail	Changement de mode : substitution de trajets courts en avion par le train (à haute vitesse)	↓ NOx, CO, COV, SO2, PM possible	↓ CO2	L'évaluation exacte dépend des énergies à partir desquelles l'électricité est produite, c'est-à-dire du mix énergétique (Hypothèse sous-jacente d'une utilisation de trains électrifiés)

## **6.5 Secteur du transport : bateaux**

Mesure / instrument	Description	Effet sur l'émission de PA	Effets sur l'émission de GES	Conclusion
<b>Mesures techniques</b>				
SCR (PPA)	Réduction des émissions de NOx via l'injection d'urée en présence d'un catalyseur	↓ NOx (réduction jusqu'à 90%), et potentiellement SO2 et PM, ↑ NH3 possible	↑ N2O possible	Mesure à potentiels effets antagonistes. Cependant, l'augmentation de N2O pourrait être compensée par la baisse des NOx (précurseur de l'ozone, lui-même GES)
Laveurs de gaz pour les cheminées de navires (PPA)	Lavage des gaz à l'eau de mer (technologie émergente)	↓ SO2 (réduction environ 75%), PM (réduction environ 25%)		Mesure sans effets synergiques a priori <sup>(1)</sup>
Récupération des vapeurs d'hydrocarbures et des COV pour les navires à quai lors des chargements/déchargements et des ravitaillements (PPA)				L'efficacité énergétique de ces systèmes doit être évaluée pour se prononcer sur l'impact de la mesure sur le CC <sup>(2)</sup> .
<b>Carburants et alimentation</b>				
Alimenter en énergie les navires à quai par électricité (PPA)	Fournir l'énergie nécessaire à bord lors du stationnement de navires dans un port par connexion au réseau électrique (remplaçant l'utilisation des moteurs auxiliaires)	↓ PA (NOx, SO2, PM COV)	↓ CO2	Mesure a priori à effets synergiques Remplacement des émissions locales de polluants atmosphériques par des émissions moindres (et en général en dehors de la ville) liées à la production d'électricité. L'ampleur de la réduction d'émissions dépend du mix

				énergétique dans la production d'électricité.
Réduction de la teneur en soufre des carburants (PREPA)		↓ SO2 des navires, voire dans les raffineries	↑ CO2 des raffineries ↓ réduction de la formation des aérosols secondaires (due à l'effet net sur le SO2)	Mesure à effets antagonistes : bénéfique net pour la PA, mais pas pour le climat
<b>Changement modal</b>				
Développement du cabotage maritime (Plan Climat 2004 - 2012, Grenelle : « 5 à 10 % des trafics concernés devraient être reportés depuis la route »)	Développement des autoroutes de la mer et report modal de la route vers la voie maritime	↓ PA probable (même si le gain sur certains polluants pourrait ne pas être garanti)	↓ CO2 (pourvu qu'une massification des flux routiers transférés soit possible, et que la distance à parcourir par la voie maritime soit plus courte que par la route)	Mesure à effets potentiellement synergiques
<b>Aménagement territorial et report modal</b>				
Le canal à grand gabarit Seine-Nord-Europe (Grenelle)	Report modal du transport fret de la route vers la voie maritime	↓ PA probable (même si le gain sur certains PA pourrait ne pas être garanti)	↓ CO2	Mesure à effets potentiellement synergiques  En 2020, la réduction du trafic routier est évaluée dans une fourchette allant de 2,9 à 3,1 milliards de t-km <sup>8</sup>
<b>Investissement dans les ports</b>				
Amélioration de la compétitivité des ports maritimes français (Actualisation 2006 du Plan Climat 2004 - 2012)	Offre de meilleurs services pour le transport de conteneurs	Pourrait conduire à une augmentation du trafic de poids-lourds vers les ports et donc à une réduction de la qualité de l'air locale	↓ CO2 (si report modal de la route vers la voie maritime) ↑ CO2 (si augmentation du trafic de poids lourds)	Bilan de la mesure à investiguer davantage

<sup>8</sup> <http://www.seine-nord-europe.com/>, « Enquête préalable à la déclaration d'utilité publique - Canal Seine-Nord Europe »

- (1) Autres effets : rejets liquides en mer d'hydrocarbures, après traitement de l'eau de mer utilisée, en concentration inférieures à 15 ppm, de faibles quantités de métaux lourds. L'impact des rejets de sulfate en milieu portuaire devrait être vérifié. Production de boues acides provenant du traitement de l'eau de mer utilisée de 0,2 kg/MWh.
- (2) Les dispositifs de récupération et réinjection des COV récupérés pourraient avoir des effets globalement négatifs en termes d'émission sur l'ensemble de la chaîne (présence dans les ports + voyage en mer) dans le cas où les opérations de chargement génèrent des sous-pressions dans les réservoirs (HELCOM ; 2005). La récupération des COV doit donc être coordonnée avec la gestion du remplissage des réservoirs des navires. Il existe des systèmes de prévention des sous-pressions génératrices de COV, applicable aux pétroliers, méthaniers, chimiquiers lors des chargements qui permettent de 70 à 90 % de réduction des COV (source : HELCOM, 2005).
- (3)

## **6.6 Secteur du transport : trains**

Mesure / instrument	Description	Effet sur l'émission de PA	Effets sur l'émission de GES	Conclusion
« Plus de pétrole à la SNCF dans 20 ans » (Actualisation du Plan Climat 2004 - 2012)	La SNCF teste le fonctionnement au B30 (carburant contenant 30 % de biocarburant) de matériels TER et procédera à des essais de fonctionnement de moteurs ferroviaires alimentés au B100 (carburant contenant 100 % de biocarburant)	↑ PA possible si le bilan est comparable à celui de l'utilisation de biocarburants dans les véhicules routiers	↓ ↑ CO2 ? Bilan incertain pour les biocarburants de première génération	Mesure potentiellement à effets mal définis
Développement du réseau TGV (Plan Climat 2004 - 2012, Grenelle)	Précision Grenelle : 2000 kilomètres de LGV et étude de 2500 en plus	↓ PA	↓ CO2	Mesure à effets synergiques si l'effet principal est un report modal de la route et de l'avion vers le train électrifié (et étant donné le mix énergétique en France) Effets moins positifs si l'effet principal n'est pas un report modal mais une création de demande de déplacements supplémentaires
Augmentation des parts de marché du fret ferroviaire (Plan Climat 2004 - 2012, Grenelle : « +25% d'ici 2012 »)		↓ PA	↓ CO2	Mesure à effets synergiques (l'hypothèse d'un report modal des poids lourds vers le rail)

## **6.7 Secteur de l'industrie : général**

Mesure / instrument	Description	Effet sur l'émission de PA	Effets sur l'émission de GES	Conclusion
<b>Réduction des émissions de SF6 dans les équipements électriques</b> (Plan Climat 2004 - 2012)	Réduction de l'hexafluorure de soufre pendant les différentes étapes du cycle de vie, notamment via un suivi des opérations de maintenance et du recyclage du SF6 des équipements électriques en fin de vie	-	↓ SF6	Mesure visant le changement climatique <sup>(1)</sup> A priori ni effets synergiques ni antagonistes Des éventuels effets sur la PA (e.g. dus à l'utilisation d'énergie pour le recyclage) seraient à évaluer
<b>Amélioration de l'efficacité énergétique dans l'industrie</b> (Plan Climat 2004 - 2012)	Réduction des émissions de CO2 via une réduction de la consommation d'énergie (augmentation de l'efficacité de procédés, réutilisation de chaleur ..., utilisation de déchets pour la production de biogaz, ...)	↓↑ PA	↓ CO2	Mesure à effets fréquemment synergiques Mais parfois l'optimisation énergétique ne conduit pas à une amélioration ou à une optimisation de la totalité des effets environnementaux. <sup>(2)</sup> Autres effets : gestion des sources énergétiques (réduction de l'exploitation), réduction de la dépendance énergétique

(1) Le pouvoir de réchauffement global du SF6 est 22.000 fois plus fort que celui du CO2, mais les émissions de SF6 de l'industrie électrique et leur contribution au changement climatique sont faibles dû fait de son emploi en système clos et de sa réutilisation.

(2) BREF efficacité énergétique (2008) : Le BREF donne l'exemple des installations de traitement de surface utilisant des solvants. Il peut être plus efficace pour l'optimisation du bilan environnemental d'échanger le procédé contre un procédé fonctionnant sans solvants mais qui est plus consommateur en énergie que le procédé initial, que de réduire la consommation énergétique du procédé initial.

## **6.8 Secteur de l'industrie : installations de combustion**

Mesure / instrument	Description	Effet sur l'émission de PA	Effets sur l'émission de GES	Conclusion
<b>Mesures primaires de réduction des émissions pour les installations existantes d'une puissance comprise entre 20 et 50 MWth (PREPA)</b>				
Réduction de l'excès d'air	Réduction des émissions de NOx par réduction de l'oxygène présent dans la zone de combustion	↓ NOx (réduction 10-44%), SO2 Risque de combustion incomplète et de formation d'imbrulés dans les cendres (e.g. carbone) et de CO	Pas besoin d'énergie supplémentaire	Mesure sans trop d'effets antagonistes
Bruleurs bas-NOx	Réduction des émissions de NOx via une modification de l'introduction de l'air et du combustible, retardant ainsi leur mélange, réduisant la disponibilité d'oxygène et réduisant la température de la flamme	↓ NOx (réduction 20-60%) Risque de formation de CO et d'imbrulés solides	possibilité ↑ CO2 à cause d'une augmentation de la consommation d'énergie si recirculation des gaz de combustion externe	Mesure plutôt sans effets synergiques Effets antagonistes possibles sous certaines conditions
Recirculation des fumées	Réduction des émissions de NOx via une réduction de l'oxygène présent dans la zone de combustion et une réduction de la température de flamme	↓ NOx (réduction 20-50%)	Risque ↑ CO2 lorsque des quantités excessives des gaz sont mises en recirculation à cause d'une augmentation de la consommation d'énergie pour les ventilateurs	Mesure plutôt sans effets synergiques Effets antagonistes possibles sous certaines conditions (recirculation de quantités excessives de fumées) qui peuvent être évitées en combinant la mesure avec l'utilisation de bruleurs bas-NOx
Reburning	Réduction des émissions de NOx par création de différentes zones dans le four et injection étagée de combustibles et d'air.	↓ NOx (réduction 50-60%) Risque de formation de HCN et NH3 Risque de combustion incomplète (peut être	↑ CO2, possibilité de surconsommation de combustible secondaire	Mesure plutôt sans effets synergiques (effets antagonistes possibles)

	La mesure vise une réduction des oxydes d'azote déjà formés en azote.	réduit en utilisant du gaz comme combustible, et en appliquant la mesure dans des chaudières ayant un long temps de résidence)		
<b>Réduction du préchauffage de l'air</b>	Réduction des émissions de NOx via une réduction de la température de flamme dans la zone de combustion	↓NOx (réduction 20-30%)	↑ CO2 possible Raison : risque d'augmentation de la consommation de combustibles car une plus grande partie de l'énergie thermique dans les gaz ne peut pas être utilisée et finit par s'échapper via les cheminées. Ce risque peut être réduit en recourant à des mesures d'économie d'énergie.	Mesure à effets potentiellement antagonistes
<b>Mesures « end of pipe »</b>				
<b>SCR</b>	Réduction des NOx par injection d'ammoniac	↓ NOx (80-90% de réduction) ↑ NH3 par définition	↑N2O par production ↑ CO2 car augmentation de la consommation d'électricité	Mesure à effets antagonistes Toutefois, selon le 'BREF Economic and Cross-Media », malgré cet antagonisme, le bilan environnemental global de la SCR peut être positif dans certains cas.
<b>SNCR</b>	Réduction des NOx par injection d'ammoniac ou d'urée	↓ NOx (20-50% de réduction, des valeurs plus élevées peuvent être obtenues dans des conditions optimisées)	↑ N2O par production	Mesure à effets antagonistes Toutefois, selon le 'BREF Economic and Cross-Media », malgré cet

		↑ NH3 par définition		antagonisme, le bilan environnemental global de la SCR peut être positif dans certains cas.
<b>Combustibles</b>				
<b>Utilisation de fuel TTBT (PPA)</b>	Le fioul TTBT est un fioul de teneur inférieure à 0.5% de S (le fuel TBTS est à 1% de S)	↓ SO2	↑ CO2	Mesure à effets antagonistes en l'absence de mesure conjointe sur l'énergie dans le secteur du raffinage : la réduction du contenu en soufre est un procédé intensif en énergie, ainsi augmentant les émissions des raffineries.
<b>Utilisation de charbons peu soufrés (PPA)</b>	Réduction des émissions de SO2 par substitution de combustible	↓ SO2  Si ce charbon est importé des pays éloignés, l'impact du transport supplémentaire pourrait être négatif	?  Si ce charbon est importé des pays éloignés, l'impact du transport supplémentaire pourrait être négatif	Mesure a priori sans effet synergique  Autres effets : Possibilité de modification de cendres pour des charbons de teneur en soufre inférieure à 4%, ce qui pourrait affecter le rendement des dépoussiéreurs électrostatiques et entraîner le besoin d'un traitement de conditionnement par agent chimique (ammoniac, ...) des cendres en amont du dépoussiéreur

## **6.9 Secteur de l'industrie : chimie et pétrochimie**

Mesure / instrument	Description	Effet sur l'émission de PA	Effets sur l'émission de GES	Conclusion
Réduire les émissions diffuses de COV (fuites, chargements, bassins de traitement) (PREPA)	Réduction des émissions dues à des fuites sur les équipements (vannes, pompes...), pendant le chargement des produits en vue de leur transport, dans les bassins de traitement des effluents liquides...	↓ COV	Difficile à évaluer, les effets des émissions COV sur le climat sont complexes et peuvent être positifs ou négatifs	Bilan de la mesure à investiguer en analysant les propriétés de transfert radiatif des COV et des polluants dont ils sont les précurseurs (ozone, aérosols organiques secondaires)
Traitement des NOx en raffinerie : SCR (PPA)	Réduction des émissions des NOx dans les unités de craquage catalytique par réduction catalytique sélective) pour traiter l'effluent gazeux provenant du régénérateur	↓ NOx (réduction de 85 à 90% ; soit 30 à 250 mg/m <sup>3</sup> à 3% d'O <sub>2</sub> en fonction des concentrations à l'entrée) Risque d'émissions d'ammoniac et de SOx	↑ CO <sub>2</sub> car augmentation de la consommation d'électricité (le BREF Raffineries ne mentionne pas cet effet, hypothèse prise par analogie aux effets dans d'autres installations industrielles)	Mesure à effets antagonistes Toutefois, selon le 'BREF Economic and Cross-Media », malgré cet antagonisme, le bilan environnemental global de la SCR peut être positif dans certains cas
Traitement des NOx en raffinerie : SNCR (PPA)	Réduction des émissions des NOx dans les unités de craquage catalytique par réduction non-catalytique sélective pour traiter l'effluent gazeux provenant du régénérateur	↓ NOx (réduction de 60 à 70% ; <200 à 400 mg/m <sup>3</sup> à 3% d'O <sub>2</sub> en fonction de la teneur en azote de la charge) Risque d'émissions d'ammoniac	↑ N <sub>2</sub> O créé à cause de l'utilisation d'ammoniac	Mesure à effets antagonistes Toutefois, selon le 'BREF Economic and Cross-Media », malgré cet antagonisme, le bilan environnemental global de la SCR peut être positif dans certains cas
Traitement des NOx en raffinerie : hydrotraitement des charges pétrolières (PPA)	Réduction des émissions des NOx dans les unités de craquage catalytique en abaissant les teneurs en NOx provenant du régénérateur	↓ NOx ↓ Ni, V	↑ CO <sub>2</sub> car augmentation de la consommation d'énergie	Mesure à effets antagonistes Bilan environnemental global à évaluer.

<b>Traitement des NOx en raffinerie : conduite du régénérateur (PPA)</b>	Réduction des émissions des NOx dans les unités de craquage catalytique par changement de design et de conduite du régénérateur. Cette mesure permet d'éviter la formation de points chauds	↓ NOx ↑ CO possible		Pas de commentaire sur d'éventuels effets synergiques ou antagonistes
--------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------	--	-----------------------------------------------------------------------

## **6.10 Secteur de l'industrie : industries métallurgiques**

Mesure / instrument	Description	Effet sur l'émission de PA	Effets sur l'émission de GES	Conclusion
Réduction des émissions de SF6 dans les fonderies de magnésium (Plan Climat 2004 - 2012)	Remplacement du SF6 par du SO2	↑ SO2 (émis en faibles quantités, le problème est plutôt l'exposition des personnes travaillant dans ces installations aux gaz toxiques)	↓ SF6	Mesure à effets plutôt antagonistes

(1) D'autres options existent pour réduire les émissions de SF6: augmentation de l'étanchéité des fours, réduction de surdosage, dosage automatique du gaz de couverture, contrôle électronique du mélange de gaz du débit, en revanche, le BREF traitant des fonderies ne donne aucune information sur leurs effets.

## **6.11 L'agriculture : Agriculture et Elevage<sup>9</sup>**

---

<sup>9</sup> La plupart des éléments d'évaluation proviennent d'entretiens réalisés avec des experts de l'INRA

Mesure / instrument	Description	Effet sur l'émission de PA	Effets sur l'émission de GES	Conclusion
<b>Mesures sur les engrais</b>				
Réduction des apports d'engrais		↓ NOx, NH3	↓ N2O, ↓ CO2 (CO2 réduit via la fabrication des engrais, dans le pays producteur)	Mesure « gagnant-gagnant » à effets synergiques
Limitation de l'emploi des engrais à fort taux de volatilisation (urée, solutions azotées)		↓ NH3 due à une réduction de l'urée	↓ CO2 (l'urée cause des dégagements de CO2 lors de son épandage - décarbonatation des couches plus ou moins profondes du sol)	Mesure « gagnant-gagnant » à effets synergiques
Remplacement d'engrais azotés par épandage de lisier		↑ NH3 à mettre en perspective avec une éventuelle ↓ des émissions de NOx	↓ N2O	Mesure à effets potentiellement antagonistes. Le bilan sur la pollution atmosphérique doit être approfondi.
Remplacement d'engrais azotés par enfouissement de fumier		↑ NH3	↓ N2O	Mesure à effets antagonistes
Remplacement de l'épandage par l'injection/enfouissement du lisier (PREPA)		↓ NH3 ↑ PM imaginable car l'injection nécessite un labour supplémentaire, donc consommation de fioul	↑ CO2, imaginable car injection nécessite d'un labour supplémentaire, donc consommation de fioul ↑↓ N2O (dépend des conditions du sol et des conditions météorologiques)	Mesure à effets antagonistes potentiels Effets sur la pollution atmosphérique in fine à évaluer
Remplacement d'engrais azotés par urée		↑ NH3	↓ N2O ↑ CO2 ? (l'urée cause des dégagements de CO2 lors	Mesure à effets antagonistes

			de son épandage - décarbonatation des couches plus ou moins profondes du sol)	
<b>Production de biogaz à partir des déjections animales</b>		Pas d'intérêt en règle générale	↓ GES	
<b>Mesure sur les engins agricoles</b>				
<b>Réglage des tracteurs (Plan Climat 2004 - 2012)</b>		↑ NOx probable si le réglage est conçu pour optimiser la consommation de carburant	↓ CO2 si le réglage est conçu pour optimiser la consommation de carburant	Mesure à effets antagonistes
<b>Mesures concernant les élevages</b>				
<b>Réduire l'apport azoté de l'alimentation des animaux d'élevage (PREPA)</b>	Diminuer les apports strictement au niveau des recommandations alimentaires par stade physiologique	↓ NH3	↓ N2O	Mesure à effets synergiques
<b>Alimentation multi-phase des animaux mono-gastriques (PREPA)</b>	Ajuster les teneurs en protéines du régime au stade physiologique, adopter les aliments dits biphasés ou triphasés	↓ NH3	↓ N2O	Mesure à effets synergiques
<b>Pour les élevages porcins, systèmes de couverture des fosses à lisier (PREPA)</b>	Mise en place d'une couverture sur fosse de stockage extérieur de lisier de porcs	↓ NH3 réduction des émissions de 70 - 90%		Mesure sans effets synergiques
<b>Pour les élevages bovins, systèmes de couverture des fosses ou d'aération (PREPA)</b>	Mise en place d'une couverture	↓ NH3 faible, car les émissions produites lors du stockage représentent une très faible part du total des émissions produites depuis le		Mesure sans effets synergiques

		bâtiment jusqu'à l'épandage ; la croute naturelle qui se forme sur le lisier suffit pour limiter les émissions		
--	--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	--

## **6.12 L'agriculture : mesures structurelles**

Mesure / instrument	Description	Effet sur l'émission de PA	Effets sur l'émission de GES	Conclusion
Réduction des cheptels		↓ NH3	↓ CH4	Mesure à effets synergiques
Nouvelles cultures (légumineuses) (Plan Climat 2004 - 2012)	Mesure de fertilisation : augmenter les légumineuses en mélange ou dans la rotation	↓ NH3	↓ CH4	Mesure à effets synergiques

### **6.13 Secteur résidentiel et construction**

Mesure / instrument	Description	Effet sur l'émission de PA	Effets sur l'émission de GES	Conclusion
<b>Mesures techniques</b>				
<b>Nouvelle réglementation thermique</b> (Plan Climat 2004 - 2012)	La Réglementation thermique (RT 2005) vise une réduction de la consommation d'énergie dans des bâtiments neufs résidentiels et tertiaires ; elle définit des consommations maximales en énergie primaire	↓ NOx (via des économies d'énergies dans le secteur du bâtiment)  ↑ PA (PM, HAP, COV) possible due à l'incitation d'utilisation d'énergies renouvelables, notamment des chaudières à bois	↓ CO2 (économies d'énergie)	Instrument à effets a priori synergiques Mais si la mesure conduit à davantage d'utilisation du chauffage au bois il peut y avoir des effets négatifs sur la PA qui dépendent du type de chaudière utilisé. Toutefois la référence pour les chaudières bois a été calée sur les chaudières les plus performantes du marché
<b>Nouvelle réglementation thermique</b> (Actualisation 2006 du Plan Climat 2004 - 2012)	La RT 2010 est en préparation et vise un renforcement des objectifs de la RT 2005	Cf. commentaires ci-dessus	Cf. commentaires ci-dessus	Cf. commentaires ci-dessus
<b>Inspection des chaudières</b> (Plan Climat 2004 - 2012, PPA)	Inspections régulières afin d'éviter une dégradation des performances	↓ PA Les émissions de polluants atmosphériques d'une chaudière se dégradent avec le temps et le manque d'entretien	↓ CO2 L'entretien peut conduire à des économies de combustibles (de l'ordre de 10%)	Mesure à effets synergiques
<b>Utilisation de chaudières bas-NOx</b> (PREPA)	Réduction des émissions de NOx via l'utilisation de chaudières telles que les chaudières à basse température et les chaudières à condensation	↓ NOx	↓ CO2 (des chaudières bas-NOx comme les chaudières à basse température et les chaudières à condensation permettent	Mesure à effets synergiques

			des économies d'énergie de 12-15% et de 15-25% respectivement, par rapport aux chaudières modernes standard)	
<b>Chaudières à condensation (PPA)</b>	Cf. commentaires ci-dessus	Cf. commentaires ci-dessus	Cf. commentaires ci-dessus	Cf. commentaires ci-dessus
<b>Augmenter la part du bois dans la construction (Plan Climat 2004 - 2012)</b>		<p>↑ ↓ pollution de l'air intérieure (dépend du traitement, des produits de protection du bois et de l'utilisation d'adhésifs qui peuvent être émetteur par exemple des COV)</p> <p>↓ PA possible lorsque l'utilisation du bois réduit la consommation d'énergie</p>	<p>↓ CO2 L'exploitation du bois/sa transformation est faiblement consommatrice en énergie. Le bois fonctionne comme puits de carbone. Des structures en bois offrent une bonne performance d'isolation.</p>	Mesure à effets potentiellement synergiques, pour des bois provenant de filières « durables »
<b>Instruments incitatifs</b>				
<b>Affichage de la performance énergétique des bâtiments (Plan Climat 2004 - 2012)</b>	Instrument visant une incitation à des travaux de réhabilitation ; affichage en classe de performance énergétique et de CO <sub>2</sub>	<p>↓ PA liée à une réduction de la consommation d'énergie</p> <p>↑ de la pollution de l'air intérieure possible si l'isolation et l'étanchéité de bâtiments augmentent aux dépens de la ventilation</p> <p>↑ de la qualité de l'air intérieure lorsque</p>	↓ CO2 due à la réduction de la consommation d'énergie	Instrument à effets synergiques potentiels

		l'isolation diminue les effets de condensation liés aux ponts thermiques et les infiltrations d'eau liés aux défauts d'étanchéité		
<b>Crédits d'impôts pour les particuliers</b> <i>(Plan Climat 2004 - 2012)</i>	Crédit d'impôt pour l'achat d'équipements (chaudières performantes, double vitrage, chauffe-eau solaire...), ciblé sur les produits les plus performants au plan énergétique et renforcé pour les énergies renouvelables	↓ PA liée à une réduction de la consommation d'énergie  ↑ PA (PM, polluants organiques) possible lorsque cet instrument conduit à l'implantation de chaudières bois (et autres biomasses) chez les particuliers	↓ CO2 due à la réduction de la consommation d'énergie	Instrument à effets potentiellement synergiques  Effets antagonistes possibles lorsque la mesure conduit à une augmentation de l'utilisation de la biomasse (dépend des conditions, e.g. chaudières utilisées)
<b>Aides publiques pour l'efficacité énergétique</b> <i>(Plan Climat 2004 - 2012)</i>	Aides pour des travaux améliorant l'efficacité énergétique de bâtiments/logements dans des constructions existantes et neuves, et pour des chaudières performantes, des pompes à chaleur, les capteurs solaires ...	↓ PA liée à une réduction de la consommation d'énergie et tant que l'utilisation de biomasse sans traitement adéquat des effluents n'est pas en jeu	↓ CO2 due à la réduction de la consommation d'énergie	Instrument à effets a priori synergiques
<b>Changements de comportement</b>				
<b>Mieux gérer le chauffage</b> <i>(Plan Climat 2004 - 2012)</i>		↓ PA liée à une réduction de la consommation d'énergie	↓ CO2 due à la réduction de la consommation d'énergie	Mesure à effets synergiques
<b>Limitation de la climatisation</b>		↓ PA liée à une réduction de la consommation	↓ GES directement par ↓ des gaz	Mesure à effets synergiques

<p>(Plan Climat 2004 - 2012)</p>		<p>d'énergie L'effet dépend du mix énergétique Dans ce contexte on peut noter que l'usage de la climatisation en été risque d'ajouter des consommations électriques en période de pointe utilisant davantage des centrales thermiques classiques</p>	<p>fluorés et indirectement par ↓ de l'électricité Le deuxième effet dépend du mix énergétique</p>	
----------------------------------	--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

## 7. Conclusions et Perspectives

La compréhension des effets réciproques de la pollution atmosphérique et du réchauffement climatique constitue un challenge scientifique loin d'être achevé et fait encore l'objet d'études approfondies. Les premiers résultats issus de modélisations climatiques régionalisées à l'échelle de l'Europe et couplées à des modèles de chimie et de transport de la pollution atmosphérique mettent en évidence les processus physico-chimiques dont la compréhension permettra d'exploiter des synergies et d'éviter des antagonismes dans la mise en œuvre de politiques de gestion. L'INERIS s'investit pleinement dans ces travaux de recherche aux côtés d'autres équipes de recherche françaises (Laboratoire d'Aérodynamique -CNRS/LA- Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement -CNRS/CEA/LSCE) et étrangère (ICTP). De nouveaux résultats portant notamment sur une meilleure analyse des effets des particules sur le climat sont attendus dans les mois à venir.

Pour ce qui est de l'étude des synergies entre mesures de lutte contre la pollution atmosphérique et mesures de lutte contre le changement climatique, ce premier bilan montre l'intérêt de l'exercice : si un grand nombre de mesures sont effectivement à ranger dans la catégorie « gagnant-gagnant », nombreuses sont également celles qui présentent des effets antagonistes. Il y a donc un réel potentiel d'amélioration de l'efficacité de ces politiques. De plus, pour de nombreuses mesures également, le bilan est mitigé, ou est fortement dépendant des conditions de mise en œuvre et d'accompagnement de la mesure, et dans ce cas, les politiques publiques devront également en tenir compte.

### Perspectives :

#### **Mieux qualifier le degré de synergie, prendre en compte le bilan environnemental global**

Pour certaines mesures dont le niveau de synergie est mauvais ou peu élevé, le bilan environnemental global peut cependant être positif.

Inversement, pour des mesures dont le niveau de synergie est bon, le bilan environnemental global pourrait être mauvais.

Le critère « synergie PA/CC » n'est donc pas le seul à prendre en compte pour la décision.

Dans le présent rapport, nous avons fourni quelques informations très partielles sur le bilan environnemental global de quelques mesures. Une version future de ce travail s'efforcera de compléter et affiner cet aspect pour un plus grand nombre de mesures.

Etant données les contraintes de l'exercice, les évaluations réalisées dans ce rapport sont sommaires.

Pour des mesures à fort enjeu, dans le cas des sources fixes industrielles, on dispose de méthodes plus sophistiquées permettant de comparer moins qualitativement des effets sur la pollution atmosphérique et des effets sur le changement climatique, et d'inclure d'autres effets (impacts sur les milieux aquatiques, sur la santé humaine). Ces méthodes, dérivées de l'Analyse du Cycle de Vie, ont été développées au niveau

européen dans le cadre de la Directive IPPC<sup>10</sup>. L'INERIS a réalisé une adaptation de cette méthode et édité un guide en français : « Bilan de fonctionnement d'une installation IPPC, Guide pour l'analyse du volet technicoéconomique, Rapport d'étude N° INERIS - DRC- 07 - 85842 - 12011A, Octobre 2007 ». Ce guide peut être utilisé pour évaluer le degré de synergie, et le bilan environnemental d'une mesure de réduction de la pollution.

Toujours dans le cas de mesures à très fort enjeu, y compris des enjeux socio-économiques, il peut être utile d'aborder l'évaluation dans un cadre d'analyse socio-économique.

### **Poursuite des travaux :**

Ce premier rapport d'étape sera complété par des travaux qui traiteront des aspects suivants :

- Etude plus détaillée pour certaines mesures à enjeu, notamment en incluant des aspects socio-économiques.
- Compléments sur l'étude des synergies pour des secteurs d'activité peu ou non traités jusqu'à présent : déchets, modes de vie et de consommation, géo-ingénierie.
- Inclusion au sein des mesures étudiées des mesures d'adaptation au changement climatique
- Proposition, pour certaines mesures, des mesures conjointes améliorant le degré de synergie
- Evaluation de la synergie, non seulement pour des mesures individuelles, mais pour des « paquets » de mesures, et pour des programmes d'actions nationaux complets.

---

<sup>10</sup> Document BREF 'Economic and Cross-Media Issues', Integrated Pollution Prevention and Control, European Commission, July 2006.

## 8. Références

ACCENT, 2006, Common Issues between air quality & climate change : research & policy recommendations report, produced by the ACCENT joint research Programme on aerosols, edited by H-C Hanson and C.D. O'Dowd

Allemand, N. (2008) : 'Techniques de réduction des émissions de Nox, de N2O, de NH3 issues des sources fixes industrielles', présentation, Journée d'études du CITEPA, du 18 Novembre 2008, Paris.

Amann M., Cofala J., Klimont Z., Hoglund L., Wagner F. and Winiwarter W. (2004). Synergies between GHG Mitigation and Air Pollution Control. IIASA contribution to Conference of Parties (COP10), Buenos Aires, December 8, 2004.

ARE (2007) : 'Volkswirtschaftliche Auswirkungen der LSVA mit höherer Gewichtslimite', Schlussbericht, Office fédérale du développement territorial ARE.

Barrett, M. (1992) : 'Energy, carbon dioxide and consumer choice', Discussion Paper for the Worldwide Fund for Nature International, UK.

Barrett, M. (2007) : 'Low Emission Energy Scenarios for the European Union', study for Naturvårdsverket, Stockholm, Sweden.

Barrett, M. & Holland, M. (2008) : 'The Costs and Health Benefits of Reducing Emissions from Power Stations in Europe', Air Pollution and Climate Series 20, study for the European Environmental Bureau & The Swedish NGO Secretariat on Acid Rain.

Beevers, S. (2008) : 'Congestion Charging in London', présentation lors du workshop 'Reducing the environmental impacts of transport with behavioural change', UCL, 8-9 January 2009.

Bessagnet B., Meleux F., Menut L., Giorgi F. Climate change impacts on air quality over Europe. EGU general assembly, 13-18 april 2008, Vienna, Austria. [Communication orale] + Geophysical Research Abstracts, 2008, vol. 10, EGU2008-A-11270.

Boucher O., M.S. Reddy, 2008, Climate trade-off between black carbon and carbon dioxide emissions, Energy Policy, Vol. 36, pp 193-200

BREF efficacité énergétique (2008) : 'Draft Reference Document on Best Available techniques for Energy Efficiency, Integrated Pollution Prevention and Control, European Commission, March 2008.

BREF LCP (2006) : 'Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants', Integrated Pollution Prevention and Control, European Commission, July 2006.

BREF Raffinage (2003) : 'Reference Document on Best Available Techniques for Mineral Oil and Gas Refineries', Integrated Pollution Prevention and Control, European Commission, February 2003.

BREF SF (2005) : 'Reference Document on Best Available Techniques in Smitheries and Foundries Industry', Integrated Pollution Prevention and Control, European Commission, May 2005.

CAS (2008b) : 'Perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020 - 2050', rapport de la Commission Energie présidée par Jean Syrota, Centre d'Analyse Stratégique, Paris.

Caserini, S.; Fraccaroli, A.; Monguzzi, A.M.; Moretti, M. & Angelino, E. (2007) : 'New insight into the role of wood combustion as key PM source in Italy and in Lombardy region', Milan/Italie.

CITEPA (2007) : 'Etude relative à la mise à jour du programme national de réduction des émissions atmosphériques et à la révision de la directive plafonds nationaux d'émissions - OPTINEC II', rapport final provisoire, septembre 2007.

CORPEN (2006) : 'Les émissions d'ammoniac et de gaz azotés à effet de serre en agriculture', Comité d'orientation pour des pratiques agricoles respectueuses de l'environnement.

Derwent R.G., P.G. Simmonds, A.J. Manning, T.G. Spain, 2007, Trends over a 20-year period from 1987 to 2007 in surface ozone at the atmospheric research station, Mace Head, Ireland, Atmospheric Environment, Volume 41, Issue 39, Pages 9091-9098

Dijkema, M.B.A.; van der Zee, S.C. : Brunekreef, B. & van Strien, R.T. (2008) : 'Air quality effects of an urban highway speed limit reduction', Atmospheric Environment 42 (2008) 9098-9105.

EEA, 2004, European Environment Agency, Air Pollution and Climate change policies in Europe : exploring linkages and the added value of an integrated approach, EEA technical report n° 5/2004, [http://reports.eea.europa.eu/technical\\_report\\_2004\\_5/en/Technical\\_report\\_5\\_2004\\_web.pdf](http://reports.eea.europa.eu/technical_report_2004_5/en/Technical_report_5_2004_web.pdf)

EEA, 2006, European Environment Agency, Air Quality and ancillary benefits of Climate change policies, EEA technical report n° 4/2006, [http://reports.eea.europa.eu/technical\\_report\\_2006\\_4/en/](http://reports.eea.europa.eu/technical_report_2006_4/en/)

EEA (2006b) : 'Energy and environment in the European Union - Tracking progress towards integration', EEA Report No 8/2006, Copenhagen, Denmark.

EEA (2008b) : 'Success stories within the road transport sector on reducing greenhouse gas emission and producing ancillary benefits', EEA Technical report No 2/2008, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark.

EGTEI (2005) : 'Wood combustion in domestic appliances', synopsis sheet, [http://www.citepa.org/forums/egtei/egtei\\_index.htm](http://www.citepa.org/forums/egtei/egtei_index.htm).

EGTEI (2008) : 'EGTEI expert sub-group on Emerging Technologies/Techniques on Large Combustion Plants >500 MWth up to 2030 (LCP2030 sub-group)', Draft Final Report, July 2008, CLRTAP/ADEME.

EGTEI (2009): 'Guidance document on technical annexes for the revision of the Gothenburg Protocol', draft document.

ENTEC (2005a) : 'Preparation of the review relating to the Large Combustion Plant Directive', Report for European Commission, Environment Directorate General, Final Report, July 2005, ENTEC UK Limited.

ENTEC (2005b) : 'Ship Emissions: Assignment, Abatement and Market-based Instruments Task 2b - NOX Abatement', European Commission Directorate General Environment, Service Contract, Final Report, August 2005, ENTEC UK Limited.

ENTEC (2005c) : 'Assignment, Abatement and Market-based Instruments. Task 2c - SO2 Abatement', European Commission, Directorate General Environment, Service Contract, Final Report, August 2005, ENTEC UK Limited.

EUCAR / JRC / CONCAWE (2005) : 'Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context', présentation, [http://www.energy.ca.gov/bioenergy\\_action\\_plan/documents/2006-03-09\\_workshop/WTW\\_STUDY\\_2005.PDF](http://www.energy.ca.gov/bioenergy_action_plan/documents/2006-03-09_workshop/WTW_STUDY_2005.PDF).

Giorgi F., Meleux F. Modeling the regional effects of climate change on air quality. Comptes Rendus Geoscience, 2007, vol. 339, n° 11-12, pp. 721-733.

Hammingh, P. ; Smekens, K. ; Koelemeijer, R.; Daniels, B. & Kroon, P. (2008) : 'Effects of Climate Policies on Air Pollutants in the Netherlands. First results of the Dutch Policy Research Programme on Air and Climate (BOLK)', Pays-Bas.

HELCOM (2005 : 'HELSINKI COMMISSION HELCOM MARITIME 4/2005 Maritime Group Fourth Meeting', Klaipeda, Lithuania, 11-13 October 2005, Agenda Item 6 Emissions from ships, Document code: 6/3, Date: 26.09.2005, Submitted by Finland and Sweden.

IPCC 2008, Climate change and water, edited by Bryson Bates, Zbigniew W. Kundzewicz, Shaohong Wu, Jean Palutikof.

IVD (2008b) : 'Effiziente Bereitstellung aktueller Emissionsdaten für die Luftreinhaltung', Endbericht, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen, Universität Stuttgart, étude pour UBA Allemagne.

Meleux F., Bessagnet B., Solmon F., Giorgi F. Impact of climate change on European air quality. Atmospheric chemistry, climate, and transboundary air pollution workshop, 9-13 juin 2008, Washington DC, USA

Meleux F, Solmon F., Giorgi F., Increase in summer European ozone amounts due to climate change. Atmospheric Environment, 2007, vol. 41, n° 35, pp. 7577-7587

Nagl., C.; Mossmann, L. & Schneider, J. (2006) : 'Assessment of plans and programmes reported under 1996/62/EC - Final report', Service contract to the European Commission - DG Environment Contract No. 070402/2005/421167/MAR/C1, Umweltbundesamt, Vienna, Austria.

ONERC (2006) : 'Stratégie nationale d'adaptation au changement climatique', Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique, Ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables, France.

Péré, J. C., M. Mallet, B. Bessagnet and V. Pont, 2009, Evidence of the aerosol core-shell mixing state over Europe during the heat wave of summer 2003 by using CHIMERE simulations and AERONET inversions. submitted to GRL

Plan Climat (2004) : 'Plan Climat 2004 - Face au changement climatique agissons ensemble', Ministère de l'écologie et du développement durable, France.

Plan Climat (2006) : 'Actualisation 2006 du Plan Climat 2004 - 2012 - Face au changement climatique, agissons ensemble', Premier Ministre, France.

PREPA (2004) : 'Programme national de réduction des émissions de polluants atmosphériques (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, COV, NH<sub>3</sub>) en application de la Directive 2001/81/CE du 23 octobre 2001', France.

Richert, P. (2007) : 'Qualité de l'air et changement climatique : un même défi, une même urgence - Une nouvelle gouvernance pour l'atmosphère', A l'occasion des 10 ans de la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie, France.

SLB (2006) : 'The Stockholm Trial - Effects on Air Quality and Health', SLB analysis 4 ; City of Stockholm Environment and Health Administration, Stockholm and Uppsala County Air Quality Associations, October 2006.

SNDD (2006) : 'Stratégie nationale de développement durable 2003-2008 - agir dans la dynamique européenne', programmes d'action, actualisation novembre 2006, Premier Ministre, France.