

RAPPORT D'ÉTUDE
N°80/2005

13/09/2005

**Calculs préparatoires pour la stratégie
thématique CAFE (Clean Air For Europe)**

Calculs préparatoires pour la stratégie thématique CAFE (Clean Air For Europe)

Unité MECO
(Modélisation et analyse économique pour la gestion des risques)
Direction des Risques Chroniques

Client : Ministère de l'Écologie et du Développement Durable

Liste des personnes ayant participé à l'étude : Sébastien Soleille

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. Étant 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.

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Sébastien SOLEILLE	Jean-Marc BRIGNON	Laurence ROUÏL
Qualité	Ingénieur de la DRC	Ingénieur de la DRC	Ingénieur de la DRC
Visa			

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	5
LISTE DES TABLEAUX	7
LISTE DES FIGURES	7
RÉSUMÉ	9
Les scénarios limites pour la France en 2020.....	9
Les scénarios optimisés calculés par le modèle RAINS.....	10
Les coûts des scénarios calculés par le modèle RAINS	11
L'analyse coûts / bénéfiques des stratégies CAFE	11
TABLE DES ABRÉVIATIONS	13
INTRODUCTION	15
1. LES SCÉNARIOS LIMITES DE L'IIASA POUR LA FRANCE EN 2020	17
1.1. Sources d'émission, techniques de réduction et réglementation.....	17
1.1.1. Classification des sources d'émission	17
1.1.2. Les secteurs d'activité pour les sources fixes.....	18
1.1.3. Techniques de réduction des émissions	18
1.1.4. Les réglementations prises en compte	19
1.2. Le scénario de référence 2020 (CLE) pour la France	20
1.2.1. Émissions de NOx	20
1.2.2. Émissions de SO ₂	21
1.2.3. Émissions de particules.....	23
1.2.4. Émissions de COV.....	25
1.2.5. Émissions de NH ₃	26
1.3. Le scénario MTRF.....	26
1.3.1. Hypothèses	26
1.3.2. Émissions de NOx	27
1.3.3. Émissions de SO ₂	27
1.3.4. Émissions de PM _{2,5}	28
1.3.5. Émissions de COV.....	29
1.3.6. Émissions de NH ₃	29
1.4. Émissions françaises en 2010 et plafonds de la directive NEC.....	30
2. LES SCÉNARIOS OPTIMISÉS CALCULÉS PAR LE MODÈLE RAINS	33
2.1. Généralités.....	33
2.2. Rappel sur le concept de 'gap closure'	33
2.3. Les contraintes environnementales pour les particules	34
2.3.1. Première méthode : Valeurs limites de concentration ('uniform cap')	35
2.3.2. Réduction relative ('gap closure')	35
2.3.3. Minimiser le nombre total d'années de vie perdues (pour un budget donné) pour l'ensemble de l'Europe	35
2.3.4. Comparaison des trois approches.....	35
2.4. Les contraintes environnementales pour les autres effets.....	36
2.4.1. Ozone.....	37
2.4.2. Eutrophisation	37
2.4.3. Acidification.....	37
2.5. Les scénarios finaux (scénarios D23)	38
2.5.1. Niveaux d'ambition	38

2.5.2. Réduction des émissions	38
2.5.3. Mesures prises dans le scénario D23, cas B	41
2.6. Étroitesse de la marge de manœuvre	41
2.6.1. Marge de manœuvre dans la définition des stratégies de réduction des émissions ..	41
2.6.2. Importance et incertitudes des scénarios CLE et MTR	42
3. LES COÛTS DES SCÉNARIOS DU MODÈLE RAINS	45
3.1. Coûts du scénario de référence (CLE 2020).....	45
3.1.1. Coûts totaux	45
3.1.2. Coûts par polluant	45
3.1.3. Coûts à la tonne évitée.....	46
3.1.4. Biais dans les hypothèses	46
3.2. Coûts des scénarios optimisés finaux (D23).....	46
3.2.1. Coûts totaux.....	46
3.2.2. Coûts par polluant	49
3.2.3. Coûts à la tonne de polluant	49
3.3. Coûts totaux à partir de la situation en 2000 (CLE + D23)	50
3.3.1. Importance relative des coûts du scénario de référence.....	50
3.3.2. Coûts globaux	50
3.3.3. Coûts par habitant	51
3.3.4. Coûts rapportés au PIB	52
3.3.5. Récapitulatif	52
4. L'ANALYSE COÛTS / BÉNÉFICES DES STRATÉGIES CAFE.....	55
4.1. Déroulement de l'étude.....	55
4.1.1. Objectifs de l'étude	55
4.1.2. Déroulement de l'étude et consultation des experts	55
4.2. Méthodologie	56
4.2.1. Méthodologie générale.....	56
4.2.2. Quantification des risques	56
4.2.3. Quelle valeur monétaire pour la vie humaine ?	57
4.2.4. Étude de sensibilité.....	58
4.3. Les avis sur la méthodologie	59
4.3.1. Des incertitudes importantes	59
4.3.2. Des ambitions revues à la baisse.....	59
4.3.3. L'avis du Concawe.....	60
4.3.4. L'analyse critique ('peer review') de la méthodologie	60
4.4. Premiers résultats.....	61
4.4.1. Impacts du scénario de référence.....	61
4.4.2. Bénéfices des scénarios D23	62
4.4.3. Comparaison des coûts et bénéfices du scénario de référence.....	63
4.4.4. Comparaison entre les coûts et les bénéfices des scénarios D23.....	63
4.5. Impacts économiques et sociaux.....	64
CONCLUSION	65
BIBLIOGRAPHIE	67
ANNEXE. EXEMPLE DE TABLEAU DE CALCUL DE RAINS	69

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Récapitulatif des scénarios D23	38
Tableau 2. Coûts du scénario de référence (CLE 2020) pour la France et pour l'Union européenne	45
Tableau 3. Récapitulatif des coûts pour la France du scénario CLE et des coûts supplémentaires pour appliquer les stratégies A et C	52
Tableau 4. Valeurs utilisées dans l'analyse coûts / bénéfiques de CAFE en ce qui concerne la mortalité due à la pollution atmosphérique (particules et ozone)	58
Tableau 5. Valeurs utilisées dans l'analyse coûts / bénéfiques de CAFE en ce qui concerne la morbidité due à la pollution atmosphérique (particules et ozone)	58
Tableau 6. Évaluation monétaire des dommages sanitaires causés par la pollution atmosphérique dans l'Europe des 25, en 2000 et en 2020, en milliards d'euros	62
Tableau 7. Bénéfices apportés dans l'Europe des 25 en 2020 par le passage de la situation de référence à diverses stratégies de réduction des émissions, en milliards d'euros.....	62
Tableau 8. Bénéfices apportés en France en 2020 par le passage de la situation de référence à diverses stratégies de réduction des émissions, en milliards d'euros	63
Tableau 9. Comparaison des coûts et des bénéfiques des scénarios MTFR et D23 pour l'Europe des 25 et pour la France, en milliards d'euros.....	63
Tableau 10. Impacts socio-économiques des différents scénarios D23.....	64

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Évolution des émissions françaises de NO _x dans le scénario de référence de l'IIASA.....	20
Figure 2. Évolution des émissions françaises de SO ₂ dans le scénario de référence de l'IIASA.....	22
Figure 3. Évolution des émissions françaises de PM _{2,5} dans le scénario de référence de l'IIASA.....	23
Figure 4. Évolution des émissions françaises de COV dans le scénario de référence de l'IIASA.....	25
Figure 5. Évolution des émissions françaises de NH ₃ dans le scénario de référence de l'IIASA.....	26
Figure 6. Émissions françaises de NO _x en 2000 et en 2020, selon deux scénarios de l'IIASA (CLE et MTFR), en kilotonnes	27
Figure 7. Émissions françaises de SO ₂ en 2000 et en 2020, selon deux scénarios de l'IIASA (CLE et MTFR), en kilotonnes	28
Figure 8. Émissions françaises de PM _{2,5} en 2000 et en 2020, selon deux scénarios de l'IIASA (CLE et MTFR), en kilotonnes.....	29
Figure 9. Émissions françaises de COV en 2000 et en 2020, selon deux scénarios de l'IIASA (CLE et MTFR), en kilotonnes.....	29
Figure 10. Émissions françaises de NH ₃ en 2000 et en 2020, selon deux scénarios de l'IIASA (CLE et MTFR), en kilotonnes.....	30

Figure 11. Le concept de gap utilisé pour la directive NEC et le concept de gap proposé maintenant par l'IIASA	34
Figure 12. Émissions des différents polluants dans les scénarios de référence, MTFR et D23 pour l'Europe des 25, en % des émissions en 2000	39
Figure 13. Émissions des différents polluants dans les scénarios de référence, MTFR et D23 pour la France, en % des émissions en 2000	39
Figure 14. Émissions des différents polluants pour la France en 2000 et objectifs de réduction déjà fixés pour 2010 (NEC) et envisagés pour 2020 (niveau d'ambition moyen ou B), en kilotonnes	40
Figure 15. Émissions françaises dans les scénarios CLE et MTFR, en % des émissions en 2000	42
Figure 16. Illustration graphique de l'étranglement du 'domaine de définition' de l'optimisation : Comparaison entre la marge de manœuvre considérée par l'IIASA et une vision plus réaliste	43
Figure 17. Coûts des trois stratégies D23 en fonction des niveaux d'ambition environnementale, en millions d'euros/an	47
Figure 18. Coûts par habitant des trois stratégies D23 en fonction des niveaux d'ambition environnementale, en €/personne/an	48
Figure 19. Coûts des trois stratégies D23 en fonction des niveaux d'ambition environnementale, rapportés au PIB, en % du PIB	48
Figure 20. Coûts pour la France des réductions des émissions des sources fixes, par polluant, dans les trois scénarios optimisés (en supplément des coûts de la situation de référence (CLE)), en millions d'euros par an	49
Figure 21. Coûts totaux (situation de référence + stratégies D23) en fonction des niveaux d'ambition environnementale, en millions d'euros/an	50
Figure 22. Coûts totaux (situation de référence + stratégies D23) par habitant en fonction des niveaux d'ambition environnementale, en euros par personne et par an	51
Figure 23. Coûts totaux (situation de référence + stratégies D23) rapportés au PIB, en pourcents du PIB	52

RÉSUMÉ

LES SCÉNARIOS LIMITES POUR LA FRANCE EN 2020

À partir de scénarios d'activité (notamment des scénarios énergétiques fournis par le modèle PRIMES de l'université d'Athènes), l'IIASA a construit deux scénarios limites pour l'année 2020 :

- un scénario de référence (CLE) qui correspond aux émissions telles qu'elles seraient si l'on se contentait de mettre en œuvre les mesures déjà décidées, sans mesure supplémentaire ;
- un scénario qui correspond à la mise en œuvre de toutes les techniques de dépollution possible ('MTFR' ou Maximum technically feasible reduction).

Ces scénarios servent de base pour tous les calculs effectués pour élaborer la stratégie thématique CAFE.

Pour le scénario de référence (CLE), l'IIASA prévoit, pour chaque sous-secteur d'activité, l'impact des réglementations communautaires et nationales déjà décidées sur le taux de pénétration des différentes techniques de réduction des émissions. À partir de ces taux de pénétration et des scénarios d'activité qui donnent des prévisions de l'évolution de l'activité de ces sous-secteurs, l'IIASA calcule les émissions de chacun de ces sous-secteurs d'activité.

Dans ce scénario de référence, les prévisions de l'IIASA pour la France sont les suivantes :

- En 2010, **la France ne respecte pas le plafond d'émission fixé par la directive 2001/81/CE pour les NOx.**
- Pour les **sources mobiles**, les techniques de réduction des émissions prises en compte sont **l'amélioration de la qualité des carburants** et le renouvellement du parc qui est accompagné de la mise en place de **normes Euro** de plus en plus contraignantes : en 2020, 97 % des poids lourds respectent la norme Euro V et 100 % des véhicules légers respectent la norme Euro IV.
- Les principaux responsables de la baisse des **émissions de NOx** entre 2000 et 2020 (-43 %) sont les sources mobiles. Elles baissent leurs émissions de 55 %. Les sources fixes ne réduisent leurs émissions que de 16 %. **La quasi-intégralité de la baisse des émissions des sources fixes est effectuée dans les centrales thermiques**, avec une diminution de 61 %, malgré un doublement de leur activité (+101 %). L'IIASA estime que toutes les centrales respectent les valeurs limites d'émission de la directive GIC (Grandes installations de combustion), ce qui impose de dépolluer l'intégralité du parc dès 2010.
- Dès 2000, l'essentiel des émissions de SO₂ est dû aux sources fixes. **Les émissions de SO₂ des sources fixes baissent de 46 %** entre 2000 et 2020. L'ensemble des secteurs d'activité participent à cette baisse même si ce sont les centrales thermiques qui y contribuent le plus (baisse des émissions de 86 %), principalement grâce à l'installation de désulfuration des gaz de sortie, ou FGD (le taux d'équipement en FGD des centrales thermiques est généralement compris entre 80 et 100 % dès 2015).
- Pour les particules (PM_{2,5}) les sources mobiles baissent leurs émissions de

65 % entre 2000 et 2020 (durcissement des normes pour les engins terrestres), contre 34 % pour les sources fixes. **En 2020, presque un tiers des émissions de particules des sources mobiles ne sont pas liées aux fumées d'échappement mais sont causées par l'usure des pneus, des routes et des freins.** Parmi les sources fixes, l'effort est principalement supporté par la combustion domestique, dont les émissions de $PM_{2,5}$ diminuent de 47 % entre 2000 et 2020 alors que cette activité augmente de 1 %.

- Les **émissions françaises de COV baissent de 40 %** entre 2000 et 2020, grâce à des techniques de réduction très variées.
- Les émissions de NH_3 sont dues à l'élevage et à la production et à l'utilisation d'engrais. Les émissions dues à l'élevage diminuent très légèrement grâce à une couverture des stockages extérieurs du fumier. En revanche les engrais ne font l'objet d'aucune action de réduction des émissions.

LES SCÉNARIOS OPTIMISÉS CALCULÉS PAR LE MODÈLE RAINS

L'IIASA a calculé plusieurs stratégies optimisées de réduction des émissions, à partir de différents jeux de contraintes environnementales. Ces calculs d'optimisation ne concernent que les sources fixes ; les mesures de réduction des émissions des sources mobiles sont étudiées séparément.

Les jeux de contraintes environnementales finaux (D23) visent à réduire en même temps les effets des particules et de l'ozone sur la santé et ceux de l'acidification et de l'eutrophisation sur les écosystèmes. Ils sont déclinés en trois niveaux d'ambition environnementale ('faible', 'moyen' et 'élevé' ou 'A', 'B' et 'C').

Pour les particules, l'IIASA a étudié trois méthodes pour fixer les objectifs des stratégies de réduction des émissions :

- fixer une valeur limite pour la concentration en $PM_{2,5}$ dans les zones urbaines ;
- viser une réduction des effets (ou des expositions), exprimée en pourcentage, de l'écart entre la situation de référence en 2020 et la situation MTRF en 2020 (principe du 'gap closure') ;
- viser une diminution globale du nombre de mois de vie perdus à cause de l'exposition aux $PM_{2,5}$ pour l'ensemble de l'Europe.

Cette troisième méthode est à la fois la plus robuste (car définie plus simplement), celle qui atteint les meilleurs résultats à coût équivalent (rapport coût/efficacité le plus faible) ; c'est également une des plus équitables. Jusqu'à maintenant, les objectifs de l'optimisation étaient fixés localement (par cellule) car certains pensaient que c'était plus équitable que d'optimiser globalement. Or les calculs récents de l'IIASA montrent que ce n'est pas le cas.

Pour les particules, la contrainte d'optimisation choisie est donc cette troisième méthode, c'est-à-dire la diminution globale du nombre de mois de vie perdus à cause de l'exposition aux $PM_{2,5}$ pour l'ensemble de l'Europe.

Pour les trois autres effets (ozone, acidification et eutrophisation), la contrainte d'optimisation est une réduction relative, exprimée en pourcentage ('gap closure') de l'indicateur considéré entre le scénario CLE et le scénario MTRF. Ce 'gap closure' est donc très différent de celui utilisé dans les précédents calculs de RAINS : en effet le niveau d'ambition ne dépend plus de l'objectif environnemental de long terme mais des possibilités technico-économiques de réduction des émissions (exprimées dans le scénario MTRF).

La principale faiblesse de ces calculs d'optimisation réside dans la faible marge de manœuvre existant entre les scénarios CLE et MTRF. Les résultats des différentes stratégies optimisées **dépendent beaucoup plus de ces deux scénarios que des différents niveaux d'ambition environnementale.** Or ces scénarios prospectifs sont très incertains.

LES COÛTS DES SCÉNARIOS CALCULÉS PAR LE MODÈLE RAINS

L'IIASA a calculé les coûts de réduction des émissions nécessaires pour passer des émissions en 2000 aux émissions en 2020 dans les scénarios CLE et MTRF. Il a également calculé le coût des différentes stratégies optimisées de réduction des émissions, c'est-à-dire les coûts de réduction des émissions nécessaires pour passer en 2020 des émissions du scénario CLE aux émissions des scénarios D23.

D'après les calculs de l'IIASA, appliquer les politiques déjà décidées de politique de lutte contre la pollution atmosphérique pour 2020 (scénario CLE) coûtera 7,8 milliards d'euros par an à la France et 65,9 milliards d'euros par an à l'Union européenne.

Si l'on considère uniquement les coûts additionnels pour les sources fixes, c'est-à-dire les coûts prévus pour qu'en 2020 les sources fixes aient réduit leurs émissions du niveau de la situation de référence (CLE) aux niveaux des stratégies optimisées D23 d'ambition environnementale faible (cas A), moyenne (cas B) ou élevée (cas C), ils s'élèvent pour la France à 739 millions d'euros par an pour la stratégie A, 1 704 M€/an pour la stratégie B et 2 095 M€/an pour la stratégie C. Dans cette optique c'est pour la France que les coûts sont les plus élevés.

Il faut toutefois noter que les coûts du scénario de référence (CLE) sont beaucoup plus importants que les coûts additionnels des nouvelles politiques, même dans l'hypothèse avec une ambition élevée (cas C). Ils représentent entre 84 et 96 % des coûts totaux (coûts de référence + coûts de la stratégie d'ambition moyenne) pour l'Europe des 25 et entre 79 et 91 % des coûts totaux pour la France.

Si l'on considère maintenant les **coûts totaux** par personne et par an, c'est-à-dire la **somme des coûts du scénario de référence (CLE) et de ceux des scénarios optimisés (D23), la France se situe dans les pays avec les coûts les moins élevés** (158 € par personne et par an), devant le Royaume-Uni (148 €/pers./an) et quelques nouveaux pays membres (à partir de 108 €/pers./an pour Malte). La moyenne européenne se situe à 177 € par personne et par an. Par rapport au PIB, les pays qui devraient effectuer les efforts les plus importants sont les nouveaux adhérents (jusqu'à près de 1,8 % du PIB pour l'Estonie, la Slovaquie et la Lituanie). Ceux qui devraient en faire le moins sont les quatre pays les plus peuplés (en plus de Malte, du Danemark et de la Suède) : le Royaume-Uni (0,35 % du PIB), la France (0,44 %), l'Italie (0,48 %) et l'Allemagne (0,52 %). La moyenne européenne se situe à 0,55 % du PIB.

L'ANALYSE COÛTS / BÉNÉFICES DES STRATÉGIES CAFE

AEA Technology a réalisé pour le compte de Commission européenne une étude pour analyser les bénéfices, et plus généralement les impacts socio-économiques, de différentes stratégies de réduction des émissions atmosphériques envisagées dans le cadre du programme CAFE.

La méthodologie définitive a été publiée en février 2005. Un document pour présenter les impacts sanitaires des scénarios de référence et MTFR a également été publié. En outre des calculs concernant les impacts sanitaires de quelques scénarios optimisés (D23, cas A, B et C) ont été présentés.

L'étude est beaucoup moins ambitieuse que ce qui était initialement prévu et annoncé : pour l'instant seuls les effets sanitaires sont pris en compte, et partiellement seulement.

Les méthodes pour ce genre d'études sont loin d'être parfaitement au point. Même très bien réalisée, une étude de ce type souffre forcément de certaines lacunes et incohérences et est entachée d'incertitudes importantes.

Les incertitudes sur les premiers résultats sont effectivement très grandes : AEA Technology ne donne les résultats que pour certains effets. Seule la variation d'un nombre très restreint d'hypothèses est étudiée et les résultats varient déjà d'un facteur supérieur à trois en fonction des jeux d'hypothèses considérés.

D'après les résultats de l'étude :

- les bénéfices sont supérieurs aux coûts, même avec les scénarios les plus ambitieux (MTFR compris) ;
- au niveau européen, ces stratégies de réduction des émissions n'ont pas d'effet sur le niveau d'emploi mais un impact sur le PIB (baisse moyenne du PIB comprise entre 0,04 % et 0,12 % en fonction des scénarios étudiés).

TABLE DES ABRÉVIATIONS

CAFE :	Clean air for Europe
CITEPA :	Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique
CLE :	Current legislation
COV :	Composés organiques volatils
EGTEI :	Expert group on techno-economic issues
FGD :	Flue gas desulfuration
GIC :	Grandes installations de combustion
GIEC :	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
IIASA :	International institute for applied systems analysis
IPPC :	Integrated pollution prevention and control
MTFR :	Maximum technically feasible reduction
NEC :	National emission ceiling
OMS :	Organisation mondiale de la santé
PIB :	Produit intérieur brut
PM _{2,5} :	Particules de diamètre inférieur à 2,5 microns
RAINS :	Regional air pollution information and simulation
SCR :	Selective catalytic reduction
SNCR :	Selective non-catalytic reduction
TFIAM :	Task force on integrated assessment modelling
VOLY :	Value of life years
VSL :	Value of statistical life

INTRODUCTION

La Commission européenne a lancé en 2001 le programme CAFE, Clean Air For Europe. Il s'agit d'un programme d'analyse technique qui doit notamment déboucher sur la définition de politiques européennes de réduction des émissions atmosphériques. Ces politiques devraient être décrites sous la forme d'une Stratégie thématique, initialement prévue pour mai 2005. Cette stratégie thématique devrait être suivie par quelques directives, notamment par la révision de la directive 2001/81/CE du 23 octobre 2001 fixant des plafonds d'émission nationaux pour certains polluants atmosphériques (oxydes d'azote, dioxyde de soufre, composés organiques volatils non méthaniques et ammoniac). Aux polluants visés par la directive de 2001 s'ajoutent maintenant les particules de diamètre inférieur à 2,5 microns (PM_{2,5}). Ce polluant devrait également faire l'objet d'une surveillance réglementaire.

Plusieurs centres de recherche et d'expertise sont mis à contribution par la Commission pour l'aider dans la définition de cette stratégie de lutte contre la pollution atmosphérique. Ainsi l'IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis) a calculé, au moyen de son modèle RAINS (Regional Air Pollution Information and Simulation), des stratégies optimisées de réduction des émissions. Il s'agit de stratégies de réduction des émissions qui atteignent, à un coût minimal, des objectifs environnementaux fixés. Ceux-ci sont exprimés en termes d'exposition de la population à l'ozone et aux particules et d'exposition des écosystèmes à l'acidification et à l'eutrophisation. Pour chacune des stratégies définies, sont calculées les émissions en 2020 de chacun des polluants dans chaque État membre, les coûts nécessaires pour obtenir ces réductions d'émission et les bénéfices attendus pour la santé humaine et les écosystèmes. Ces bénéfices sont quantifiés puis évalués en termes monétaires par AEA Technology, en complément du chiffrage des coûts effectué par l'IIASA.

L'INERIS suit depuis plusieurs années les travaux scientifiques qui servent de base à la définition des politiques européennes de lutte contre la pollution atmosphérique (protocole de Göteborg, directive 2001/81/CE fixant des plafonds nationaux d'émission). L'objectif de ce rapport est de synthétiser et de critiquer les importants travaux préparatoires à la définition de la stratégie thématique CAFE à l'intention des différentes parties prenantes françaises (pouvoirs publics, industriels, associations, etc.).

Le fonctionnement du modèle RAINS, la définition des contraintes environnementales et la façon de calculer des stratégies optimisées de réduction des émissions ne sont pas explicités dans ce rapport. Pour avoir une présentation critique du modèle RAINS et de son utilisation, il est possible de se reporter à des rapports précédents de l'INERIS :

- Soleille, S., Brignon, J.M., Farret, R., Landrieu, G., Le Gall, A.C., Rouïl, L. (2003). L'IIASA et la modélisation intégrée de la pollution atmosphérique transfrontière - Bilan et évaluation. INERIS, Rapport DRC/MECO - 2003 - 45981/note_IIASA.
- Soleille, S. (2004). The RAINS model, uncertainty and optimisation. INERIS, DRC/MECO – 2004 - 45981/rains_review_ineris.

Dans le présent rapport, nous commençons par présenter les calculs de l'IIASA

pour les projections d'émission en 2020 dans leurs deux scénarios 'limites' :

- le scénario de référence (Current legislation, ou CLE) qui représente, d'après leurs hypothèses, la situation en 2020 en appliquant toutes les politiques de réduction des émissions déjà décidées ;
- le scénario MTR (Maximum technically feasible reduction) qui correspond à la situation si l'on met en place systématiquement toutes les techniques de dépollution applicables.

L'IIASA utilise ces deux scénarios comme 'bornes' pour la définition de stratégies optimisées de réduction des émissions. Nous présentons dans une deuxième partie les scénarios optimisés finaux (D23) retenus par l'IIASA.

Nous abordons ensuite les coûts de réduction des émissions dans les différents scénarios calculés par l'IIASA (CLE et D23).

Enfin nous faisons un bilan rapide de l'analyse coûts / bénéfices conduite en parallèle par AEA Technology et présentons son application aux scénarios explicités dans les deux premières parties.

1. LES SCÉNARIOS LIMITES DE L'IIASA POUR LA FRANCE EN 2020

À partir des scénarios énergétiques fournis par le modèle PRIMES de l'université d'Athènes, l'IIASA a construit deux scénarios de base pour l'année 2020 :

- un scénario de référence ('baseline 2020' ou CLE) qui correspond aux émissions telles qu'elles seraient si l'on se contentait de mettre en œuvre les mesures déjà décidées, sans mesure supplémentaire ;
- un scénario qui correspond à la mise en œuvre de toutes les techniques de dépollution possible ('MTFR' ou Maximum technically feasible reduction).

Ces scénarios servent de base pour tous les calculs effectués pour déterminer la stratégie thématique CAFE.

Nous cherchons ici à présenter succinctement quelles sont les hypothèses de l'IIASA et ce que contiennent ces scénarios pour le cas français.¹

1.1. SOURCES D'ÉMISSION, TECHNIQUES DE RÉDUCTION ET RÉGLEMENTATION

1.1.1. Classification des sources d'émission

Le modèle RAINS considère, pour chaque polluant, un certain nombre de sources d'émission. Ces sources d'émission sont réparties en fonction :

- du secteur,
- de l'activité, elle-même parfois scindée en fonction du combustible employé ;
- du moyen de dépollution mis en œuvre.

Pour chacune de ces sources le modèle considère son niveau d'activité (exprimé en PJ pour la production d'énergie) et le taux d'application du moyen de dépollution. Il en déduit les émissions de la source, au moyen du taux d'émission avant la mise en place des techniques de dépollution et du taux de réduction des émissions permises par la technique de dépollution considérée.²

Le niveau d'agrégation des sources d'émission dépend du polluant considéré. Ainsi les sources sont plus agrégées pour le SO₂ et les NO_x que pour les particules.

À titre d'exemple, pour la France en 2000, pour les NO_x, le modèle RAINS considère 33 sources d'émission fixes et 57 sources d'émission mobiles (si l'on ne fait pas la distinction en fonction des techniques de dépollution mises en œuvre)³. Toujours pour la France en 2000, pour les particules, le modèle RAINS considère au total 158 sources d'émission fixes et 57 sources d'émission mobiles (si l'on ne fait pas la distinction en fonction des techniques de dépollution mises en œuvre)⁴.

¹ Cette étude a été réalisée à partir des données disponibles sur le site Internet de l'IIASA. Le scénario étudié est celui appelé 'CP_CLE_Aug04 (Nov04)'. L'extraction de données a été effectuée le 15 mars 2005 pour la description des scénarios et le 15 avril 2005 pour les données d'émission.

² On trouvera plus de précisions, et notamment les formules de calcul, en annexe.

³ Si l'on fait la distinction entre les différentes techniques de dépollution mises en œuvre, le modèle RAINS considère alors 37 sources d'émission fixes et 102 sources d'émission mobiles.

⁴ Si l'on fait la distinction entre les différentes techniques de dépollution mises en œuvre, le modèle RAINS considère alors 297 sources d'émission fixes et 102 sources d'émission mobiles.

1.1.2. Les secteurs d'activité pour les sources fixes

Les sources fixes sont réparties en quelques grands secteurs d'activité :

- production et transformation de combustibles (CON_COMB) ;
- sources domestiques (DOM) ;
- combustion dans l'industrie (IN_BO et IN_OC) ;
- centrales thermiques et chauffage urbain (PP) et procédés industriels (PR) ;
- les sources agricoles,
- des sources spécifiques aux émissions de COV,
- et d'autres sources moins importantes (la construction, CONSTRUCT ; les activités de stockage et de manipulation de certains biens, STH ; des activités résidentielles hors chauffage, RES ; les activités minières, MINE).

Pour chacun de ces secteurs, plusieurs 'activités' sont considérées, généralement entre 5 et 20 par secteur. Pour la combustion, on distingue également plusieurs types de combustibles. Il s'agit principalement de :

- charbon brun ou lignite (BC) ;
- charbon dur (HC) ;
- gaz naturel (GAS) ;
- fioul lourd (HF) ;
- distillats moyens : gazole et fioul domestique (MD) ;
- autres combustibles solides : biomasse, déchets, bois (OS).

Pour les combustibles solides (BC, HC et OS), ils sont ensuite séparés en deux ou trois qualités différentes.

1.1.3. Techniques de réduction des émissions

1.1.3.1. Sources fixes

Pour les émissions de NO_x dues à la combustion, les techniques de réduction considérées sont essentiellement soit des modifications de la combustion (CM), soit la SCR (réduction catalytique sélective). Pour les émissions de NO_x dues aux procédés industriels, on distingue simplement trois niveaux de réduction des émissions.

Pour les émissions de SO₂ dues à la combustion, les techniques de réduction considérées sont essentiellement soit l'utilisation de combustibles à faible teneur en soufre (LS) ; de l'injection de calcaire (LINJ) ou de la désulfuration des gaz de sortie (FGD). Pour les émissions de SO₂ dues aux procédés industriels, on distingue simplement trois niveaux de réduction des émissions.

Pour les particules, les techniques de réduction considérées sont essentiellement des cyclones (CYC) ; des bonnes pratiques (GH) ; des précipitateurs électrostatiques, à un champ, deux champs ou trois champs et plus (ESP).

Pour les COV, les sources d'émission sont très variées et les techniques de réduction également.

Pour le NH₃, les rares techniques de réduction mises en œuvre consistent à couvrir les stockages extérieurs de fumier.

1.1.3.2. Sources mobiles

Pour les sources mobiles, les techniques de réduction des émissions prises en compte sont :

- l'amélioration de la qualité des carburants (baisse de la teneur en soufre notamment) ;
- le renouvellement du parc qui est accompagné de normes Euro de plus en plus contraignantes.

1.1.4. Les réglementations prises en compte

Dans son scénario de référence, l'IIASA prend en compte les effets des mesures réglementaires communautaires. Il prend également en compte les mesures réglementaires et les pratiques nationales si celles-ci sont plus contraignantes.

1.1.4.1. Sources fixes

Pour les émissions de NO_x, de SO₂ et de particules des sources fixes, l'IIASA a pris en compte les mesures européennes suivantes :

- La directive GIC (Grandes installations de combustion) : Il fait une lecture stricte de cette directive puisqu'il considère que dès 2008, toutes les centrales thermiques respectent les valeurs limites d'émission de cette directive. Quasiment toutes les centrales thermiques sont donc équipées de techniques de dépollution (modification de la combustion pour les émissions de NO_x, FGD pour celles de SO₂) entre 2000 et 2010.
- La législation IPPC (Integrated pollution prevention and control)⁵ pour les sources d'émission liées aux procédés industriels.

Pour les émissions de SO₂, l'IIASA a également pris en compte les directives sur la teneur en soufre des combustibles liquides.

Pour les émissions de COV des sources fixes, l'IIASA a pris en compte les mesures européennes suivantes : la directive solvants et la directive produits (peintures).

Pour le NH₃, l'IIASA n'a pas pris en compte de législation communautaire. Il a considéré les législations nationales et les pratiques courantes.

1.1.4.2. Sources mobiles

Pour les émissions de NO_x et de particules des sources mobiles, l'IIASA a pris en compte :

- les normes Euro Auto/Oil ;
- les normes d'émission pour les deux-roues ;
- la législation sur les engins mobiles non routiers.

Les émissions des véhicules routiers et des engins mobiles non routiers terrestres diminuent fortement grâce au renouvellement du parc accompagné de normes d'émission de plus en plus contraignantes. Ainsi, en 2020, 97 % des poids lourds et 100 % des véhicules légers diesel et essence respectent les normes les plus sévères (Euro V pour les poids lourds et Euro IV pour les véhicules légers). En 2020, 65 % des engins agricoles et 81 % des engins de chantier respectent

⁵ Directive 96/61/CE du Conseil du 24 septembre 1996 relative à la prévention et à la réduction intégrées de la pollution.

l'équivalent des normes Euro III et IV des poids lourds.

En ce qui concerne les émissions de NOx, l'IIASA a également pris en compte l'échec de l'application d'Euro II et Euro III pour les poids lourds.

Pour les émissions de SO₂, l'IIASA a pris en compte les directives sur la qualité des carburants automobiles.

Pour les COV, l'IIASA a pris en compte les mesures européennes suivantes : la directive Stage I, la directive 91/441 (carbon canisters), les normes Euro Auto/Oil, la directive combustibles (RVP des combustibles).

1.2. LE SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE 2020 (CLE) POUR LA FRANCE⁶

1.2.1. Émissions de NOx

Entre 2000 et 2020, les émissions de NOx baissent au total de 628 kt, soit une baisse de 43 %. Cette baisse est due aux sources fixes pour 69 kt (soit une baisse de 16 %) et aux sources mobiles pour 558 kt (soit une baisse de 55 %). La part des sources fixes dans le total national des émissions de NOx passe de 30 % à 44 %.

Les principaux responsables de la baisse des émissions de NOx entre 2000 et 2020 sont donc les sources mobiles.

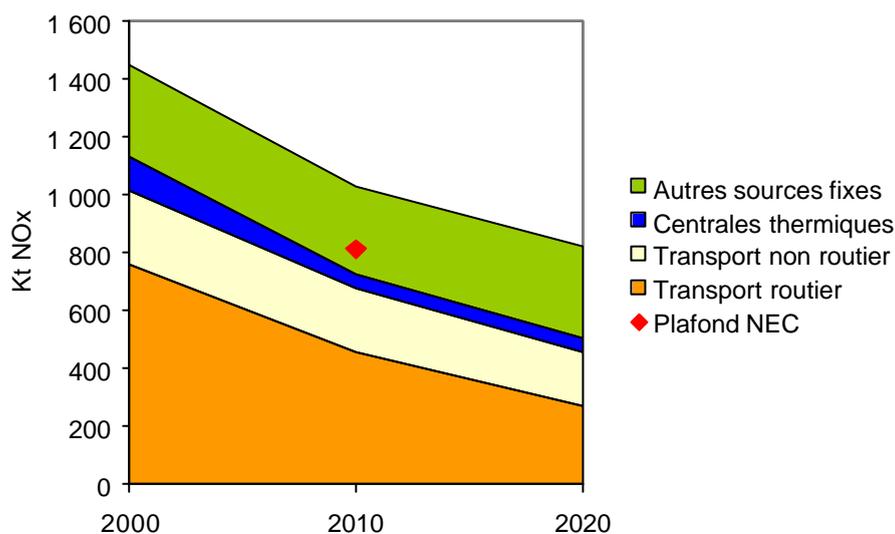


Figure 1. Évolution des émissions françaises de NOx dans le scénario de référence de l'IIASA

1.2.1.1. Sources fixes

Presque l'intégralité de l'effort est supportée par les centrales thermiques (PP). Leurs émissions de NOx baissent de 61 % entre 2000 et 2020, passant de 116 kt à 46 kt, malgré un doublement de l'activité (+101 %). En 2000, elles représentent 27 % des émissions de NOx des sources fixes, contre 13 % en 2020.

Le pourcentage de production dépolluée en 2000 pour les centrales thermiques

⁶ Ce scénario est présenté par l'IIASA dans son « CAFE Scenario Analysis Report Nr. 1 » [Amman et al., 2004a].

est nul. Dès 2005, en fonction du type de centrales entre 40 % et 70 % de la production est équipée de CM ou de SCR. Cette proportion atteint 100 % dès 2010 pour toutes les centrales existantes au fioul et à HC. Parmi les centrales existantes, seules les centrales BC (1 % des émissions de NOx des centrales thermiques en 2000) ne sont dépolluées qu'à 50 % et les centrales GAS à 60 % (7 % des émissions de NOx des centrales thermiques en 2000).

Les évolutions des émissions des autres secteurs varient entre -7 % (combustion dans l'industrie, IN) et +11 % (procédés industriels, PR). L'évolution moyenne des sources fixes hors centrales thermiques est nulle.

Commentaires

Dans le cas de la France les taux de pénétration des techniques de dépollution des centrales thermiques sont trop optimistes, au moins pour le court terme. Ainsi l'IIASA estime que dès 2005, quel que soit le type de centrales thermiques, au moins 40 % sont dépollués, contre 0 % en 2000. Nous sommes aujourd'hui en 2005 et nous sommes toujours pratiquement à 0, même si la situation doit évoluer entre maintenant et 2008. Ils estiment également par exemple que la combustion est modifiée (CM) pour 100 % de la production au fioul à partir de 2010 alors que selon EDF, il est trop coûteux de dépolluer ces centrales.

Il s'agit en fait d'une application stricte de la directive GIC. En effet le respect des VLE de la directive GIC impose la mise en place, dès 2008 sur toutes les centrales de CM, voire de SCR. L'IIASA prévoit donc une mise en place progressive de ces techniques entre 2000 et 2008, sans tenir compte ni des dérogations (fonctionnement moins de 20 000 heures) ni du schéma national de réduction des émissions.

Cependant, à l'horizon 2020, cela ne porte sans doute pas trop à conséquence puisque toutes les centrales charbon non dépolluées (les dérogataires '2008 plus 20 000 heures' au sens de la directive GIC) seront fermées.

1.2.1.2. Sources mobiles

La baisse d'émission la plus importante est celle des véhicules routiers légers à essence (-91 % pour une hausse de l'activité de 5 %). Les émissions des véhicules routiers lourds, des véhicules routiers légers diesel et des véhicules agricoles connaissent des baisses comprises entre 39 % et 57 % alors que l'activité des véhicules routiers lourds augmente de 68 %. La part des émissions des poids lourds routiers dans les émissions totales des sources mobiles reste stable à 34 %. Celle des véhicules routiers légers diesel augmente légèrement, passant de 16 à 22 %. La part des navires passe de 5 à 13 %, celle des autres engins mobiles non routiers de 20 à 27 % et celle des véhicules routiers légers à essence passe de 24 à 5 %.

Ces baisses d'émissions sont essentiellement dues au renouvellement du parc. Ainsi en 2000 les poids lourds respectent au mieux la norme Euro II, alors qu'en 2020 ils respectent la norme Euro V pour 97 % d'entre eux.

1.2.2. Émissions de SO₂

Dans la mesure où les émissions de SO₂ des sources mobiles sont maintenant faibles (elles représentent seulement 7 % des émissions totales nationales), les grosses réductions d'émission de SO₂ sont à attendre de l'industrie (ce qui n'empêche pas le transport de continuer à réduire significativement ses émissions).

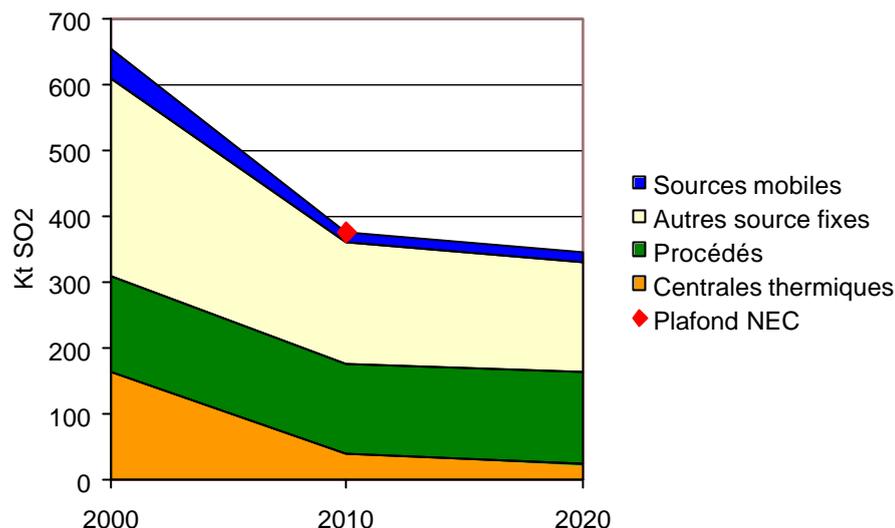


Figure 2. Évolution des émissions françaises de SO₂ dans le scénario de référence de l'IIASA

Entre 2000 et 2020, les émissions des sources fixes baissent de 278 kt (-46 %), passant de 609 kt à 331 kt. Les émissions des sources mobiles baissent fortement en termes relatifs (-70 %) mais cela ne représente qu'une diminution de 32 kt (de 45 kt à 13 kt).

1.2.2.1. Sources fixes

Pour les émissions de SO₂, l'effort de réduction est relativement partagé, même si les émissions des centrales thermiques baissent plus de deux fois plus que celles des autres secteurs. Tous les secteurs voient leurs émissions diminuer. Ces réductions vont de 3 % (procédés industriels, PR) à 86 % (centrales thermiques et chauffage urbain, PP). Pour les trois autres secteurs (combustion domestique, production et transformation de combustibles, combustion dans l'industrie) elles sont comprises entre 38 et 52 %. La moyenne est de 46 %. En 2000, les centrales thermiques représentent 27 % des émissions de SO₂ des sources fixes, contre 7 % en 2020. Entre 2000 et 2020 le niveau d'activité des centrales thermiques (hors centrales au gaz) diminue de 10 % alors que les variations de celui des autres secteurs sont comprises entre -26 % (combustion domestique) et +8 % (procédés industriels).

Le moyen privilégié pour réduire les émissions de SO₂ des centrales thermiques est d'installer de la FGD (désulfuration des gaz de sortie)⁷. En 2000, les centrales à 'hard coal' (HC) et à fioul lourd (HF) sont équipées de FGD à des taux compris entre 0 et 35 %. Dès 2015, cela concerne entre 80 % et 100 % des centrales à Hard Coal et 100 % des centrales au fioul. Les installations nouvelles sont, dès 2000, équipées à 100 % de FGD.

Commentaires

Les taux de pénétration de la FGD pour les centrales thermiques sont sans doute trop optimistes.

⁷ Sauf pour les centrales existantes brûlant du BC1, charbon brun de qualité supérieure, qui sont équipées dès 2000 d'injection de calcaire à 100 %.

1.2.2.2. Sources mobiles

Pour les sources mobiles, on observe une claire dichotomie entre les transports terrestres (routiers et non routiers) d'une part, les avions et les bateaux d'autre part. Les émissions du transport routier baissent de 96 % et celles des engins mobiles terrestres non routiers de 99 % alors que celles des avions (LTO⁸) augmentent de 9 % et celles des bateaux de 16 %. En 2020, les émissions des navires représentent 85 % des émissions de SO₂ du transport (soit 3,4 % des émissions totales nationales⁹), à 11 kt, contre 22 % en 2000.

Pour les transports terrestres, les combustibles utilisés sont de moins en moins soufrés. Pour les navires et les avions, aucune technique de réduction n'est mise en place.

Commentaires

Ce scénario ne prend en compte que les mesures déjà décidées. Rien n'est effectivement fermement décidé pour l'instant pour les navires ou les avions. Cependant la situation pourrait évoluer prochainement.

1.2.3. Émissions de particules

Entre 2000 et 2020, les émissions de PM_{2,5} baissent au total de 125 kt, soit 43 %. Cette baisse est due aux sources fixes pour 71 kt (soit une baisse de 34 %) et aux sources mobiles pour 53 kt (soit une baisse de 65 %).

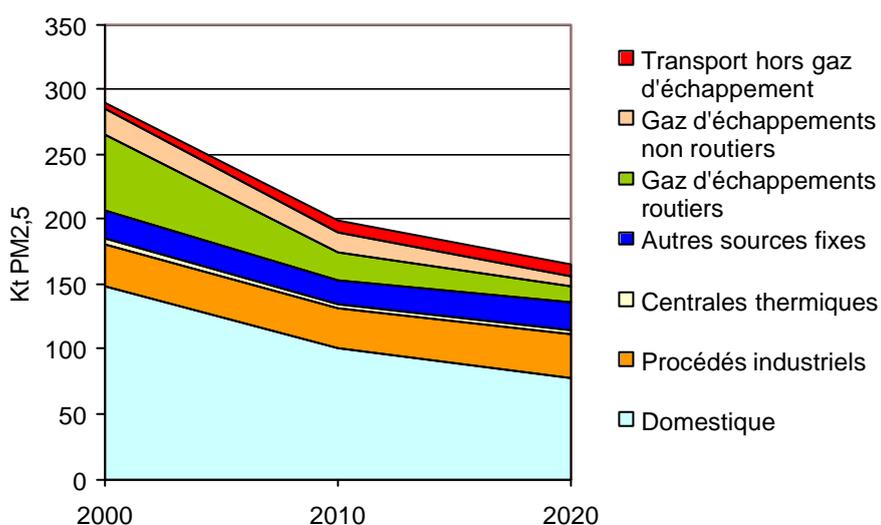


Figure 3. Évolution des émissions françaises de PM_{2,5} dans le scénario de référence de l'IIASA

1.2.3.1. Sources fixes

L'effort est principalement supporté par la combustion domestique. Entre 2000 et 2020, l'activité de ce secteur augmente de 1 % et ses émissions de PM_{2,5} diminuent de 47 %. La part de ce secteur dans les émissions totales de PM_{2,5} des

⁸ 'Landing-take off cycle', c'est-à-dire uniquement les phases de décollage et d'atterrissage.

⁹ Les émissions françaises de SO₂ en provenance du transport maritime sont relativement faibles car l'essentiel des émissions maritimes est attribué par RAINS non à des pays en particulier mais à des zones maritimes. En 2020, les émissions de SO₂ en provenance de ces cinq zones maritimes (Méditerranée, Atlantique, Baltique, Mer noire, Mer du Nord) s'élèveraient ainsi à 1 444 kt.

sources fixes passe de 72 % à 58 %. Les émissions de la combustion domestique passent de 149 à 78 kt de PM_{2,5} entre 2000 et 2020, soit une baisse de 71 kt. L'essentiel de cette baisse (55 kt) est permis par le renouvellement du parc des foyers domestiques et leur remplacement par de nouveaux modèles moins émetteurs. Le taux de foyers domestiques faiblement émetteurs passe de 11 % en 2000 à 35 % en 2005, 60 % en 2010 puis reste stable. Les émissions des foyers domestiques passent ainsi de 107 kt à 48 kt.

Commentaires

Le secteur de la combustion domestique est mal connu. En l'absence de données, l'IIASA a dû faire des hypothèses. Ainsi RAINS distingue six types de foyers domestiques mais les taux de pénétration des différentes techniques de réduction (stage 1 et stage 2) sont rigoureusement les mêmes pour ces six types.

1.2.3.2. Sources mobiles

On distingue trois cas de figures principaux dans les sources mobiles de particules :

- Les émissions dues aux gaz d'échappement des véhicules routiers.
Elles baissent de 78 % entre 2000 et 2020, passant de 58 kt à 13 kt. En 2000 elles représentent 70 % des émissions de particules des sources mobiles, contre 43 % en 2020. Ces diminutions sont dues au renouvellement du parc accompagné de normes d'émissions plus contraignantes. En 2020, 97 % des poids lourds respectent la norme Euro V et 100 % des véhicules légers diesel et essence respectent la norme Euro IV.
- Les émissions dues aux gaz d'échappement des véhicules non routiers.
Elles baissent de 58 % entre 2000 et 2020, passant de 19 kt à 8 kt. Leur part dans les émissions de particules des sources mobiles passe de 23 à 28 %. Les émissions des navires augmentent autant que l'activité (environ +20 %) mais celles des engins agricoles et des engins de chantier diminuent grâce au renouvellement du parc accompagné de normes d'émissions plus contraignantes. En 2020, seuls 20 % des engins agricoles ne sont pas dépollués et 65 % respectent l'équivalent des normes Euro III et IV des poids lourds. En 2020, seuls 11 % des engins de chantier ne sont pas dépollués et 81 % respectent l'équivalent des normes Euro III et IV des poids lourds.
- Les émissions dues aux autres émissions que les gaz d'échappement.
Il s'agit des émissions de particules dues aux revêtements des freins, à l'abrasion des routes et aux revêtements des pneus. Elles augmentent de 55 % entre 2000 et 2020, passant de 5 kt à 8 kt. En 2000 elles représentent 7 % des émissions de particules des sources mobiles, contre 29 % en 2020.¹⁰ Ce type de sources est encore mal connu et aucune technique de réduction des émissions n'est mise en place. La hausse des émissions reflète simplement la hausse de l'activité.

Commentaires

Les inventaires des parcs de véhicules non routiers sont très approximatifs. Les émissions des particules des engins non routiers sont relativement mal connues et sont en train d'être réglementées ; celles non dues aux gaz d'échappement (usure des pneus, des

¹⁰ Cette tendance est encore plus importante pour les PM₁₀ : pour celles-ci les émissions dues aux autres émissions que les gaz d'échappement deviennent en 2020 plus importantes que celles dues aux gaz d'échappement routiers.

freins, de la route) sont très mal connues et pas du tout réglementées. Or en 2020, elles représenteront plus des 3/4 des émissions de particules des sources mobiles.

1.2.4. Émissions de COV

Les émissions nationales de COV baissent de 40 % entre 2000 et 2020, passant de 1 541 à 923 kt.

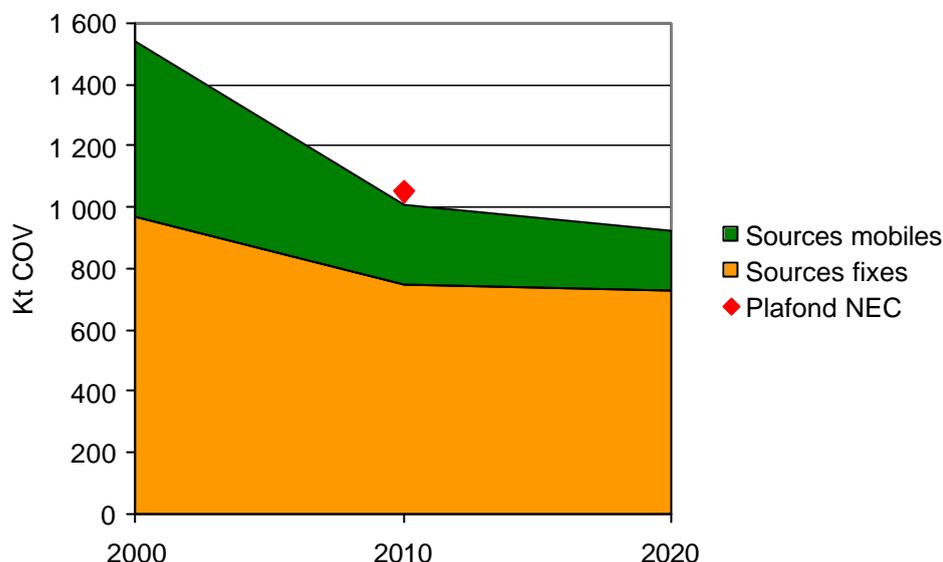


Figure 4. Évolution des émissions françaises de COV dans le scénario de référence de l'IASA

1.2.4.1. Sources fixes

Les techniques de réduction des émissions de COV sont très diverses. On peut noter notamment que le secteur de l'imprimerie réduit ses émissions de 51 kt, passant de 136 à 84 kt (-38 % malgré une augmentation de l'activité de 61 %), grâce à l'utilisation de produits à faible teneur en COV, à la capture et à l'incinération des vapeurs. Les émissions dues à l'utilisation de peinture sont réduites de 42 kt, passant de 113 à 72 kt (-37 % malgré une augmentation de l'activité de 7 %), grâce à des changements dans la formulation et l'utilisation des peintures pour respecter la directive produit sur les peintures. Les émissions dues aux activités de dégraissage sont réduites de 25 kt, passant de 27 à 2 kt (-93 % malgré une augmentation de l'activité de 21 %), grâce à l'utilisation de peintures à l'eau.

1.2.4.2. Sources mobiles

Les émissions de COV des sources mobiles baissent de 66 % entre 2000 et 2020, passant de 574 à 194 kt. Encore une fois, c'est essentiellement dû au renouvellement du parc accompagné de normes d'émissions plus contraignantes. Leur part dans les émissions totales nationales passe de 37 % à 21 %.

1.2.5. Émissions de NH₃

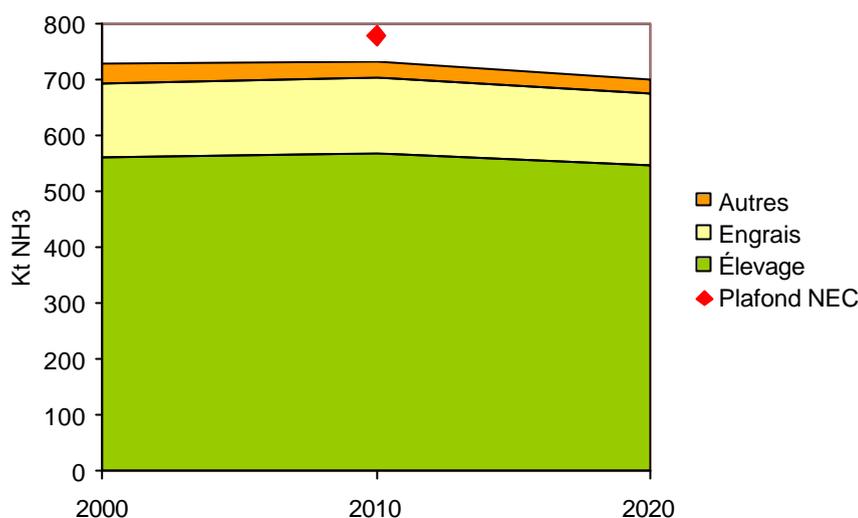


Figure 5. Évolution des émissions françaises de NH₃ dans le scénario de référence de l'IIASA

Les émissions de NH₃ sont presque stables entre 2000 et 2020 (-4 %), passant de 728 à 702 kt. Seules les émissions du transport diminuent significativement (-69 %) mais elles représentent à peine 1 % des émissions nationales.

L'élevage est responsable de 77 % des émissions en 2000 (78 % en 2020). Ses émissions baissent très légèrement (-2 %) malgré une augmentation de l'activité (+13 %). Cette diminution est rendue possible par la couverture des stockages extérieurs de fumier, pratique dont l'usage est multiplié environ par deux pour atteindre des taux de pénétration compris entre 15 % pour les bovins à 35 % pour les porcins.

La production et l'utilisation d'engrais est la deuxième source de NH₃. Sa part dans les émissions nationales est stable, à 18 %. Aucun n'effort de réduction n'est effectué.

1.3. LE SCÉNARIO MTFR¹¹

1.3.1. Hypothèses

Dans le scénario MTFR (Maximum Technically Feasible Reduction), en 2020, pour tous les secteurs d'activité des techniques de dépollution sont mises en place. Les techniques considérées sont celles qui sont connues actuellement et qui sont, bien évidemment, intégrées dans la base de données RAINS.

Ce ne sont pas systématiquement les techniques faisant preuve des taux de dépollution les plus élevés qui sont mises en place : Dans l'industrie, dans certains cas, des techniques de dépollution moins performantes sont conservées, notamment dans les cas où elles étaient déjà en place. Ainsi, en ce qui concerne les émissions de SO₂, certaines installations de combustion sont dépolluées au moyen d'injection de chaux (LINJ) même si le taux de dépollution de cette

¹¹ Ce scénario est présenté par l'IIASA dans son « CAFE Scenario Analysis Report Nr. 2 » [Amman et al., 2004b].

technique est moins élevée que celle de la désulfuration des gaz de sortie (WFGD) : 60 % contre 95 %.

Pour le transport routier, le taux d'application des normes Euro dépend du renouvellement du parc.

1.3.2. Émissions de NOx

Dans le scénario MTFR, les émissions françaises de NOx en 2020 sont 69 % plus basses qu'en 2000 et 45 % plus basses que dans le scénario CLE.

Le secteur dont les émissions baissent le plus est le transport routier (78 % de baisse entre 2000 et 2020 avec MTFR).

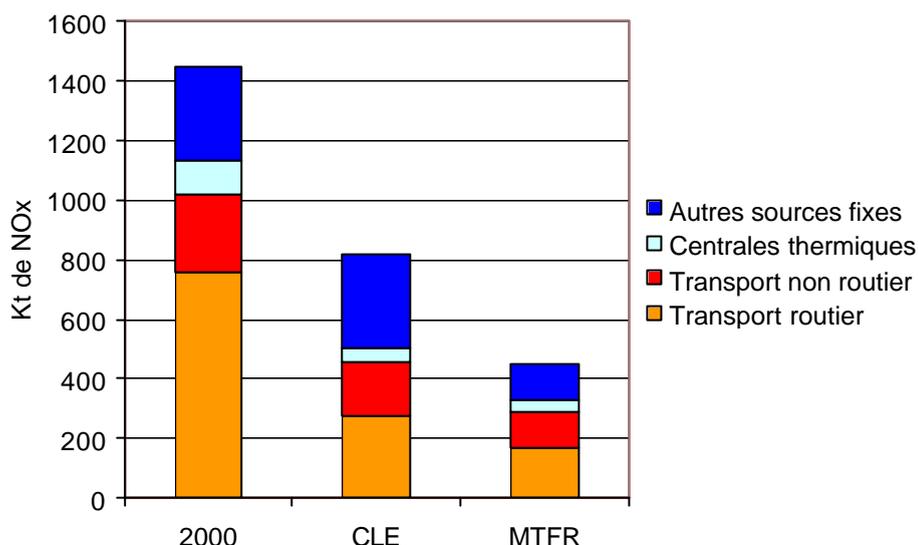


Figure 6. Émissions françaises de NOx en 2000 et en 2020, selon deux scénarios de l'IIASA (CLE et MTFR), en kilotonnes

1.3.3. Émissions de SO₂

En ce qui concerne les émissions de SO₂, dans le scénario MTFR en 2020, elles sont 77 % plus basses qu'en 2000 et 57 % plus basses que dans le scénario CLE.

D'après les hypothèses de l'IIASA, les centrales thermiques devraient déjà avoir mis en place la plus grande partie des techniques de dépollution envisageables dans le scénario CLE. Le scénario MTFR ne permet donc quasiment pas d'aller plus loin que le scénario CLE (par rapport aux émissions de l'année 2000, la réduction en 2020 est de 86 % dans le scénario CLE et de 87 % dans le scénario MTFR).

En revanche, les émissions des autres sources fixes diminuent significativement. Ainsi les émissions liées aux procédés industriels ne diminuent que de 3 % entre la situation en 2000 et celle en 2020 dans le scénario CLE et diminuent de 69 % entre les scénarios CLE et MTFR.

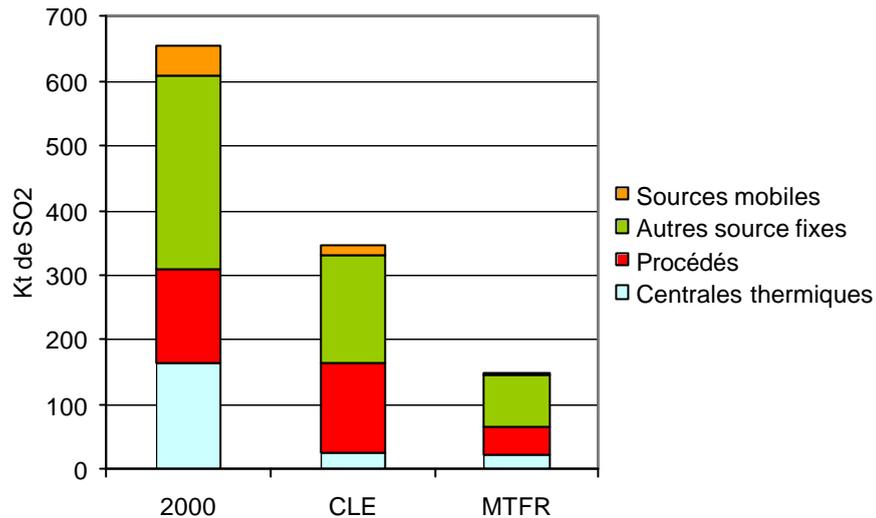


Figure 7. Émissions françaises de SO₂ en 2000 et en 2020, selon deux scénarios de l'IIASA (CLE et MTFR), en kilotonnes

1.3.4. Émissions de PM_{2,5}

En ce qui concerne les émissions de PM_{2,5}, dans le scénario MTFR en 2020, elles sont 71 % plus basses qu'en 2000 et 49 % plus basses que dans le scénario CLE.

Entre les scénarios CLE et MTFR, les émissions de la plupart des secteurs diminuent significativement (entre -23 et -73 %), sauf celles dues au transport hors gaz d'échappement (abrasion des pneus, des freins, des routes...). Entre 2000 et 2020 ces dernières augmentent, à peu près de la même façon dans le scénario CLE (+55 % entre 2000 et 2020) que dans le scénario MTFR (+48 % entre 2000 et 2020). En 2020 dans le scénario MTFR elles représenteraient 44 % des émissions de PM_{2,5} des transports et 10 % des émissions totales. Cette situation est due au fait qu'actuellement, par manque de connaissance, aucune solution technique n'est intégrée dans RAINS pour diminuer ce type d'émission.

Les émissions domestiques diminuent de 58 % en 2020 entre le scénario CLE et le scénario MTFR, pour représenter dans ce dernier scénario 39 % des émissions totales de PM_{2,5}. Les émissions des procédés industriels diminuent de 48 % en 2020 entre le scénario CLE et le scénario MTFR, pour représenter dans ce dernier scénario 20 % des émissions totales de PM_{2,5}.

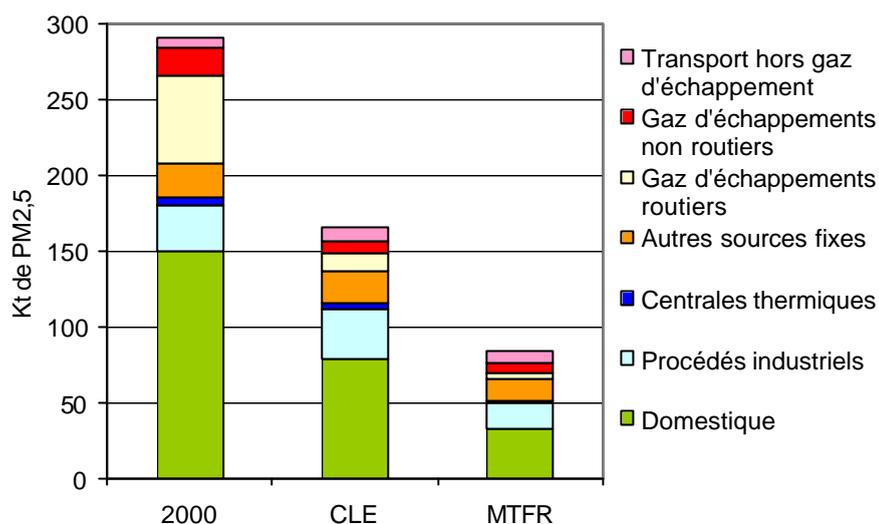


Figure 8. Émissions françaises de PM_{2,5} en 2000 et en 2020, selon deux scénarios de l'IIASA (CLE et MTRF), en kilotonnes

1.3.5. Émissions de COV

En ce qui concerne les émissions de COV, dans le scénario MTRF en 2020, elles sont 57 % plus basses qu'en 2000 et 28 % plus basses que dans le scénario CLE. En 2020, entre les scénarios CLE et MTRF les diminutions sont similaires pour les sources fixes (-29 %) et pour les sources mobiles (-25 %).

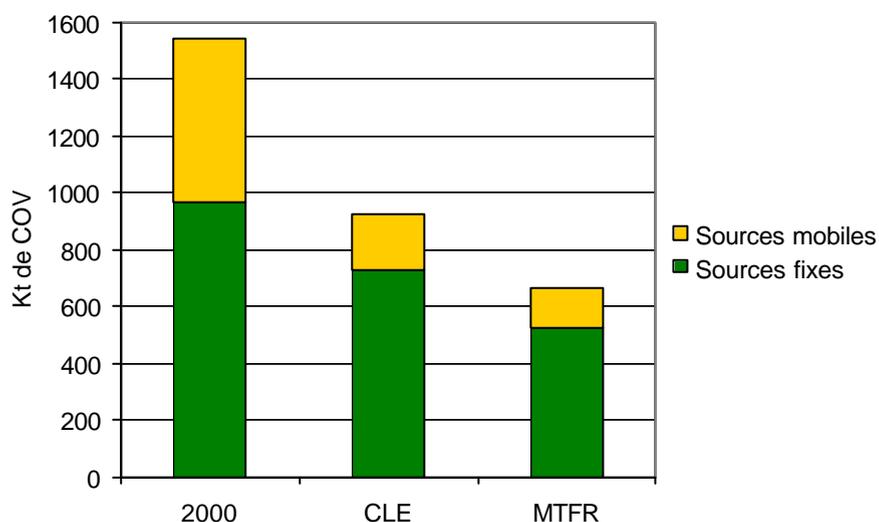


Figure 9. Émissions françaises de COV en 2000 et en 2020, selon deux scénarios de l'IIASA (CLE et MTRF), en kilotonnes

1.3.6. Émissions de NH₃

En ce qui concerne les émissions de NH₃, elles sont quasiment stables entre 2000 et 2020 dans le scénario CLE (-4 %). Le modèle RAINS intègre toutefois un certain nombre de mesures techniques pour les réduire. Si celles-ci étaient mises en œuvre, cela permettrait de réduire significativement les émissions de NH₃ en 2020 (baisse de 42 % entre les scénarios CLE et MTRF).

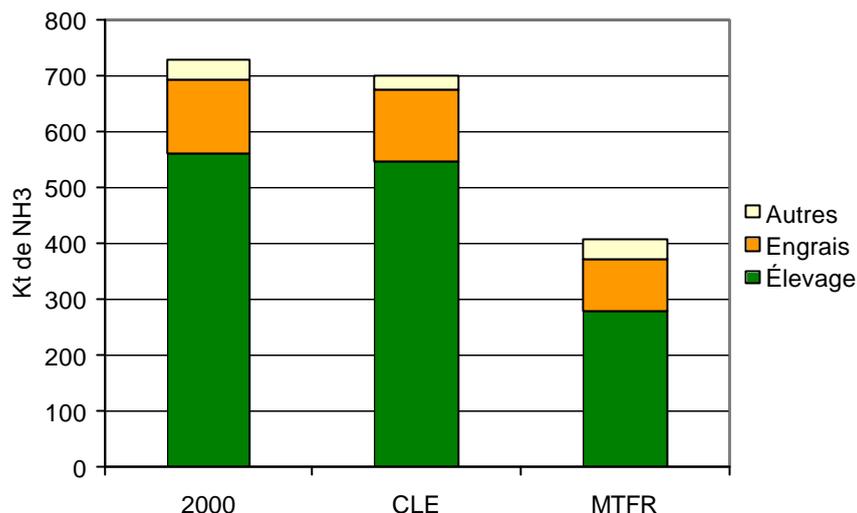


Figure 10. Émissions françaises de NH₃ en 2000 et en 2020, selon deux scénarios de l'IIASA (CLE et MTRF), en kilotonnes

1.4. ÉMISSIONS FRANÇAISES EN 2010 ET PLAFONDS DE LA DIRECTIVE NEC

Dans le scénario de référence CLE, les émissions totales de la France en 2010 s'élèvent à 1 027 kt pour les NO_x (contre 988 kt dans le scénario Optinec du CITEPA), 375 kt pour le SO₂ (contre 461 kt dans le scénario Optinec du CITEPA), 1 009 kt pour les COV (contre 954 kt dans le scénario Optinec du CITEPA) et 733 kt pour le NH₃ (contre 857 kt dans le scénario Optinec du CITEPA).

Le plafond de la directive NEC est fixé à 810 kt en 2010 pour les NO_x ; il n'est donc pas respecté (+30 %). En revanche, les plafonds de la directive NEC pour le SO₂, fixé à 375 kt, pour les COV, fixé à 1 050 kt, pour le NH₃, fixé à 780 kt, sont respectés.

Remarque sur les émissions de NO_x

Il peut sembler étrange que les émissions de NO_x soient plus élevées d'après l'IIASA que d'après le CITEPA alors que l'IIASA prend des hypothèses de dépollution des centrales thermiques beaucoup plus ambitieuses que celles adoptées par le CITEPA.

En fait, les émissions des centrales thermiques calculées par l'IIASA sont effectivement beaucoup plus faibles que celles calculées par le CITEPA mais cet écart est compensé par des chiffres d'émission plus élevés dans les calculs de l'IIASA pour plusieurs autres secteurs d'activité (transports et procédés industriels notamment) : Ainsi l'IIASA estime que les émissions des centrales thermiques s'élèveront à 45 kt en 2010, alors que dans le scénario Optinec du CITEPA, elles s'élèvent à 83 kt, ce qui est logique étant donné les différences d'hypothèses en ce qui concerne la dépollution des centrales thermiques. En revanche, le CITEPA prévoit des émissions beaucoup plus faibles que l'IIASA pour le transport routier (390 kt contre 455 kt) et pour les procédés industriels (10 kt contre 88 kt).

Ces différences entre les inventaires du CITEPA et ceux de l'IIASA ont de multiples causes. Elles semblent provenir principalement de variations dans les façons de calculer les émissions (facteurs d'émission) et, dans une moindre mesure, de différences dans les scénarios d'activité. Cela dépend toutefois des secteurs d'activité. Ainsi pour les secteurs du transport, routier et non routier, ou de la combustion domestique, par exemple, les émissions calculées par l'IIASA sont proches lorsqu'il prend en compte les prévisions d'activité issues des

données officielles françaises (scénario appelé NAT_CLE) ou ses propres prévisions d'activité (scénario appelé CP_CLE). Les différences importantes dans les émissions calculées par le CITEPA et par l'IIASA proviennent donc davantage des méthodes de calcul des émissions. En revanche pour la combustion dans l'industrie, par exemple, les différences dans les inventaires d'émission semblent provenir davantage de variations dans les scénarios d'activité.

2. LES SCÉNARIOS OPTIMISÉS CALCULÉS PAR LE MODÈLE RAINS¹²

Après avoir présenté le scénario de référence pour 2020, CLE ou 'Baseline 2020', dans le 'CAFE Scenario Analysis Report' n° 1, puis le scénario MTFR (Maximum technically feasible reduction), dans le 'CAFE Scenario Analysis Report' n° 2, l'IIASA a calculé des stratégies optimisées de réduction des émissions pour préparer la définition de la stratégie thématique CAFE ('CAFE Scenario Analysis Reports' n° 2, 4, 5 et 6).

Nous expliquons maintenant comment ont été définies les contraintes environnementales qui ont conduit aux calculs de ces scénarios et présentons succinctement les résultats obtenus pour certains d'entre eux.

2.1. GÉNÉRALITÉS

L'optimisation effectuée par l'IIASA ne porte que sur les sources fixes. Les techniques de réduction pour les sources mobiles (Euro V et VI pour les engins routiers, mesures pour les navires) sont étudiées séparément.

Tous les calculs d'optimisation de RAINS s'appuient sur un certain nombre d'hypothèses communes. Ils sont notamment encadrés par deux scénarios prospectifs pour l'année 2020 :

- le scénario de référence (CLE, ou Current legislation) ; il prend en compte toutes les mesures législatives déjà décidées ;
- le scénario MTFR (Maximum technical feasible reduction) ; il prend en compte toutes les mesures techniques possibles.

Les effets causés par les particules ont fait l'objet de nombreux calculs d'optimisation et l'IIASA a étudié plusieurs façons de définir les objectifs environnementaux les concernant. En revanche, pour les autres effets considérés, il n'y a pas eu de discussion sur la façon de fixer les objectifs et la méthode du 'gap closure', déjà utilisée en 1998-1999, a été employée, avec toutefois de légères modifications¹³

2.2. RAPPEL SUR LE CONCEPT DE 'GAP CLOSURE'

Les contraintes environnementales servant d'objectifs pour le module d'optimisation sont souvent définies en utilisant le concept de 'gap closure'. Le 'gap closure', malgré son nom barbare, est un concept simple : il s'agit d'une réduction relative, exprimée en pourcentage, d'un indicateur d'effet ou d'exposition.

L'objectif final du 'gap closure' est la suppression ('closure') de l'écart (le 'gap') entre une situation de référence et une valeur cible. Cette suppression n'étant pas possible entièrement aux horizons qui nous préoccupent, il s'agit en fait de réduire cet écart d'un certain pourcentage.

Pour les calculs de la directive NEC en 1998-1999, on visait une réduction relative entre la situation pendant l'année de référence (1990 pour les négociations du

¹² Ces scénarios sont présentés par l'IIASA dans ses « CAFE Scenario Analysis Report » n° 3, 4, 5 et 6 [Amman et al., 2005a, b, c et d].

¹³ En effet le 'gap' considéré n'est plus le même, comme nous l'expliquons plus loin.

Protocole de Göteborg et de la directive NEC) et l'objectif de long terme, qui correspondait au seuil de non-effet.

Cette méthode ne semble plus possible actuellement car elle conduit soit à imposer des efforts de réduction des émissions qui vont au-delà du scénario MTFR pour certains pays, soit à n'imposer quasiment aucun effort de réduction à la majorité des pays.

L'IIASA propose maintenant de viser une réduction relative entre la situation de référence en 2020 (Baseline 2020) et la situation que l'on obtiendrait si tous les pays mettaient en œuvre toutes les techniques possibles (situation MTFR). Il s'agit donc toujours d'un 'gap closure' mais le 'gap' considéré n'est pas le même qu'avant. Il s'agit là d'un changement majeur : le niveau d'ambition ne dépend plus de l'objectif environnemental de long terme mais des possibilités technico-économiques de réduction des émissions.

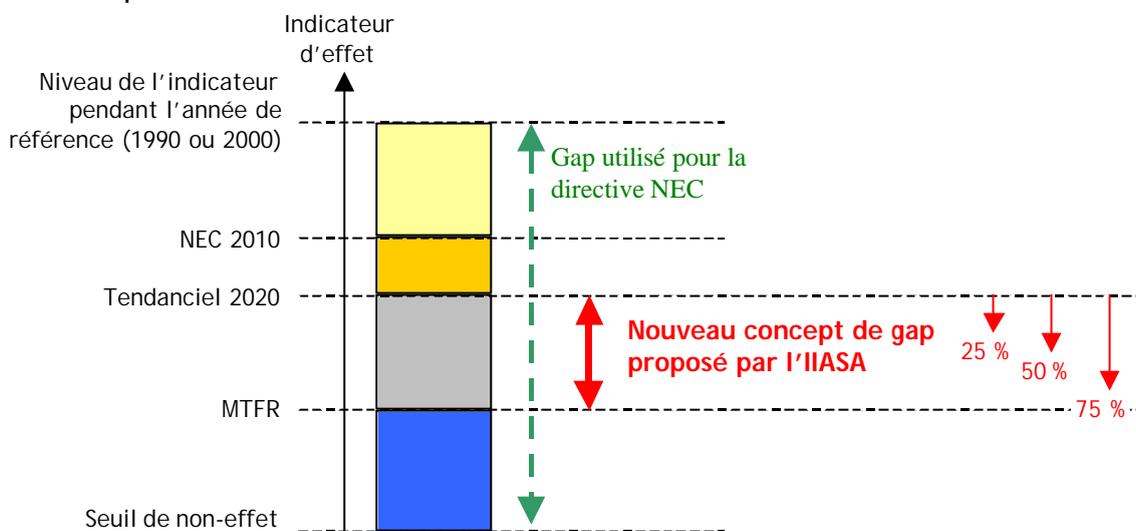


Figure 11. Le concept de gap utilisé pour la directive NEC et le concept de gap proposé maintenant par l'IIASA

2.3. LES CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES POUR LES PARTICULES

En ce qui concerne les particules, l'indicateur utilisé pour l'optimisation est la concentration en $PM_{2,5}$, moyennée par pays (exprimée en $\mu g/m^3$). Dans les calculs de l'IIASA, c'est équivalent à la diminution de l'espérance de vie statistique due à l'exposition aux $PM_{2,5}$ (exprimée en mois).

L'IIASA intègre les résultats de City-Delta : les concentrations en particules dans les zones urbaines sont définies comme la somme de la concentration calculée par un modèle régional à grande échelle (résolution de 50 km par 50 km) et d'un incrément urbain, calculé à partir des résultats de City-Delta, exercice mené sur un échantillon de villes.

L'IIASA a étudié trois façons de fixer les objectifs de l'optimisation pour les particules :

- 'uniform limit value' : une concentration en $PM_{2,5}$ qui doit être respectée dans toutes les zones urbaines ;
- 'gap closure' : une réduction relative de la concentration en $PM_{2,5}$;

- une réduction globale des effets sur l'ensemble de l'Europe des 25.

2.3.1. Première méthode : Valeurs limites de concentration ('uniform cap')

L'IIASA fixe comme objectif un plafond uniforme ('uniform cap') pour la concentration en $PM_{2,5}$ dans les villes. L'IIASA a étudié des plafonds compris entre $14,5 \mu g/m^3$ et $19 \mu g/m^3$.

Ce type d'objectif sera très difficile à atteindre dans certaines villes alors qu'il n'apportera que très peu d'amélioration en termes de concentration dans la grande majorité des autres villes. L'IIASA a également étudié des scénarios dans lesquels étaient exclues de l'optimisation les villes pour lesquelles les objectifs les plus contraignants n'étaient pas possibles à atteindre (Thessalonique et Gênes).

Une telle méthode est très sensible aux 'points chauds' de concentration : Le fait d'exclure ne serait-ce qu'une ville ou deux modifie beaucoup les stratégies optimisées de réduction des émissions et notamment la répartition des efforts de réduction entre les pays.

2.3.2. Réduction relative ('gap closure')

Une autre façon de faire est d'exprimer les objectifs de réduction des émissions en termes relatifs, c'est-à-dire de viser une baisse des effets, exprimée en pourcentage. On peut par exemple décider qu'il faut baisser en 2020, dans chaque pays, de 50 % l'écart de concentration en $PM_{2,5}$ entre la situation de référence et le scénario MTRF. L'IIASA a étudié des 'gap closures' compris entre 25 % et 90 %.

L'IIASA a également défini des scénarios dans lesquels était introduit un objectif plancher ('cut-off') pour la concentration en particules ; il estime ainsi qu'il n'est pas nécessaire de chercher à descendre en dessous de ce plancher, fixé à $7 \mu g/m^3$. Cela relâche la contrainte pour les pays où la concentration en particules est déjà relativement faible (Europe du Nord).

2.3.3. Minimiser le nombre total d'années de vie perdues (pour un budget donné) pour l'ensemble de l'Europe

L'IIASA a développé une nouvelle façon de définir les objectifs environnementaux : il s'agit de minimiser, pour l'ensemble de l'Europe, le nombre d'années de vie perdues (Years Of Lost Life, ou YOLL) à cause de l'exposition aux $PM_{2,5}$.

L'indicateur utilisé pour l'optimisation n'est plus la concentration en $PM_{2,5}$ par pays ou dans les zones urbaines mais le nombre total d'années de vie perdues dans l'ensemble de l'Union européenne.

Dans la situation de référence en 2020, l'IIASA estime à 137 millions le nombre total d'années de vie perdues dans l'Union européenne à cause de l'exposition aux $PM_{2,5}$. L'IIASA a étudié comme objectifs d'optimisation des bénéfiques compris entre 27 et 36 millions d'années de vie (passage du nombre total d'années de vie perdues de 137 millions à 110, 104 ou 101 millions).

2.3.4. Comparaison des trois approches

L'IIASA a comparé les trois approches exposées ci-dessus en fonction de différents critères : le rapport coût/efficacité des stratégies calculées, la robustesse de l'optimisation et l'équité des stratégies.

2.3.4.1. Coût / efficacité

En termes de coût / efficacité, la meilleure façon de fixer les objectifs est la minimisation globale pour l'ensemble de l'Europe du nombre d'années de vie perdues. Ensuite vient la méthode de réduction relative ('gap closure') puis celle de la valeur limite de concentration en zone urbaine.

En effet, plus l'objectif est global, moins le module d'optimisation a de contraintes et plus il est en mesure de trouver une solution à faible coût ; au contraire, plus le module est contraint (contrainte exprimée par cellule ou par zone urbaine par exemple), plus le coût global des solutions optimisées est élevé.

2.3.4.2. Robustesse de l'optimisation et des stratégies

En termes de robustesse des stratégies, la méthode la plus robuste pour fixer les objectifs est celle de la minimisation globale, grâce à sa grande simplicité.

2.3.4.3. Équité

L'IIASA introduit une nouveauté intéressante : il définit quatre types d'équité¹⁴ et a essayé de quantifier, pour chacun de ces types, quelle est la façon de fixer les objectifs la plus équitable. Il parvient à une conclusion primordiale (et que l'INERIS soutient, avec des arguments un peu différents, depuis longtemps) : non seulement l'optimisation globale est plus robuste (en termes de robustesse du processus d'optimisation), plus efficace (elle permet d'obtenir des gains sanitaires plus importants à coût égal), ce que l'on savait déjà, mais en plus elle n'est pas moins équitable que les autres façons de fixer les objectifs ! En effet, pour les quatre types d'équité étudiés, cette méthode pour fixer les objectifs est toujours parmi les plus performantes et dans un des quatre cas, c'est la plus performante du lot. Au contraire la fixation de concentrations limites est beaucoup moins robuste (elle est très sensible à quelques points chauds, comme on peut le voir avec les exemples des villes de Thessalonique et de Gênes), moins efficace et en plus elle est systématiquement moins équitable que l'optimisation globale.

Jusqu'à maintenant, les objectifs de l'optimisation étaient fixés localement (par cellule) car certains pensaient que c'était plus équitable que d'optimiser globalement. Or ces calculs récents de l'IIASA montrent que ce n'est pas le cas.

Commentaire

La fixation de contraintes environnementales par cellule était un des principaux points critiquables que nous avons soulevé dans nos rapports précédents sur RAINS [Soleille et al., 2003 ; Soleille, 2004]. Nous avons en effet montré que fixer les objectifs localement complexifie le processus d'optimisation, le rendant moins robuste et que cela ne permet sans doute pas d'obtenir des stratégies plus équitables.

2.4. LES CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES POUR LES AUTRES EFFETS

Trois autres effets sont considérés : les effets de l'ozone sur la santé, l'acidification et l'eutrophisation.

Une étude détaillée de plusieurs scénarios, avec différentes façons de définir les contraintes environnementales, n'a été conduite que pour les particules. Pour les

¹⁴ Ces quatre types d'équité sont les suivants : 1) coûts par habitant ; 2) coûts par unité de PIB (en prenant en compte les parités de pouvoir d'achat) ; 3) gains relatifs en espérance de vie par rapport au scénario de référence 2020 et 4) coûts par année de vie gagnée.

autres effets, la méthode pour fixer les objectifs est similaire à celle du 'gap closure' utilisée au moment de la définition du Protocole de Göteborg et de la directive Plafonds nationaux d'émission.

2.4.1. Ozone

RAINS calcule le nombre de morts prématurées qui peuvent être attribuées à l'exposition à l'ozone, pour chaque cellule de la grille, puis les additionne par pays. L'indicateur utilisé pour quantifier cet impact est le SOMO35 ('Sum Of Means Over 35'). Cet indicateur remplace maintenant l'AOT60 pour quantifier l'impact de l'ozone sur la santé humaine.

Le SOMO35 est égal à la somme des excès au-delà du seuil de 35 ppb des maxima journaliers des moyennes calculées sur 8 heures pour tous les jours de l'année : En d'autres termes, on considère les moyennes sur 8 heures en concentration d'ozone ; pour chaque jour on prend le maximum de ces moyennes sur 8 heures ; on considère les excès de ces moyennes au-delà du seuil de 35 ppb ; enfin on somme tous ces excès sur l'ensemble de l'année pour obtenir le SOMO35.

Le modèle RAINS considère que le SOMO35 calculé cellule par cellule et pondéré par la population est proportionnel au nombre de morts prématurées attribuables à l'ozone.

La contrainte environnementale est définie comme un 'gap closure' sur le SOMO35 pondéré par la population pour chaque cellule de la grille, ce qui est équivalent à un 'gap closure' sur le nombre de morts prématurées attribuables à l'ozone.

Les effets de l'ozone sur la végétation et sur les écosystèmes ne sont pas explicitement considérés. Mais l'indicateur utilisé pour quantifier l'effet de l'ozone sur les forêts, l'AOT40 est similaire, dans son concept, au SOMO35. Définir une contrainte d'optimisation pour l'AOT40 donnerait donc des résultats similaires aux contraintes d'optimisation pour le SOMO35.

2.4.2. Eutrophisation

L'indicateur considéré est, pour chaque pays, le total des dépôts azotés en excès des charges critiques pour l'eutrophisation, cumulés pour tous les types d'écosystème (forêts, semi-naturels, eaux) et pour la surface d'écosystème du pays.

Le 'gap closure' considéré comme contrainte d'optimisation est une réduction relative de cet excès cumulé entre le scénario CLE et le scénario MTRF.

2.4.3. Acidification

L'indicateur considéré est, pour chaque pays, le total des dépôts acides en excès des charges critiques pour l'acidification, cumulés pour tous les types d'écosystème (forêts, semi-naturels, eaux) et pour la surface d'écosystème du pays.

Le 'gap closure' considéré comme contrainte d'optimisation est une réduction relative de cet excès cumulé entre le scénario CLE et le scénario MTRF.

2.5. LES SCÉNARIOS FINAUX (SCÉNARIOS D23)¹⁵

2.5.1. Niveaux d'ambition

L'IIASA a étudié des scénarios optimisés visant en même temps plusieurs effets environnementaux à partir de son 5^e rapport pour CAFE [Amman et al., 2005c].

Enfin, dans son 6^e rapport pour CAFE [Amman et al., 2005d], l'IIASA a présenté un ensemble final de scénarios (initialement appelé D23). Le tableau suivant en donne les caractéristiques.

Tableau 1. Récapitulatif des scénarios D23

Effet	Méthode d'optimisation	CLE	Niveau d'ambition ¹⁶			MTFR
			Faible (A)	Moyen (B)	Elevé (C)	
Particules	Années de vie perdues à l'échelle européenne (en millions)	137	110	104	101	96
Acidification	Gap closure des dépôts en excès cumulés, par pays	0 %	55 %	75 %	85 %	100 %
Eutrophisation	Gap closure des dépôts en excès cumulés, par pays	0 %	55 %	75 %	85 %	100 %
Ozone	Gap closure sur le SOMO35	0 %	60 %	80 %	90 %	100 %

2.5.2. Réduction des émissions

Les deux figures suivantes montrent les niveaux d'émission, pour les cinq polluants considérés, dans les différents scénarios étudiés, non optimisés (CLE 2020 et MTFR) ou optimisés (scénarios D23), pour l'Europe des 25 d'abord, pour la France ensuite.

¹⁵ Ces scénarios sont présentés par l'IIASA dans son «CAFE Scenario Analysis Report Nr. 6» [Amman et al., 2005d].

¹⁶ Les trois niveaux d'ambition étaient initialement appelés 'low', 'medium' et 'high'. Il semble que cela ait pu prêter à confusion et ils ont été rebaptisés 'A', 'B' et 'C'.

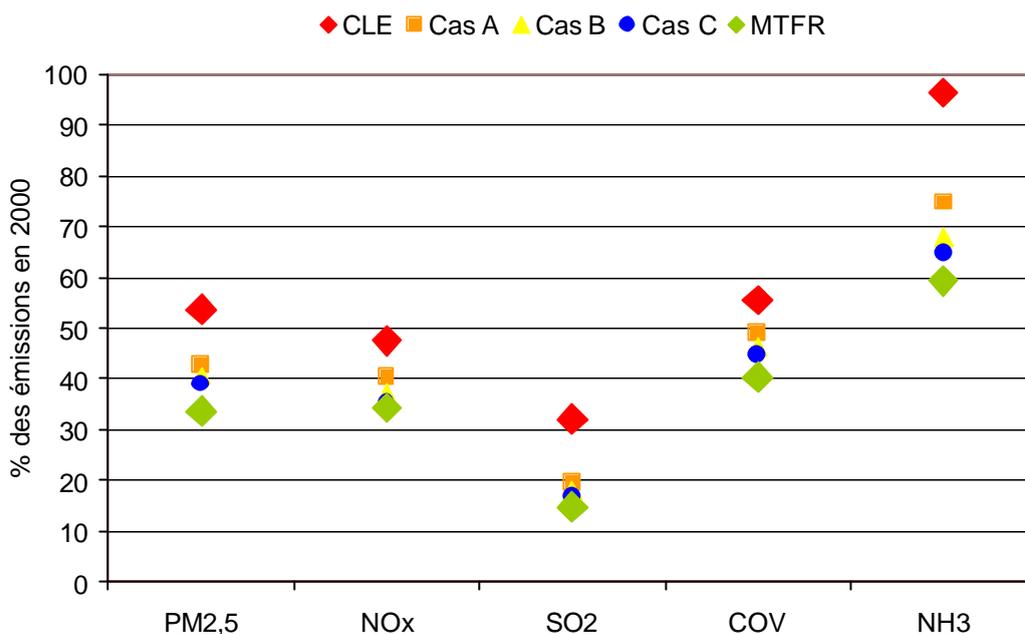


Figure 12. Émissions des différents polluants dans les scénarios de référence, MTFR et D23 pour l'Europe des 25, en % des émissions en 2000

Les réductions d'émission, par rapport au niveau de l'année 2000, dépendent essentiellement de ce que le modèle RAINS estime possible de faire, c'est-à-dire des émissions dans les scénarios CLE et MTFR, plus que des différents niveaux d'ambition des scénarios optimisés.

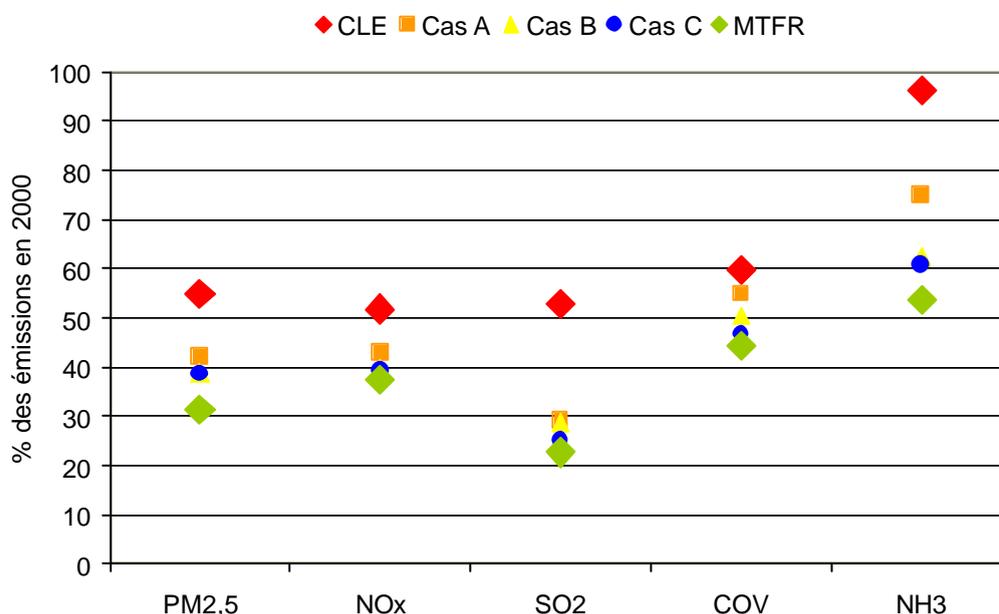


Figure 13. Émissions des différents polluants dans les scénarios de référence, MTFR et D23 pour la France, en % des émissions en 2000

Globalement cette figure est assez similaire à celle pour l'Europe des 25.

Les réductions les plus importantes par rapport à la situation en 2000 sont celles pour les émissions de SO₂. On peut noter que la réduction des émissions de SO₂ dans le scénario de référence est plus faible pour la France que pour l'Europe des

25. En conséquence l'effort à effectuer pour passer de la situation de référence aux scénarios optimisés est plus important.

Pour le NH₃, les mesures déjà décidées (incluses dans le scénario de référence) ne permettent presque aucune réduction des émissions entre 2000 et 2020. Le scénario MTRF permet de les réduire d'entre 40 et 50 %.

En France, pour les NO_x et pour les PM_{2,5}, les scénarios D23 représentent une baisse des émissions de l'ordre de 60 % entre 2000 et 2020. Pour le SO₂, cette baisse est supérieure à 70 %. Pour les COV elle est de l'ordre de 50 % et pour le NH₃, elle d'est d'environ 40 %.

Regardons maintenant les émissions françaises en kilotonnes, les objectifs de réduction déjà fixés pour 2010 (les plafonds de la directive NEC) et ceux susceptibles d'être fixés pour 2020 (le niveau d'ambition moyen, ou B¹⁷).

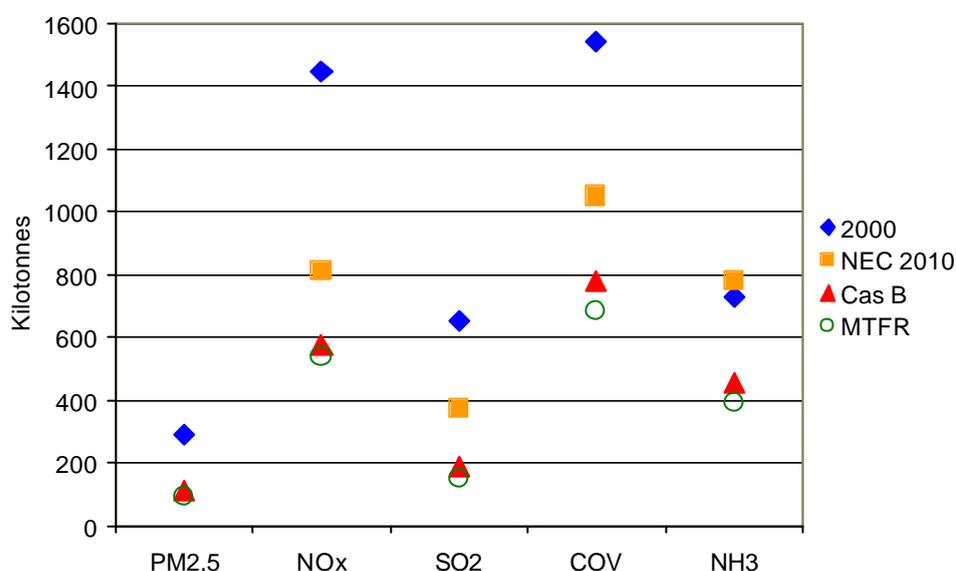


Figure 14. Émissions des différents polluants pour la France en 2000 et objectifs de réduction déjà fixés pour 2010 (NEC) et envisagés pour 2020 (niveau d'ambition moyen ou B), en kilotonnes

Comme nous l'avons déjà noté, les niveaux d'émission pour les scénarios optimisés calculés par l'IIASA pour 2020 sont très proches des émissions dans le scénario MTRF.

Pour les NO_x, le SO₂ et les COV, le scénario D23-B va sensiblement plus loin que les plafonds de la directive NEC. En pourcentage de réduction, les baisses entre la situation en 2000 et les plafonds NEC d'une part et celles entre les plafonds NEC et le scénario D23-B d'autre part sont du même ordre : ces diminutions sont respectivement de 44 et 29 % pour les NO_x, de 43 et 50 % pour le SO₂ et de 32 et 26 % pour les COV.

Pour le NH₃, le plafond NEC n'était pas réellement contraignant. Au contraire, le niveau d'émission dans le scénario D23-B imposerait une réduction des émissions de 42 % par rapport au plafond NEC.

¹⁷ Pour la clarté du graphique, nous ne reportons sur la figure que le niveau d'ambition B. En effet, comparés aux émissions en 2000, les niveaux d'ambition A et C ne se distinguent graphiquement quasiment pas du niveau B.

2.5.3. Mesures prises dans le scénario D23, cas B

L'IIASA résume ainsi¹⁸ les mesures prises en compte dans le scénario D23-B :

- SO₂ :
 - Charbon et fioul lourd à faible teneur en soufre,
 - Désulfuration des fumées ;
- NOx :
 - Modifications de la combustion,
 - SCR et SNCR,
 - Réduction des émissions de NOx des véhicules diesel (lourds et légers) ;
- Particules :
 - Dépoussiéreurs haute efficacité,
 - Chaudières d'un type nouveau dans le secteur résidentiel,
 - Bonnes pratiques pour les chaudières au fioul,
 - Fioul lourd à faible teneur en soufre pour le transport maritime national ;
- NH₃ :
 - Application de fumier de porcins et de bovins avec des mesures d'application faiblement émettrices de NH₃,
 - Substitution du nitrate d'ammonium par de l'urée,
 - Couverture des stockages de fumier pour les porcins et les bovins,
 - Changement des modes d'alimentation des animaux ;
- COV :
 - Contrôle des émissions diffuses dans l'industrie de la chimie organique,
 - Modifier les émulsions de bitume pour le pavage des routes,
 - Application de peintures (revêtements),
 - Stage II pour la distribution de carburants,
 - Amélioration de la combustion et réduction des émissions diffuses lors de la production de combustibles liquides.

Bien entendu, les taux de pénétration de ces techniques de réduction varient en fonction des secteurs d'activité et des pays.

2.6. ÉTROITESSE DE LA MARGE DE MANŒUVRE

2.6.1. Marge de manœuvre dans la définition des stratégies de réduction des émissions

Comme on l'a vu dans les paragraphes précédents, les réductions d'émission calculées dans les différents scénarios optimisés dépendent essentiellement de ce que le modèle RAINS estime possible de faire, c'est-à-dire des émissions dans les scénarios Baseline et MTFR, plus que des différents niveaux d'ambition des scénarios optimisés. Ainsi, pour les NOx, l'IIASA estime que les émissions françaises vont diminuer de 48 % entre 2000 et 2020, dans le scénario de référence. En mettant en œuvre toutes les techniques possibles (MTFR), il n'est

¹⁸ Lors de sa présentation au cours de la réunion du Steering group de CAFE du 14 avril 2005.

possible de réduire les émissions que de 14 % supplémentaires.

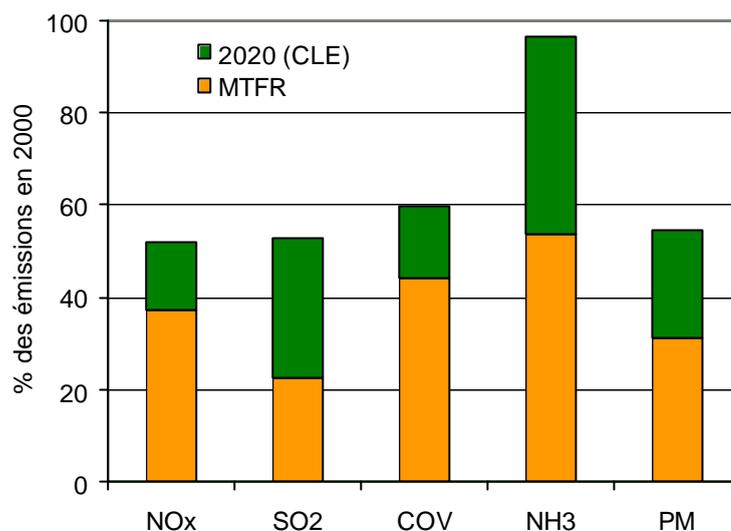


Figure 15. Émissions françaises dans les scénarios CLE et MTRF, en % des émissions en 2000

Plus généralement, si l'on considère les différences entre les émissions en 2000 et les émissions dans le scénario MTRF, soit les réductions d'émission techniquement faisables entre maintenant et 2020, l'IIASA estime que la France aura effectué, dès 2020, entre 60 et 77 % de ces réductions pour les NOx, le SO₂, les COV et les PM_{2,5}. Pour ces quatre polluants, la marge de manœuvre pour définir les stratégies de réduction des émissions représente donc moins du tiers des réductions d'émission techniquement faisables d'ici 2020.

À cause de cette étroitesse de la marge de manœuvre existant entre les scénarios CLE et MTRF, le modèle RAINS ne permet en fait d'agir qu'à la marge.

2.6.2. Importance et incertitudes des scénarios CLE et MTRF

L'IIASA estime que toute stratégie de réduction des émissions doit obtenir des résultats meilleurs que le scénario de référence et qu'il est impossible d'aller au-delà du scénario MTRF. Ces restrictions introduisent pour les réductions des émissions envisagées des bornes inférieure (CLE) et supérieure (MTRF), ce qui semble tout à fait logique. D'après l'IIASA le scénario CLE représente la situation sans effort supplémentaire ; il est logique de la prendre comme niveau minimal. De même on ne peut envisager de faire plus que le scénario MTRF, situation censée représenter le maximum possible.

Ces deux scénarios prennent donc une importance considérable dans tous les calculs préparatoires à la stratégie thématique CAFE : toutes les réductions d'émission, les coûts de réduction, les variations des impacts sont calculés par rapport au scénario CLE. Et ces deux scénarios définissent le 'domaine de définition' dans lequel il est possible de définir une stratégie de réduction des émissions.

Or ce 'domaine de définition' est très théorique et sans doute beaucoup trop restreint par rapport à l'univers réel des possibles :

- D'une part le niveau des émissions dans le scénario de référence semble, au moins pour la France, trop bas. En effet, l'IIASA fait des hypothèses

ambitieuses sur le taux de pénétration de certaines techniques de dépollution, pour les centrales thermiques par exemple. D'après les estimations du CITEPA, les niveaux d'émission de ce scénario de référence représentent déjà pour la France des objectifs relativement ambitieux.

- D'autre part le scénario MTRF est trop restrictif. Il ne prend en compte que les mesures techniques de réduction des émissions et seulement celles qui existent actuellement. Il est tout à fait possible qu'en 2020 de nouvelles techniques de réduction (technologies émergentes) soient exploitables à l'échelle industrielle et permettent ainsi de réduire les coûts de réduction des émissions. En outre, des mesures non techniques (économiques, structurelles, etc.) peuvent sans doute permettre de réduire les émissions au-delà de la situation MTRF.

Malheureusement, la prise en compte de ces considérations dans le modèle RAINS, actuellement à l'étude, n'a pas encore trouvé de solutions satisfaisantes.

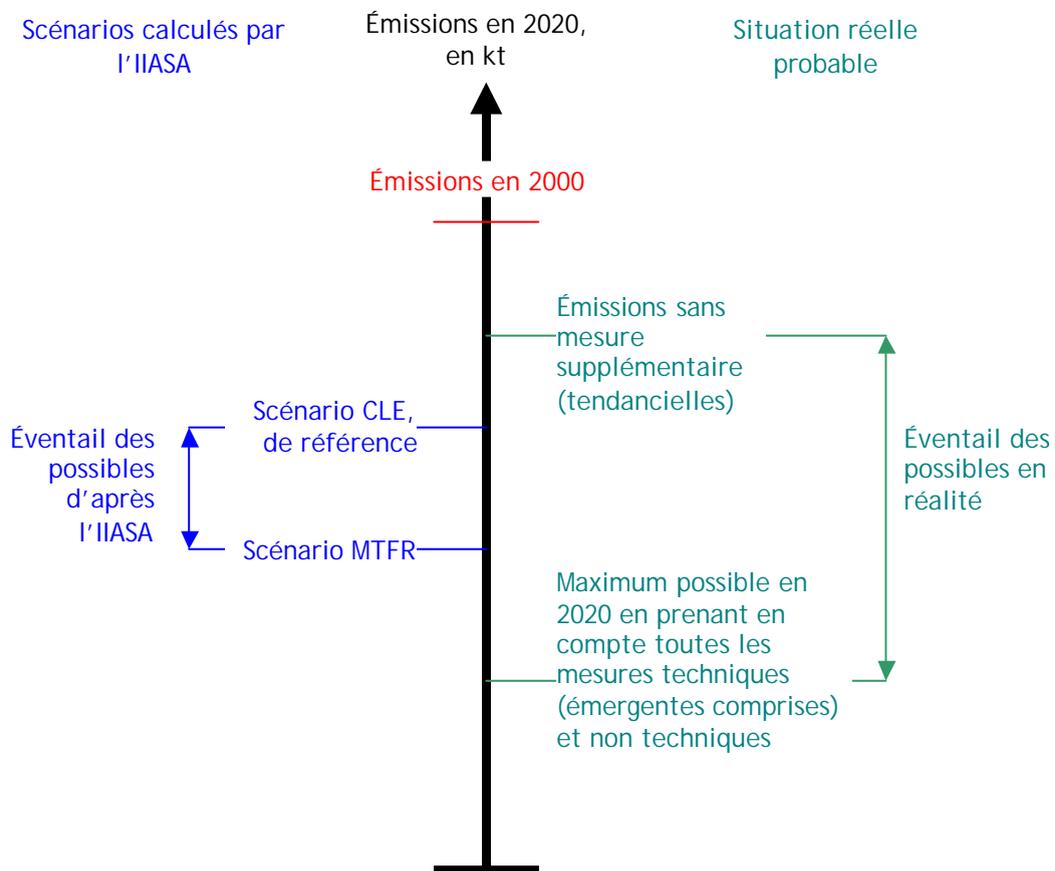


Figure 16. Illustration graphique de l'étrécissement du 'domaine de définition' de l'optimisation : Comparaison entre la marge de manœuvre considérée par l'IIASA et une vision plus réaliste

Dans la figure ci-dessus, le 'domaine de définition', c'est-à-dire la marge de manœuvre pour réduire les émissions considérée dans le modèle RAINS, est représenté par la partie comprise entre les deux barres horizontales de gauche (en bleu). Quel que soit le polluant considéré, cette partie centrale ne représente peut-être qu'une faible proportion de l'éventail des possibles réel, représenté par l'espace compris entre les deux barres horizontales de droite (en vert).

Le point de vue de l'IIASA

Comme le souligne l'IIASA lui-même à propos des 'gap closures', la définition de leurs contraintes d'optimisation est très imparfaite ; il la qualifie d'ailleurs de provisoire¹⁹. En effet elle s'appuie sur deux situations, la situation de référence et la situation MTRF, pour lesquelles les chiffres sont très incertains. Comme l'a notamment remarqué l'équipe de Peringe Grennfelt lors de la RAINS review, une des principales sources d'incertitude est la prévision des activités et des émissions.

En outre, cette méthode ne tient aucun compte des objectifs de long terme.

¹⁹ « It is understood that this **provisional** definition of a gap closure is entirely different from the "effectbased" gap closure concept that was used in the preparations for the NEC directive, since it does not establish any relationship with the environmental long-term target of the European Union. At the same time, both quantifications of the "baseline" emission levels for 2020 and the "maximum technically feasible reduction" (MTRF) case **are loaded with serious uncertainties** and potentially strategically motivated disagreements, which make this definition prone for political dispute. » [CAFE Scenario Analysis Report Nr. 3, Amman et al., 2005a] (C'est nous qui soulignons.)

3. LES COÛTS DES SCÉNARIOS DU MODÈLE RAINS

L'IIASA a calculé les coûts de réduction des émissions nécessaires pour passer des émissions en 2000 aux émissions en 2020 dans les scénarios CLE et MTRF. Il a également calculé le coût des différentes stratégies optimisées de réduction des émissions, c'est-à-dire les coûts de réduction des émissions nécessaires pour passer des émissions du scénario CLE aux émissions des scénarios D23.

3.1. COÛTS DU SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE (CLE 2020)

Tableau 2. Coûts du scénario de référence (CLE 2020) pour la France et pour l'Union européenne

	Transport Tous polluants	Sources fixes					Total
		SO ₂	NO _x	VOC	PM _{2,5}	NH ₃	
Coûts totaux (millions d'euros par an)							
France	4 220	1 920	58	515	972	111	7 796
UE25	40 198	12 898	2 352	1 738	6 459	2 217	65 862
Coûts par habitant (euros/habitant/an)							
France	67,6	30,8	0,9	8,2	15,6	1,8	124,9
UE25	90,1	28,9	5,3	3,9	14,5	5,0	147,6
Coûts rapportés au PIB (%)							
France	0,189	0,086	0,003	0,023	0,043	0,005	0,349
UE25	0,278	0,089	0,016	0,012	0,045	0,015	0,455
Coûts à la tonne évitée (euros par tonne de polluant non émise)							
France	-	6 914	841	2 166	13 665	5 391	-
UE25	-	2 244	1 462	1 065	13 649	27 130	-

3.1.1. Coûts totaux

D'après les calculs de l'IIASA, appliquer les politiques déjà décidées de lutte contre la pollution atmosphérique pour 2020 (scénario CLE) coûtera 7,8 milliards d'euros par an à la France et 65,9 milliards d'euros par an à l'Union européenne. Cela représente 0,35 % du PIB de la France et 0,46 % du PIB de l'Union européenne. Cela représente également un coût par habitant de 125 euros par personne et par an pour la France et de 148 €/pers./an pour l'Union européenne. Pour le coût rapporté au PIB comme pour le coût par habitant, les coûts totaux pour la France sont inférieurs à la moyenne européenne.

3.1.2. Coûts par polluant

Les coûts de réduction des émissions des sources fixes représentent moins de la moitié des coûts totaux de réduction pour la France (46 %) comme pour l'Union européenne (39 %).

Si l'on ne considère que les sources fixes, la moitié des coûts sont causés par la réduction des émissions de SO₂ (54 % dans le cas de la France et 50 % dans celui de l'Union européenne). Le deuxième polluant dont la réduction des émissions dues aux sources fixes coûte le plus sont les PM_{2,5} : réduire leurs

émissions en provenance des sources fixes représente 27 % des coûts de réduction totaux des émissions des sources fixes pour la France et 24 % pour l'Union européenne.

Les coûts de réduction des émissions de NO_x sont très faibles en France par rapport à ceux de l'Union européenne (0,9 €/personne/an en France contre 5,3 €/personne/an dans l'Union européenne).

3.1.3. Coûts à la tonne évitée

L'IIASA estime qu'entre 2000 et 2020, les émissions de SO₂ des sources fixes en France vont baisser de 278 kt, passant de 609 kt à 331 kt. Il estime que les coûts correspondants s'élèvent à 1 920 M€/an. Cela correspond donc à des coûts annuels de plus 6 900 € par tonne de SO₂ non émise. Pour l'ensemble de l'Europe des 25, l'IIASA calcule des coûts de réduction des émissions de SO₂ de 2 250 €/t/an.

En ce qui concerne les NO_x, l'IIASA a estimé qu'entre 2000 et 2020, les émissions de NO_x des sources fixes en France vont baisser de 558 kt, passant de 1 016 kt à 458 kt. Il estime que les coûts correspondants s'élèvent à 58 M€/an. Cela correspond donc à des coûts annuels de plus 840 € par tonne de NO_x non émise. Pour l'ensemble de l'Europe des 25, l'IIASA calcule des coûts de réduction des émissions de NO_x de 1 460 €/t/an.

Les PM_{2,5} sont les polluants pour les lesquels les coûts de réduction des émissions, à la tonne de polluant non émise sont les plus élevés. Ces coûts sont de l'ordre de 13 650 € par an par tonne de PM_{2,5} non émise, pour la France comme pour l'Union européenne.

Les coûts à la tonne évitée pour les émissions des sources fixes de NH₃ sont également élevés : près de 5 400 €/an/t de NH₃ non émise en France et plus de 21 100 €/an/t de NH₃ non émise dans l'Union européenne. Cela reflète sans doute les difficultés rencontrées pour réduire la pollution d'origine agricole et le manque de connaissance, ou de pratique, dans ce domaine.

3.1.4. Biais dans les hypothèses

Comme nous l'avons noté dans le paragraphe 1.2, 'Le scénario de référence 2020 (CLE) pour la France', l'IIASA considère, principalement pour les centrales thermiques, des taux de pénétration des techniques de dépollution (SCR pour les NO_x et WFGD pour le SO₂) trop optimistes : ils adoptent une interprétation restrictive de la directive GIC et estiment que toutes les centrales thermiques doivent en respecter les valeurs limites d'émission. Cela sous-estime les émissions et surestime les coûts dans la mesure où dans leur scénario, les producteurs dépolluent plus qu'ils ne le font en réalité.

3.2. COÛTS DES SCÉNARIOS OPTIMISÉS FINAUX (D23)

3.2.1. Coûts totaux

Nous considérons maintenant uniquement les coûts additionnels pour les sources fixes, c'est-à-dire les coûts prévus pour qu'en 2020 les sources fixes aient réduit leurs émissions du niveau de la situation de référence (CLE) aux niveaux des stratégies optimisées D23 (d'ambition environnementale faible, cas A, moyenne, cas B, ou élevée, cas C). Pour estimer les coûts totaux nécessaires pour passer

de la situation en 2000 au niveau des stratégies A, B ou C en 2020, il faut ajouter à ces coûts les coûts du scénario de référence (voir le paragraphe précédent, 'Coûts du scénario de référence (CLE 2020)') et les coûts de réduction des émissions des sources mobiles.

Les coûts pour passer des émissions de CLE à celles des scénarios D23 s'élèvent pour la France à 739 millions d'euros par an pour la stratégie A, 1 704 M€/an pour la stratégie B et 2 095 M€/an pour la stratégie C.

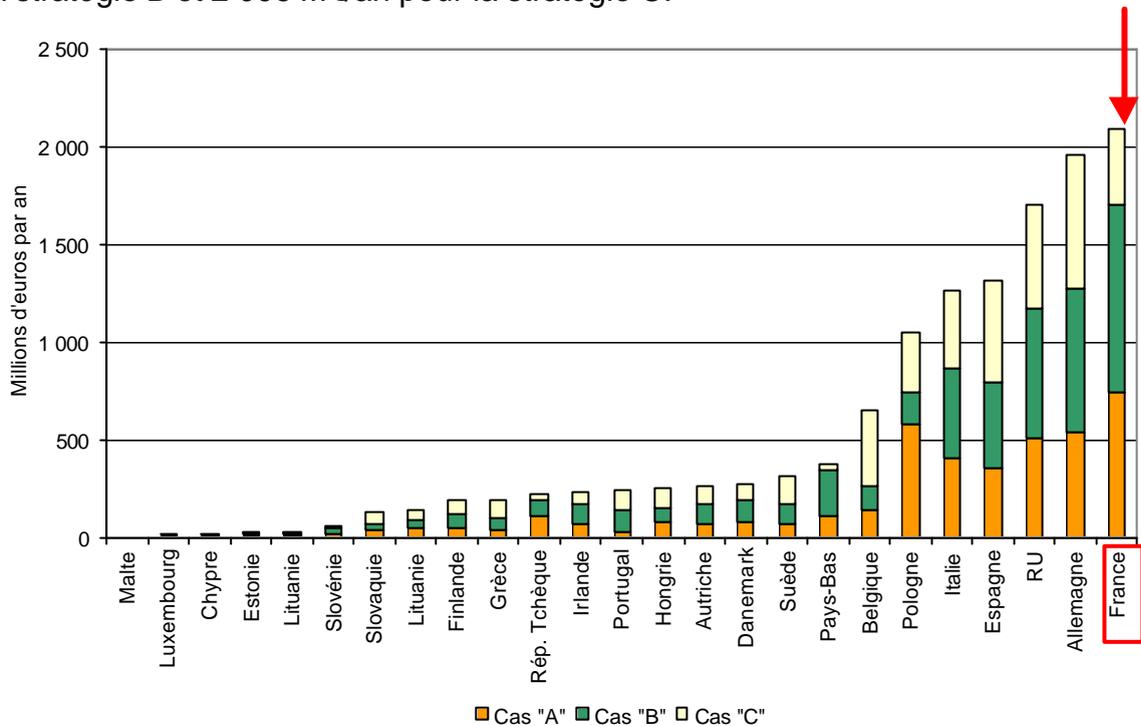


Figure 17. Coûts des trois stratégies D23 en fonction des niveaux d'ambition environnementale, en millions d'euros/an

Si l'on ne considère que les coûts supplémentaires (c'est-à-dire en plus de ceux nécessaires pour atteindre le scénario de référence) pour atteindre la situation D23 avec ambition élevée, la France est le pays qui a les coûts les plus élevés (2,1 milliards d'euros par an), devant l'Allemagne (1,96 G€/an), le Royaume-Uni (1,7 G€/an), l'Espagne (1,32 G€/an) et l'Italie (1,26 G€/an).

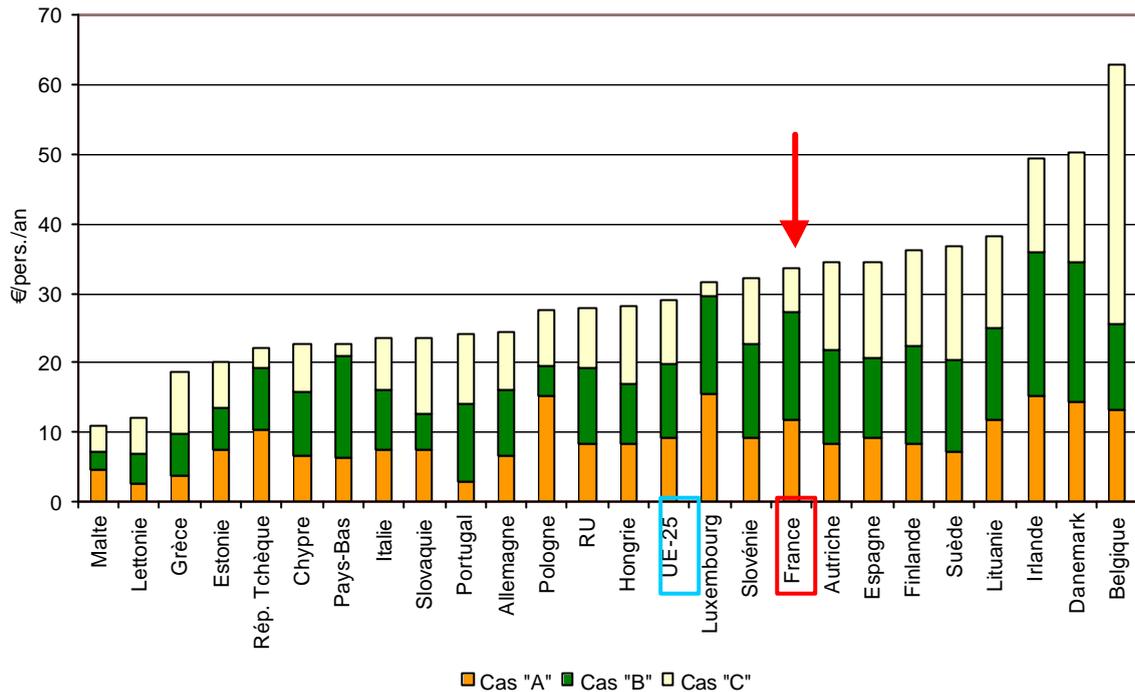


Figure 18. Coûts par habitant des trois stratégies D23 en fonction des niveaux d'ambition environnementale, en €/personne/an

Si l'on considère les coûts par habitant, les coûts français (34 €/pers./an pour le cas C) se situent très légèrement au-dessus de la moyenne européenne (29 €/pers./an pour le cas C). Mais l'Autriche, l'Espagne, la Finlande, la Suède, le Danemark et la Belgique (63 €/pers./an pour le cas C), entre autres, ont des coûts plus élevés.

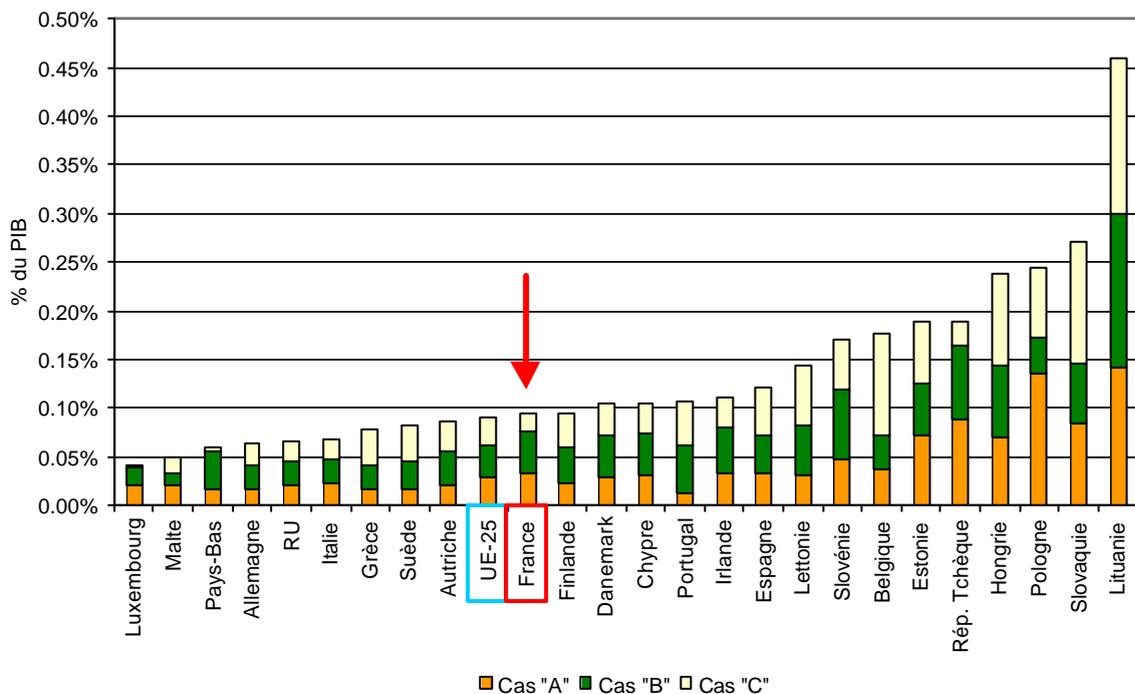


Figure 19. Coûts des trois stratégies D23 en fonction des niveaux d'ambition environnementale, rapportés au PIB, en % du PIB

Les coûts des stratégies D23, exprimés en % du PIB, sont pour la France très légèrement supérieurs à la moyenne européenne (pour le cas C, 0,094 % du PIB pour la France contre 0,090 % pour l'Union européenne). Les valeurs s'échelonnent entre 0,041 % du PIB pour le Luxembourg et 0,460 % pour la Lituanie.

3.2.2. Coûts par polluant

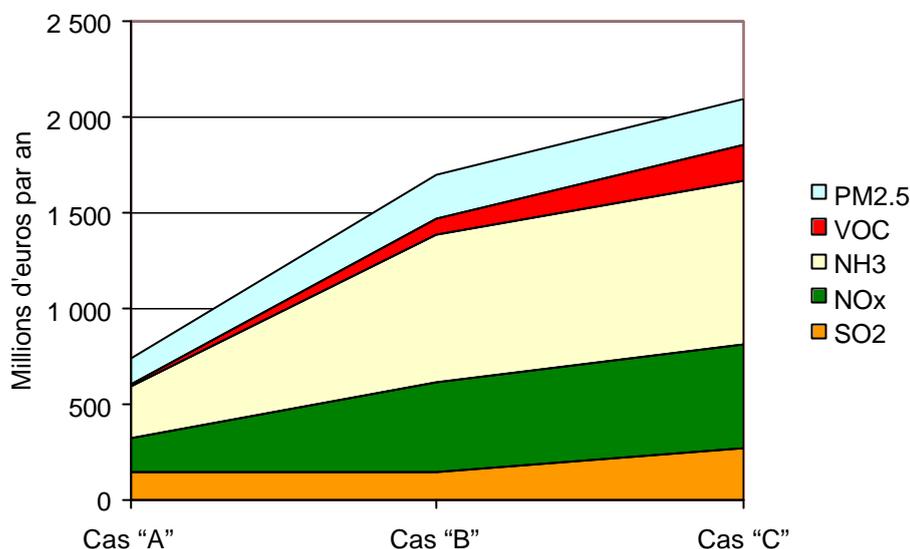


Figure 20. Coûts pour la France des réductions des émissions des sources fixes, par polluant, dans les trois scénarios optimisés (en supplément des coûts de la situation de référence (CLE)), en millions d'euros par an

En ce qui concerne la France, quelle que soit la stratégie, c'est la réduction des émissions de NH₃ qui coûte le plus cher (entre 37 % et 45 % des coûts totaux), puis celle des émissions de NO_x (entre 24 et 27 % des coûts totaux).

3.2.3. Coûts à la tonne de polluant

Dans ces stratégies de réduction, les coûts annuels de dépollution pour les émissions de SO₂ des sources fixes sont compris entre 920 et 1 499 € par tonne de SO₂ non émise. Ces coûts viennent en supplément de ceux nécessaires pour atteindre la situation de référence. Pour l'ensemble de l'Europe des 25, les coûts annuels pour la stratégie de réduction la moins ambitieuse s'élèvent à 730 €/t/an et ceux pour la stratégie la plus ambitieuse s'élèvent à 1 100 €/t/an.

Les coûts annuels de réduction des émissions de NO_x des sources fixes pour les stratégies de réduction des émissions calculées par RAINS sont compris entre 1 400 et 3 000 €/t/an pour la France et entre 1 100 et 3 100 €/t/an pour l'Europe des 25. Encore une fois ces coûts s'ajoutent à ceux nécessaires pour atteindre la situation de référence.

Pour les PM_{2.5}, les coûts annuels de réduction des émissions des sources fixes pour les trois stratégies de réduction des émissions calculées par RAINS sont compris entre 3 700 et 5 100 €/t/an pour la France et entre 2 100 et 3 600 €/t/an pour l'Europe des 25. Encore une fois ces coûts s'ajoutent à ceux nécessaires pour atteindre la situation de référence.

3.3. COÛTS TOTAUX À PARTIR DE LA SITUATION EN 2000 (CLE + D23)

Il nous semble pertinent d'étudier les coûts totaux, c'est-à-dire la somme des coûts du scénario de référence (CLE) et de ceux des scénarios optimisés (D23). En effet ils représentent les coûts totaux des politiques de lutte contre la pollution atmosphérique dépensés entre 2000 et 2020.

3.3.1. Importance relative des coûts du scénario de référence

Les coûts du scénario de référence sont beaucoup plus importants que ceux des nouvelles politiques, même dans l'hypothèse avec une ambition élevée.

Ils représentent entre 84 et 96 % des coûts totaux (coûts de référence + coûts de la stratégie D23) pour l'Europe des 25 et entre 79 et 91 % des coûts totaux pour la France. Dans ces coûts du scénario de référence, plus de la moitié sont des coûts pour les sources mobiles (dans les coûts pour le scénario D23, ne sont inclus que des coûts pour les sources fixes).

3.3.2. Coûts globaux

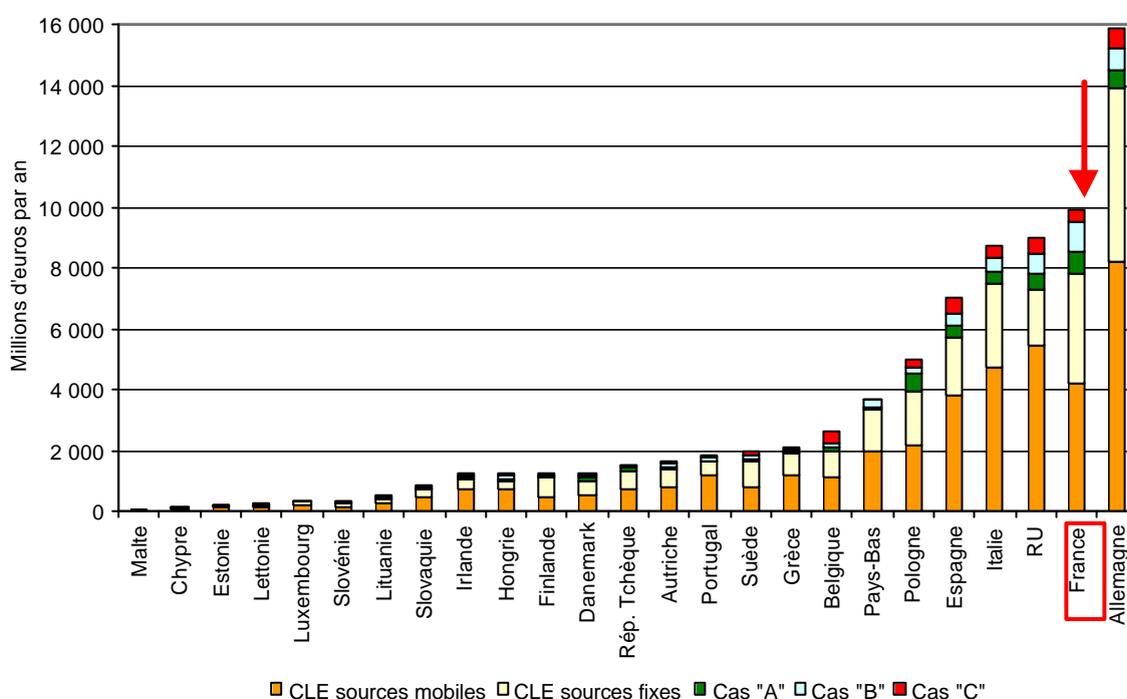


Figure 21. Coûts totaux (situation de référence + stratégies D23) en fonction des niveaux d'ambition environnementale, en millions d'euros/an

Si l'on considère l'intégralité des coûts, c'est maintenant l'Allemagne qui devrait supporter les coûts les plus importants (15,9 milliards d'euros par an pour la stratégie C et 15,2 G€/an pour le cas B). La France (9,9 G€/an pour le cas C et 9,5 G€/an pour le cas B) se situe loin derrière l'Allemagne et juste devant le Royaume-Uni, l'Italie et l'Espagne.

Pour l'Union européenne, les coûts s'élèvent à 69,9 G€/an pour le cas A, 74,7 G€/an pour le cas B et 78,8 G€/an pour le cas C.

3.3.3. Coûts par habitant

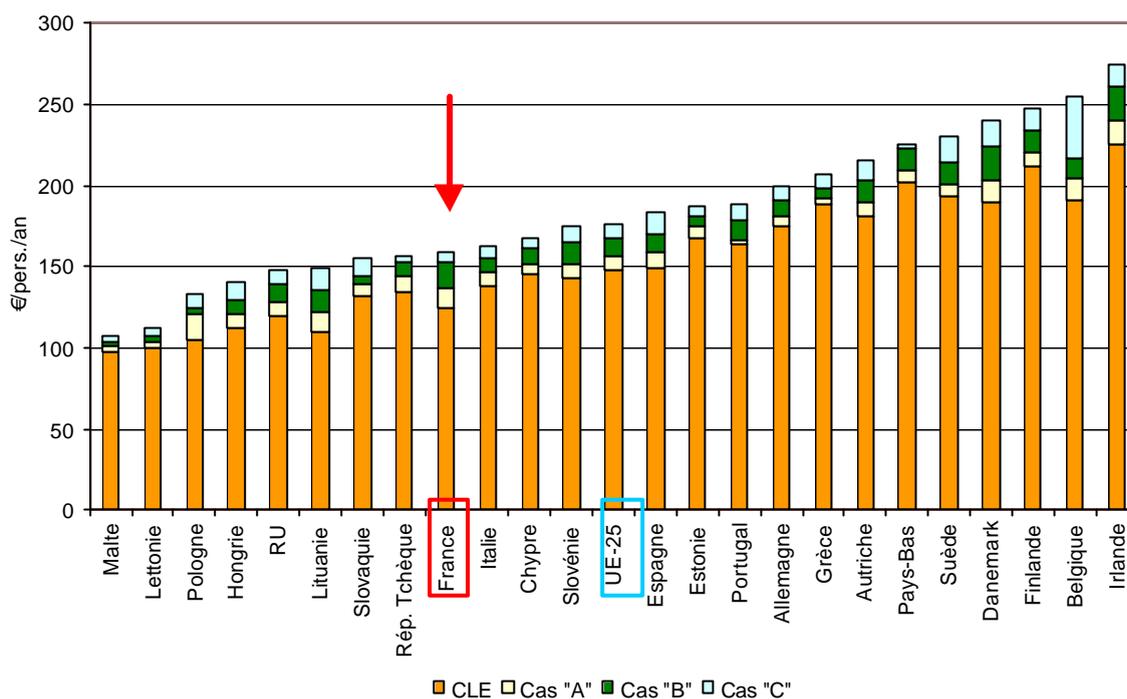


Figure 22. Coûts totaux (situation de référence + stratégies D23) par habitant en fonction des niveaux d'ambition environnementale, en euros par personne et par an

Pour les coûts totaux par personne et par an, la France se situe dans les pays avec les coûts les moins chers (158 € par personne et par an), devant le Royaume-Uni (148 €/pers./an) et quelques nouveaux pays membres (à partir de 108 €/pers./an pour Malte). La moyenne européenne se situe à 177 € par personne et par an.

3.3.4. Coûts rapportés au PIB

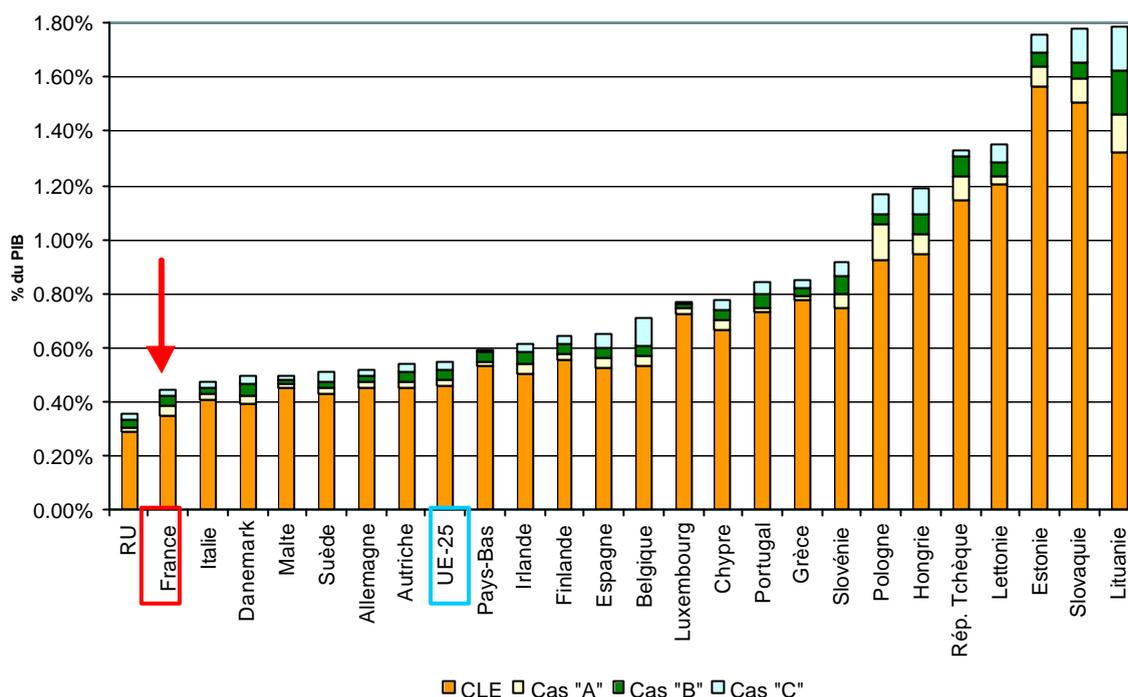


Figure 23. Coûts totaux (situation de référence + stratégies D23) rapportés au PIB, en pourcents du PIB

Par rapport au PIB, les pays qui devraient faire l'effort le plus important sont les nouveaux adhérents (jusqu'à près de 1,8 % du PIB pour l'Estonie, la Slovaquie et la Lituanie). Ceux qui devraient en faire le moins sont, en plus de Malte, du Danemark et de la Suède, les quatre pays les plus peuplés : le Royaume-Uni (0,35 % du PIB), la France (0,44 %), l'Italie (0,48 %) et l'Allemagne (0,52 %). La moyenne européenne se situe à 0,55 % du PIB.

3.3.5. Récapitulatif

Tableau 3. Récapitulatif des coûts pour la France du scénario CLE et des coûts supplémentaires pour appliquer les stratégies A et C

	Transport Tous polluants	Sources fixes					Total
		SO ₂	NO _x	VOC	PM _{2,5}	NH ₃	
Coûts totaux (millions d'euros par an)							
CLE	4 220	1 920	58	515	972	111	7 796
D23/A		141	179	14	134	270	739
CLE + A	4 220	2 061	237	529	1 106	381	8 535
D23/C		270	546	185	236	858	2 095
CLE + C	4 220	2 190	604	700	1 208	969	9 891

Tableau 3. Récapitulatif des coûts pour la France du scénario CLE et des coûts supplémentaires pour appliquer les stratégies A et C (suite)

	Transport Tous polluants	Sources fixes					Total
		SO ₂	NO _x	VOC	PM _{2,5}	NH ₃	
Coûts par habitant (euros/habitant/an)							
CLE	67,6	30,8	0,9	8,2	15,6	1,8	124,9
D23/A		2,3	2,9	0,2	2,1	4,3	11,8
CLE + A	67,6	33,1	3,8	8,4	17,7	6,1	136,7
D23/C		4,3	8,7	3,0	3,8	13,7	33,6
CLE + C	67,6	35,1	9,6	11,2	19,4	15,5	158,5
Coûts rapportés au PIB (%)							
CLE	0,189	0,086	0,003	0,023	0,043	0,005	0,349
D23/A		0,006	0,008	0,001	0,006	0,012	0,033
CLE + A	0,189	0,092	0,011	0,024	0,049	0,017	0,382
D23/C		0,012	0,024	0,008	0,011	0,038	0,094
CLE + C	0,189	0,098	0,027	0,031	0,054	0,043	0,443
Coûts à la tonne évitée (euros par tonne de polluant non émise)							
CLE	-	6 914	841	2 166	13 665	5 391	-
D23/A	-	920	1 397	181	3 653	1 730	-
CLE + A	-	7 834	2 238	2 347	17 318	7 121	-
D23/C	-	1 499	2 977	914	5 096	3 310	-
CLE + C	-	8 413	3 818	3 080	18 761	8 701	-

4. L'ANALYSE COÛTS / BÉNÉFICES DES STRATÉGIES CAFE

En complément des travaux de l'IIASA qui élabore différentes stratégies de réduction des émissions et calcule leurs coûts, AEA Technology réalise une analyse des bénéfices des différents scénarios étudiés.

4.1. DÉROULEMENT DE L'ÉTUDE

4.1.1. Objectifs de l'étude

AEA Technology, bureau d'études britannique, réalise pour le compte de Commission européenne une étude pour analyser les bénéfices, et plus généralement les impacts socio-économiques, de différentes options stratégiques permettant d'améliorer la qualité de l'air dans l'Union européenne, principalement dans le cadre du programme CAFE²⁰. Il s'agit de mettre en place la capacité analytique nécessaire et, dans un deuxième temps, d'exécuter l'analyse pour différentes options de réduction des émissions atmosphériques.

Le cahier des charges initial de l'étude était le suivant :

- Définir une méthodologie pour estimer les bénéfices du programme CAFE. Cette méthodologie doit pouvoir s'appliquer aux scénarios de référence ('Baseline scenarios') et à des scénarios alternatifs.
- Étendre l'analyse et étudier :
 - les bénéfices que l'on ne sait pas évaluer en termes monétaires ; pour ce faire un cadre d'analyse multi-critères doit être développé ;
 - les impacts locaux du programme CAFE ;
 - ses impacts socio-économiques (en termes d'emplois et d'effets sur les différents secteurs économiques).
- Estimer en termes monétaires les impacts des différents polluants en 2000 et en 2020, dans le scénario de référence ('baseline 2020') et dans le scénario MTR.
- Conduire des premières analyses pour quelques scénarios calculés par l'IIASA.

Cette analyse des bénéfices vient compléter l'étude des coûts des stratégies de réduction des émissions qui est réalisée par l'IIASA avec le modèle RAINS.

4.1.2. Déroulement de l'étude et consultation des experts

L'étude a débuté en septembre 2003 et est sur le point de s'achever. Les rapports définitifs sur la méthodologie ont été publiés en février 2005. AEA Technology a également calculé les impacts sanitaires des politiques de réduction des émissions pour un certain nombre de scénarios élaborés par l'IIASA : le scénario de référence, le scénario MTR et plusieurs scénarios optimisés.

Les experts des États membres et de l'industrie ont été régulièrement tenus au courant de l'avancée des travaux d'AEA Technology, par la diffusion des rapports

²⁰ Ce bureau d'études a déjà réalisé des travaux similaires pour la Commission européenne et le gouvernement britannique (notamment l'analyse des bénéfices de la directive Plafonds nationaux d'émission en 1999).

provisaires (en novembre 2003, février et juillet 2004) et lors de réunions de consultation (deux réunions de consultation ont eu lieu, le 12 décembre 2003 et le 16 juillet 2004).

L'INERIS a consulté des experts français spécialisés dans ce type d'analyse, a participé aux deux réunions de consultation et a fait à plusieurs reprises des commentaires oraux et écrits sur les documents rédigés par AEA Technology.

Une analyse critique ('peer review') de cette étude a également été réalisée par une équipe d'experts indépendants en août 2004. La version finale de la méthodologie a intégré certaines des remarques effectuées lors de cette analyse critique.

4.2. MÉTHODOLOGIE

4.2.1. Méthodologie générale

L'état de l'art pour ce type d'étude d'analyse coûts bénéfiques globale de politiques de réduction des émissions est encore très imparfait. Les études existantes concernent notamment le Clean Air Act aux États-Unis (1997 et 1999) et la directive Plafonds nationaux d'émission en Europe (1999). Cette dernière étude avait été réalisée par une équipe assez similaire à celle qui travaille actuellement sur l'évaluation des bénéfices du programme CAFE.

Dans le cadre qui lui était imposé, AEA Technology n'avait ni les moyens, ni le temps de développer des outils méthodologiques vraiment nouveaux. L'étude est donc une compilation et une intégration dans un cadre unique et cohérent de ce qui se fait de mieux en évaluation monétaire. Le document méthodologique d'AEA Technology constitue ainsi une bonne synthèse de l'état de l'art du calcul de bénéfices liés aux réductions d'émissions atmosphériques.

La méthodologie adopte l'approche 'impact pathway', élaborée et développée notamment dans le cadre du programme européen ExternE. Cette approche se déroule en plusieurs phases :

- 1) identifier les sources de pollution et quantifier les émissions de polluants ;
- 2) calculer la dispersion des polluants, les dépôts ou les expositions dans toute l'Europe ;
- 3) identifier les populations et les écosystèmes susceptibles d'être touchés ; appliquer des fonctions exposition-réponse pour quantifier les impacts ;
- 4) évaluer ces impacts en termes monétaires.

Les deux premières étapes sont effectuées par les modèles EMEP et RAINS. AEA Technology a donc travaillé sur les deux dernières étapes.

4.2.2. Quantification des risques

Pour la quantification des impacts sanitaires, les principales hypothèses considérées par AEA Technology sont les suivantes :

- Pour les particules, AEA Technology considère qu'une augmentation de la concentration en PM_{2,5} (pour les particules d'origine anthropique) de 10 µg/m³

accroît le taux de mortalité de 6 %, sans seuil d'effet.²¹

- Les effets de la mortalité chronique due aux PM_{2,5} sont exprimés en termes d'années de vie perdues. Cependant, suite à des remarques d'Alan Krupnick, une analyse de sensibilité sera conduite en comptabilisant les morts prématurées attribuables aux particules (ce qui augmente fortement le chiffre des impacts monétaires).
- AEA Technology prend en compte séparément la mortalité infantile due aux particules. Celle-ci est exprimée en nombre de cas et non en années de vie perdues.
- Pour les effets de l'ozone sur la mortalité aiguë, AEA Technology prend en compte les concentrations supérieures à 35 ppb (pour le maximum journalier des moyennes calculées sur huit heures). Une analyse de sensibilité doit être effectuée sans ce seuil, c'est-à-dire en considérant toutes les concentrations supérieures à 0 ppb.
- Pour l'estimation du risque, AEA Technology considère que la mortalité journalière augmente de 0,3 % lorsque la concentration en ozone augmente de 10 µg/m³.²²
- Ces effets aigus de l'ozone sont estimés en termes de morts prématurées attribuables à l'ozone puis convertis en années de vie perdues, en utilisant une valeur de douze mois perdus par mort prématurée. Le chiffre de six mois perdus par mort prématurée, utilisé pour le programme ExternE, avait initialement été choisi par AEA Technology mais a été modifié suite aux remarques de l'équipe chargée de l'analyse critique.
- AEA Technology prend également en compte l'impact des particules et de l'ozone sur la morbidité.

4.2.3. Quelle valeur monétaire pour la vie humaine ?

La conversion en termes monétaires des impacts sanitaires (et environnementaux) est la partie la plus incertaine de ce type d'études, notamment parce que l'estimation de la valeur monétaire d'une vie statistique repose sur des bases très subjectives.

Dans ce genre d'études, les bénéfices concernant la mortalité représentent généralement la plus grande partie des bénéfices totaux. La méthode employée par AEA Technology pour les calculer reflète bien l'état de l'art actuel, avec ses forces et ses incertitudes. En simplifiant, la valeur associée à la vie humaine est déterminée à partir de sondages interrogeant des individus sur ce qu'ils consentiraient à payer pour diminuer la mortalité due à la pollution atmosphérique (variation du risque de mortalité de 5 pour 1 000) ; ces consentements à payer marginaux sont ensuite extrapolés pour estimer ce qu'en moyenne les individus sont prêts à payer pour prolonger leur existence (méthode de l'évaluation contingente). Si la méthodologie générale a surtout été développée aux États-Unis, AEA Technology l'applique avec des données européennes, celles issues

²¹ Ces chiffres sont principalement issus d'une étude de cohorte conduite par Pope et al. (2002). Elle s'appuie sur l'étude de 500 000 personnes habitant dans 50 villes des États-Unis. Cela suppose donc que ces résultats sont transférables des États-Unis vers l'Europe.

²² Cette valeur est tirée d'une méta-analyse, effectuée sous l'égide de l'OMS, d'études de séries temporelles en Europe.

des projets ExternE et NewExt ; l'étude NewExt a été réalisée dans trois pays : la France, le Royaume-Uni et l'Italie. D'après les études considérées, la valeur d'une vie humaine statistique considérée varie entre 980 k€ et 2 M€.

Il a été choisi d'évaluer en termes monétaires les impacts des particules et de l'ozone sur la mortalité en considérant successivement quatre séries d'hypothèses, présentée ci-dessous (de celle qui donne les résultats les moins élevés à celle qui donne les résultats les plus élevés) :

- morbidité + mortalité chronique avec VOLY basse²³ + mortalité infantile avec VSL basse ;
- morbidité + mortalité chronique avec VOLY haute + mortalité infantile avec VSL haute ;
- morbidité + mortalité chronique avec VSL basse + mortalité infantile avec VSL basse ;
- morbidité + mortalité chronique avec VSL haute + mortalité infantile avec VSL haute.

Tableau 4. Valeurs utilisées dans l'analyse coûts / bénéfiques de CAFE en ce qui concerne la mortalité due à la pollution atmosphérique (particules et ozone)

	Basé sur valeurs médianes	Basé sur valeurs moyennes
Mortalité infantile	1 500 000 €/mort	4 000 000 €/mort
VSL (Valeur statistique de la vie)	980 000 €/mort	2 000 000 €/mort
VOLY (Valeur d'une année de vie)	52 000 €/an	120 000 €/an

Tableau 5. Valeurs utilisées dans l'analyse coûts / bénéfiques de CAFE en ce qui concerne la morbidité due à la pollution atmosphérique (particules et ozone)

	Valeur basse	Valeur moyenne	Valeur haute
Bronchite chronique	120 000 €/cas	190 000 €/cas	250 000 €/cas
Admission à l'hôpital pour problème cardiaque ou respiratoire		2 000 €/admission	
Consultation d'un médecin et premier traitement		53 €/consultation	
Jour d'activité restreinte		38 - 130 €/jour ²⁴	
Usage de médicaments pour problème respiratoire		1 €/jour	
Jour avec symptômes		38 €/jour	

AEA Technology utilise un taux d'actualisation de 4 %.

4.2.4. Étude de sensibilité

AEA Technology a distingué les impacts en fonction du degré de connaissance disponible à leur sujet. Ceux qui sont relativement mal connus ne sont quantifiés

²³ Pour les VOLY comme pour les VSL, les estimations basses sont tirées des estimations médianes et les valeurs hautes sont tirées des estimations moyennes.

²⁴ En fonction de la sévérité de la restriction d'activité. 130 €/jour lorsque la personne est forcée de garder le lit.

que dans un deuxième temps et présentés à part, comme analyses de sensibilité. La variation des paramètres clés pour étudier la sensibilité des résultats n'est effectuée que pour la méthode de prise en compte de la mortalité (VSL ou VOLY, valeur moyenne ou valeur médiane). Dans ses premiers résultats, AEA Technology ne donne pas d'analyse de sensibilité en faisant varier les fonctions exposition-réponse ou les seuils d'effet pour les particules et l'ozone par exemple.

4.3. LES AVIS SUR LA MÉTHODOLOGIE

4.3.1. Des incertitudes importantes

L'état de l'art concernant les analyses coûts / bénéfiques est encore loin d'être parfaitement au point et les incertitudes sont nombreuses et importantes.

Tout d'abord, les impacts sont inégalement traités. Certains ont été abondamment étudiés et on est capable de donner un chiffre lorsqu'il s'agit de les exprimer en termes monétaires (effets sur la mortalité notamment). Pour d'autres, on sait les quantifier mais plus difficilement les exprimer en termes monétaires. Pour d'autres enfin, on ne sait même pas les quantifier (certains effets sur les écosystèmes). Les analyses coûts / bénéfiques reflètent donc surtout les impacts sanitaires de la pollution, au détriment des effets sur les écosystèmes. D'ailleurs pour l'instant AEA Technology n'a quantifié que les effets sanitaires des scénarios CAFE.

Un point central de ces études est la façon d'évaluer en termes monétaires les effets sur la mortalité. Sur deux questions primordiales, les avis sont partagés. La première question a trait à la quantification des effets : évalue-t-on les effets sur la mortalité en termes de morts prématurées ou en termes d'années de vie perdues ? La deuxième question a trait à la valeur que l'on attribue à une vie humaine statistique. Les chiffres proposés dans la littérature sont très variables. Ainsi l'USEPA recommande de prendre une valeur de 6 millions de dollars (dollars 2000) alors que la valeur recommandée en Europe est comprise entre 1 et 2 millions d'euros. Comme nous l'avons vu plus, AEA Technology a essayé de refléter ces incertitudes en présentant plusieurs séries de données.

4.3.2. Des ambitions revues à la baisse

Les premières présentations d'AEA Technology étaient extrêmement ambitieuses et promettaient des résultats très intéressants. Malheureusement les résultats finaux ne sont pas à la hauteur des attentes. AEA Technology avait promis une quantification des effets aussi complète que possible, pour éviter de se cantonner aux effets sanitaires ; il avait en outre été envisagé de développer une analyse multi-critères pour prendre en compte dans un cadre unique l'ensemble des effets, quantifiables ou non.

Finalement, l'accent est clairement mis sur les effets sanitaires. C'est dû sans doute en premier lieu à une demande sociétale plus importante sur ces effets et aux objectifs politiques prioritaires du programme CAFE mais également à un manque de données.

L'analyse multi-critères est devenue une analyse coûts bénéfiques étendue. Elle consiste à donner une note comprise entre 1 et 4 pour estimer l'importance des

effets non quantifiés²⁵.

4.3.3. L'avis du Concawe

Le Concawe a fait part de critiques concernant les travaux d'AEA Technology²⁶. Parmi celles-ci on peut relever les deux suivantes :

- 1) Les incertitudes sont mal prises en compte.
- 2) Le choix des hypothèses est biaisé à la hausse : les méthodes et données nord-américaines seraient utilisées lorsqu'elles donnent des résultats plus élevés alors qu'elles seraient ignorées lorsqu'elles donnent des résultats plus faibles.

L'essentiel des bénéfices provient des effets des particules sur la mortalité ; il serait en effet souhaitable d'étudier la sensibilité des résultats à quelques facteurs clés. On peut par exemple penser aux fonctions exposition-réponse (ERF).

Le principal reproche concernant le choix des hypothèses est lié à l'utilisation par AEA Technology d'une valeur de 6 % pour 10 µg/m³ pour le risque relatif de mortalité lié aux PM_{2,5}. Le document du Concawe cite d'autres études qui donnent des facteurs moins élevés (notamment une valeur de 4 % adoptée par l'OMS dans son 'Global burden of disease'). La valeur de 6 % est actuellement celle qui fait relativement consensus au niveau scientifique. Elle est retenue notamment par l'Équipe spéciale Santé de la Convention de Genève et, en France, par l'AFSSE. Il est possible de citer de nombreuses autres études qui proposent des valeurs différentes, comprises entre 0 % et plus de 12 %. Vu l'état de l'art, le choix de 6 % semble pertinent. Il aurait certes été possible, et sans doute intéressant, d'effectuer des études de sensibilité avec d'autres valeurs, 4 % et 12 % par exemple.

A. Krupnick dans son analyse critique fait plusieurs recommandations qui pourraient encore augmenter les chiffres calculés par l'équipe d'AEA Technology et qui n'ont pas été reprises par celle-ci.

En conclusion, on peut en effet regretter qu'AEA Technology ait effectué relativement peu d'études de sensibilité. Peut-être ce manque sera-t-il corrigé dans leurs prochains rapports. Quant aux choix d'hypothèses effectués par AEA Technology, ils semblent généralement en phase avec l'état de l'art et ne semblent pas systématiquement biaisés en faveur des hypothèses maximalistes.

4.3.4. L'analyse critique ('peer review') de la méthodologie

Une analyse critique de la méthodologie développée par AEA Technology a été conduite par Alan Krupnick, Bart Ostro et Keith Bull. Globalement, ils estiment que la méthodologie est cohérente avec l'état de l'art et qu'elle peut être utilisée dans le cadre du programme CAFE.

Ils regrettent généralement le manque de données concrètes sur les incertitudes.

En ce qui concerne le volet évaluation des risques sanitaires, Bart Ostro soutient

²⁵ Ces quatre niveaux de note correspondent aux quatre critères suivants : 'Les impacts ne sont probablement pas significatifs à un niveau national ou local', 'Les impacts ne sont probablement pas significatifs au niveau européen mais au niveau local', 'Les impacts peuvent être significatifs au niveau européen' et 'Les impacts sont probablement significatifs au niveau européen'

²⁶ Notamment dans un document intitulé « Initial observations of CAFE CBA 'First results' based on 'updated' Dec. 04 methodology ».

la majorité des choix effectués par AEA Technology et s'oppose généralement aux critiques du Concawe.

Alan Krupnick, chercheur américain du think tank indépendant Resources for the future, est une référence dans le monde de l'analyse coûts bénéfiques. Il était chargé d'analyser la partie 'évaluation monétaire' de la méthodologie d'AEA Technology.

Il a une vision très théorique de cette discipline. Pour lui l'objectif principal est de se conformer au plus près possible à la théorie économique. Cela revient à prendre dans tous les cas comme étalon pour la valeur de toutes choses les préférences des individus. Cela peut pourtant être problématique pour plusieurs raisons : c'est parfois contradictoire avec des principes d'équité ; en outre, on peut se demander si la volonté générale se résume toujours intégralement à la somme de préférences individuelles.

Une telle attitude le conduit notamment à préférer la prise en compte de la mortalité en comptabilisant le nombre de morts plutôt que les années de vie perdues, ce qui augmente très significativement les sommes considérées.²⁷ Il recommande également de prendre des valeurs d'une vie statistique différentes en fonction des pays²⁸.

4.4. PREMIERS RÉSULTATS

4.4.1. Impacts du scénario de référence

La version de janvier 2005 de l'analyse du scénario de référence n'inclut que la quantification des effets sanitaires. Les effets environnementaux devraient être traités dans un deuxième temps.

Les effets sur la santé sont beaucoup plus causés par les particules que par l'ozone. Ainsi, en 2000, l'exposition aux particules est responsable en Europe de 288 000 morts prématurées, contre 21 000 à cause de l'ozone.

En 2000 et en 2020, la quasi-totalité des effets sanitaires monétisés est due aux particules (plus de 96 %). Entre 64 et 89 % des effets sanitaires totaux sont dus à l'impact des particules sur la mortalité ; entre 10 et 15 % sont dus à leurs effets sur la morbidité. Les effets de l'ozone sur la morbidité sont responsables d'entre 0,5 et 3 % des effets sanitaires totaux ; leurs effets sur la mortalité représentent moins de 1 %.

²⁷ C'est plus conforme à la théorie : en effet la valeur statistique de la vie humaine décroît très peu avec l'âge (elle augmente même jusqu'à 40, 50 ans, en conséquence de l'augmentation des revenus des individus). Mais est-il 'juste', 'socialement préférable' de ne pas tenir compte de l'espérance de vie résiduelle des victimes ?

²⁸ En principe le consentement à payer pour réduire le taux de mortalité augmente avec les revenus des individus ; en toute 'logique', on devrait donc accorder une VSL plus élevée pour les individus aux revenus plus élevés. Une telle méthode a fait scandale en 1996, lorsque, pour une étude sur le changement climatique conduite pour le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), les responsables de l'étude ont attribué une valeur statistique de la vie humaine beaucoup plus élevée pour les habitants des pays développés que pour ceux des pays en développement.

Tableau 6. Évaluation monétaire des dommages sanitaires causés par la pollution atmosphérique dans l'Europe des 25, en 2000 et en 2020, en milliards d'euros

	2000		2020		Différence	
	Estimation basse	Estimation haute	Estimation basse	Estimation haute	Estimation basse	Estimation haute
O ₃ mortalité	1,1	2,5	1,1	2,4	0,0	0,1
O ₃ morbidité	6,3	6,3	4,2	4,2	2,1	2,1
PM mortalité	157,7	582,3	99,7	420,1	58,0	162,2
PM morbidité	77,9	77,9	49,3	49,3	28,6	28,6
Total	243,0	669,0	154,3	476,0	88,7	193,0

Pour la mortalité aiguë (ozone), les deux valeurs correspondent aux valeurs médiane et moyenne issue de l'étude NewExt. Pour la mortalité chronique (particules), l'estimation basse s'appuie sur le nombre d'années de vie perdues (YOLL) et la valeur médiane de l'année de vie perdue issue de NewExt, l'estimation élevée sur le nombre de morts prématurées et la valeur statistique de la vie humaine moyenne issue de NewExt. Le choix de ces hypothèses introduit dans les résultats des facteurs d'incertitude compris entre deux et trois.

4.4.2. Bénéfices des scénarios D23

Nous étudions maintenant les impacts de scénarios optimisés calculés par l'IIASA, les scénarios D23. Il s'agit de scénarios multi-effets, qui cherchent à réduire simultanément l'exposition aux PM_{2,5}, l'exposition à l'ozone, l'acidification et l'eutrophisation. L'IIASA définit trois niveaux d'ambition pour ces scénarios.

Le tableau suivant donne, pour l'Europe des 25, les résultats des améliorations entre la situation de référence en 2020 d'une part, le scénario MTFR et les scénarios optimisés multi-effets d'autre part (avec prise en compte des normes Euro V et VI).

Tableau 7. Bénéfices apportés dans l'Europe des 25 en 2020 par le passage de la situation de référence à diverses stratégies de réduction des émissions, en milliards d'euros

Hypothèses considérées		Optimisation conjointe (D23)			MTFR
Pour la mortalité chronique	Pour la mortalité infantile	Cas A	Cas B	Cas C	
VOLY basse (médiane)	VSL basse (médiane)	34,1	42,1	46,1	52,8
VOLY haute (moyenne)	VSL haute (moyenne)	64,0	79,1	86,6	99,1
VSL basse (médiane)	VSL basse (médiane)	59,1	73,1	80,1	91,6
VSL haute (moyenne)	VSL haute (moyenne)	111,0	137,3	150,4	172,0

On peut tout d'abord remarquer qu'en termes de réduction des effets, les scénarios optimisés d'ambitions moyenne et haute permettent de s'approcher fortement du scénario MTFR. Ces niveaux d'ambition permettent en effet d'obtenir entre 80 et 88 % des bénéfices du scénario MTFR.

Les différentes hypothèses considérées font varier les résultats d'un facteur supérieur à trois.

Le tableau suivant donne, pour la France, les résultats des améliorations entre la situation de référence en 2020 d'une part, le scénario MTFR et les scénarios optimisés multi-effets d'autre part (avec prise en compte des normes Euro V et

VI).

Tableau 8. Bénéfices apportés en France en 2020 par le passage de la situation de référence à diverses stratégies de réduction des émissions, en milliards d'euros

Hypothèses considérées		Optimisation conjointe (D23)			MTFR
Pour la mortalité chronique	Pour la mortalité infantile	Cas A	Cas B	Cas C	
VOLY basse (médiane)	VSL basse (médiane)	4,5	5,9	6,5	7,8
VOLY haute (moyenne)	VSL haute (moyenne)	8,5	11,2	12,2	14,7
VSL basse (médiane)	VSL basse (médiane)	7,2	9,5	10,4	12,5
VSL haute (moyenne)	VSL haute (moyenne)	13,4	17,8	19,3	23,3

Comme pour l'Europe des 25, les scénarios optimisés d'ambitions moyenne et haute permettent de s'approcher fortement du scénario MTFR. Ces niveaux d'ambition permettent en effet d'obtenir entre 76 et 83 % des bénéfices du scénario MTFR.

4.4.3. Comparaison des coûts et bénéfices du scénario de référence

On peut comparer les bénéfices permis par la diminution des effets sanitaires entre 2000 et 2020 (entre 89 et 193 G€) et les coûts des réductions d'émission comprises dans ce scénario de référence, tels qu'ils sont calculés par RAINS. Ceux-ci s'élèvent à 66 G€/an. Les seuls bénéfices sanitaires permis par le passage de la situation en 2000 à la situation de référence en 2020 sont supérieurs aux coûts.

4.4.4. Comparaison entre les coûts et les bénéfices des scénarios D23

Dans le tableau suivant, nous comparons, pour l'Europe des 25 d'une part et pour la France d'autre part, les coûts et les bénéfices des scénarios MTFR et D23. Les bénéfices ne prennent en compte, comme précédemment, qu'une partie des effets sanitaires et nous ne considérons ici que les deux hypothèses extrêmes, au lieu des quatre présentées plus haut.

Tableau 9. Comparaison des coûts et des bénéfices des scénarios MTFR et D23 pour l'Europe des 25 et pour la France, en milliards d'euros

		MTFR	Scénarios D23		
			Cas A	Cas B	Cas C
UE25					
Coûts		37,9	4,1	8,8	13,0
Bénéfices	Hypothèse basse	52,8	34,1	42,1	46,1
	Hypothèse haute	172,0	111,0	137,3	150,4
France					
Coûts		7,5	0,7	1,7	2,1
Bénéfices	Hypothèse basse	7,8	4,5	5,9	6,5
	Hypothèse haute	23,3	13,4	17,8	19,3

D'après ces calculs d'AEA Technology, les bénéfices des différentes stratégies de réduction des émissions sont supérieurs à leurs coûts, même dans le cas du scénario MTFR. Et ce, malgré le fait que ces calculs ne prennent en compte que les effets sanitaires et seulement partiellement.

Si l'on considère le scénario avec ambition moyenne (cas B), le ratio bénéfiques / coûts est compris entre 4,8 et 15,6 pour l'Europe des 25 et entre 3,5 et 10,5 pour la France.²⁹

4.5. IMPACTS ÉCONOMIQUES ET SOCIAUX

Cette analyse coûts / bénéfiques étudie également les impacts des stratégies de réduction des émissions sur l'économie et l'emploi, par pays et par secteur d'activité, grâce au couplage avec un modèle macro-économique, GEM-E3. Cela devrait permettre en principe d'avoir une vision complémentaire intéressante. Mais les outils de modélisation actuels ne permettent pas de conduire de telles analyses avec un très bon niveau de précision.

Nous ne disposons pas encore des résultats de cette partie de l'étude, exception faite de quelques transparents qui donnent des résultats agrégés à l'échelle européenne (22 pays). Il est donc trop tôt pour en donner une analyse critique. Nous nous contentons donc ici de reporter les résultats tels qu'ils ont été présentés lors de la réunion du Steering group CAFE du 14 avril 2005.

Tableau 10. Impacts socio-économiques des différents scénarios D23

	Ambition basse	Ambition moyenne	Ambition élevée
PIB	- 0,04 %	- 0,08 %	- 0,12 %
Emploi	0,00 %	0,00 %	0,00 %
Consommation privée	- 0,06 %	- 0,13 %	- 0,20 %
Consommation d'énergie	- 0,12 %	- 0,24 %	- 0,34 %
Salaires réels	- 0,04 %	- 0,09 %	- 0,14 %
Indice des prix à la consommation	0,00 %	0,00 %	0,00 %
Exportations	0,00 %	0,01 %	0,02 %
Importations	0,14 %	0,10 %	0,15 %

D'après cette étude :

- « l'impact macroéconomique reste faible ;
- l'effet sur l'emploi est négligeable au niveau européen ;
- avec une politique réglementaire ('command and control'), ce sont les ménages qui supportent l'essentiel des efforts ;
- la compétitivité de l'économie européenne n'est pas réellement affectée car l'effet prix est faible ;
- les secteurs qui produisent les équipements de dépollution bénéficient de ces politiques. » [Présentation lors de la réunion du 14 avril 2005 du Steering group CAFE]

²⁹ Pour mémoire, lorsqu'AEA Technology et l'IIASA avaient conduit l'analyse coûts / bénéfiques de la directive Plafonds nationaux d'émission, en 1999, ils avaient estimé que le ratio bénéfiques / coûts était compris entre 2,2 (avec l'approche années de vie perdues) et 3,9 (avec l'approche valeur statistique de la vie humaine). Il faut bien noter que cette étude ne prenait en compte que les effets des polluants suivants : NOx, NH₃, SO₂, O₃. Les effets des particules, responsables de la plus grande partie des effets quantifiés dans le cadre de CAFE, étaient alors ignorés.

CONCLUSION

Pour préparer la définition de la stratégie thématique CAFE (Clean Air For Europe), l'IIASA a défini un certain nombre de stratégies de réduction des émissions atmosphériques à l'échelle européenne, à partir du modèle d'évaluation intégrée RAINS.

L'IIASA a d'abord estimé les émissions en 2000 puis en 2020, pour deux scénarios de base :

- un scénario de référence ('CLE' ou 'baseline 2020') qui correspond aux émissions telles qu'elles seraient si l'on se contentait de mettre en œuvre les mesures déjà décidées, sans mesure supplémentaire ;
- un scénario qui correspond à la mise en œuvre de toutes les techniques de dépollution envisageables ('MTFR' ou Maximum technically feasible reduction).

Dans toutes les stratégies de réduction calculées par l'IIASA, les émissions de chaque État membre en 2020 sont inférieures ou égales aux émissions dans le scénario de référence et sont supérieures ou égales à celles dans le scénario MTFR.

Ensuite l'IIASA a calculé, grâce au module d'optimisation du modèle RAINS, des stratégies optimisées de réduction des émissions. Elles sont optimisées dans le sens où, d'après le modèle RAINS, elles satisfont au moindre coût à certaines contraintes environnementales. De telles contraintes environnementales ont été fixées pour l'exposition de la santé humaine aux particules et à l'ozone et pour l'exposition des écosystèmes à l'acidification et à l'eutrophisation.

L'IIASA a calculé également les coûts de réduction des émissions dans ces différents scénarios. En parallèle AEA Technology a estimé les bénéfices des différentes stratégies de réduction des émissions envisagées.

L'IIASA a modifié assez profondément le modèle RAINS depuis les négociations préalables au protocole de Göteborg et à la directive NEC en 1998-2001. Certaines modifications sont dues à l'évolution des objectifs politiques : recul de l'horizon temporel (jusqu'en 2020), intégration de nouveaux polluants (les particules). D'autres sont dues à une volonté d'amélioration des performances du modèle (modification du module d'optimisation, définition de contraintes d'optimisation à l'échelle européenne et non plus systématiquement au niveau local, intégration de données provenant des travaux EGTEI). D'autres enfin sont rendues nécessaires par les progrès effectués dans la lutte contre la pollution atmosphérique : les émissions des polluants considérés ont beaucoup diminué depuis les premiers travaux de l'IIASA. Et comme les techniques de dépollution disponibles (ou au moins celles qui sont intégrées dans le modèle RAINS) n'ont pas beaucoup évolué, la marge de progression se réduit peu à peu, à un point tel que les méthodes d'optimisation utilisées jusqu'alors par l'IIASA (réduction de l'écart, ou 'gap closure', entre la situation actuelle, en 2000 à l'époque, et les objectifs de long terme) ne peuvent plus fonctionner.

L'IIASA cherche donc maintenant à réduire l'écart entre la situation dans le scénario de référence en 2020 (CLE) et la situation où toutes les techniques de dépollution envisageables sont mises en place (MTFR) . Le niveau d'ambition ne dépend donc plus de l'objectif environnemental de long terme mais des possibilités technico-économiques de réduction des émissions. L'IIASA prend

comme bornes de ses stratégies optimisées deux situations prévisionnelles pas très éloignées l'une de l'autre et soumises à des incertitudes considérables. La définition par l'IIASA des différentes stratégies de réduction des émissions est donc très majoritairement déterminée par celle des deux scénarios 'limites' (CLE et MTR), beaucoup plus que par le choix d'un des trois niveaux d'ambition envisagés.

Le modèle RAINS est en constante évolution. Cependant, parallèlement à des améliorations progressives, les objectifs qui lui sont fixés sont de plus en plus exigeants : le nombre d'effets et de polluants considérés augmente constamment et, surtout, la diminution significative des émissions depuis les années 1980 réduit fortement la marge de manœuvre entre les émissions dans le scénario de référence et le maximum atteignable techniquement. Cette réduction de la marge de manœuvre pousse le modèle dans ses dernières limites. Pour l'instant cela conduit à définir des stratégies sur des bases très incertaines. Pour demeurer pertinent lors de la définition de futures politiques de lutte contre la pollution atmosphérique, il semble indispensable que le modèle RAINS évolue significativement, notamment en prenant en compte des possibilités plus larges de réduction des émissions (technologies émergentes, mesures structurelles, etc.).

BIBLIOGRAPHIE

Page Internet de la Commission européenne consacrée au programme CAFE :
<http://europa.eu.int/comm/environment/air/cape/index.htm>.

Page Internet de l'IIASA consacrée au programme CAFE (les six "CAFE Scenario Analysis Reports" de l'IIASA peuvent y être téléchargés) :
<http://www.iiasa.ac.at/rains/cape.html>.

Page Internet de la Commission européenne consacrée à l'étude coûts bénéfices :
<http://europa.eu.int/comm/environment/air/cape/activities/cba.htm>.

Amann, M., Bertok, I., Cofala, J., Gyarmas, F., Heyes, C., Klimont, Z. et al. (2004a). Baseline Scenarios for the Clean Air for Europe (CAFE) Programme. IIASA, CAFE Scenario Analysis Report Nr. 1.

Amann, M., Cabala, R., Cofala, J., Heyes, C., Klimont, Z., Schöpp, W. (2004b). The "Current Legislation" and the "Maximum Technically Feasible Reduction" cases for the CAFE baseline emission projections. IIASA, CAFE Scenario Analysis Report Nr. 2.

Amann, M., Bertok, I., Cabala, R., Cofala, J., Heyes, C., Gyarmas, F. et al. (2005a). First Results from the RAINS Multi-Pollutant/Multi-Effect Optimization including Fine Particulate Matter (Version 2, January 12, 2005). IIASA, CAFE Scenario Analysis Report Nr. 3.

Amann, M., Bertok, I., Cabala, R., Cofala, J., Heyes, C., Gyarmas, F. et al. (2005b). Target Setting Approaches for Cost-effective Reductions of Population Exposure to Fine Particulate Matter in Europe (Extended Version for the CAFE Steering Group, February 13, 2005). IIASA, CAFE Scenario Analysis Report Nr. 4.

Amann, M., Bertok, I., Cabala, R., Cofala, J., Heyes, C., Gyarmas, F. et al. (2005c). Exploratory CAFE scenarios for further improvements of European air quality (Complete Version, March 16, 2005). IIASA, CAFE Scenario Analysis Report Nr. 5.

Amann, M., Bertok, I., Cabala, R., Cofala, J., Heyes, C., Gyarmas, F. et al. (2005d). A final set of scenarios for the Clean Air For Europe (CAFE) programme (June 2005). IIASA, CAFE Scenario Analysis Report Nr. 6.

Grennfelt, P., Woodfield, M., Terry, K., Fowler, D., Hov, O., Erisman, J.W. et al. (2004). Review of the RAINS Integrated Assessment Model - Final report. The Swedish Environmental Research Institute, Service contract for Review of the RAINS Integrated Assessment Model - Reference ENV.C1/SER/2003/0079.

Holland, M., Hunt, A., Hurley, F., Navrud, S., Watkiss, P. (2005). Service Contract for Carrying out Cost-Benefit Analysis of Air Quality Related Issues, in particular in the Clean Air for Europe (CAFE) Programme - Methodology for the Cost-Benefit analysis for CAFE. AEA Technology Environment, AEAT/ED51014/Methodology Paper Issue 4 (Volume 1: Overview of Methodology, Volume 2: Health Impact Assessment, Volume 3: Uncertainty : Methods and First Analysis).

Holland, M., Pye, S., Watkiss, P., Droste-Franke, B., Bickel, P. (2005). Damages per tonne emission of PM_{2.5}, NH₃, SO₂, NO_x and VOCs from each EU25 Member State (excluding Cyprus) and surrounding seas. AEA Technology Environment, AEAT/ED51014/CAFE CBA damage costs.

Krupnick, A., Ostro, B., Bull, K. (2004). Peer review of the methodology of cost-benefit analysis of the Clean Air For Europe Programme. Paper prepared for the

European Commission, Environment Directorate General.

Pye, S., Watkiss, P. (2005). CAFE CBA: Baseline Analysis 2000 to 2020. AEA Technology Environment, AEAT/ED51014/Baseline Scenarios.

Soleille, S., Brignon, J.M., Farret, R., Landrieu, G., Le Gall, A.C., Rouïl, L. (2003). L'IIASA et la modélisation intégrée de la pollution atmosphérique transfrontière - Bilan et évaluation. INERIS, Rapport DRC/MECO - 2003 - 45981/note_IIASA.

Soleille, S. (2004). The RAINS model, uncertainty and optimisation. INERIS, DRC/MECO – 2004 - 45981/rains_review_ineris.

Van Regemorter (2005). Macroeconomic Impact of Air Pollution Reduction: evaluation with the general equilibrium model GEM-E3. Présentation lors de la réunion du CAFE steering group du 14 avril 2005.

ANNEXE. EXEMPLE DE TABLEAU DE CALCUL DE RAINS

Nous présentons et commentons ici quelques lignes des tableaux de l'IASA présentant le scénario de référence en 2020 pour les émissions de NO₂ en France.

Pays	Secteur-Activité-Technologie-[Unité]	Activité sectorielle	Facteur d'émission sans technique de dépollution	Taux de réduction des émissions de la technique de réduction	Facteur d'émission avec technique de dépollution	Capacités dépolluées [= taux de pénétration de la technique de dépollution]	Émissions
		[Unités]	kt NO ₂ /unité	%	kt NO ₂ /unité	%	kt_NO2
		A	FÉi	Tr	FÉf = FÉi x (1-Tr)	Tp	É = A x Tp x FÉf
FRAN	PP_EX_OTH-BC1-PBCCM-[PJ]	1,14	0,25	65	0,088	50	0,05
FRAN	PP_EX_OTH-BC1-PBCCSC-[PJ]	1,14	0,25	80	0,05	50	0,029
FRAN	PP_EX_OTH-GAS-NOC-[PJ]	5,34	0,15	0	0,15	40	0,32
FRAN	PP_EX_OTH-GAS-POGCM-[PJ]	5,34	0,15	65	0,053	60	0,168

Le sigle de la deuxième colonne (PP_EX_OTH-BC1-PBCCM) se décompose en :

- secteur (PP),
- activité (EX_OTH-BC1 ou EX_OTH-GAS)
- et technique de dépollution mise en place (PBCCM, PBCCSC, NOC ou POGCM).

Il est suivi de l'unité ([PJ]) dans laquelle est mesuré le niveau d'activité pour cette activité.

Les significations des abréviations employées ici sont les suivantes :

PP : Centrales thermiques (Power Plant) et chauffage urbain	PBCCSC : SCR mise sur une centrale existante (Power plant Brown Coal Combustion modification + Scr)
EX : Installation existante	PBCCM : Modification de la combustion (Power plant Brown Coal Combustion Modification)
OTH : Autres catégories	NOC : Pas de dépollution (NO Control)
BC1 : Lignite (Brown Coal), qualité supérieure	POGCM : Modification de la combustion
GAS : Gaz naturel	