

RAPPORT D'ÉTUDE
N°- DRC-08-94425-14572A -

14/11/2008

**Le modèle d'analyse intégrée GAINS-Europe de
l'IIASA**

Le modèle d'analyse intégrée GAINS-Europe de l'IIASA

Verneuil-en-Halatte

Rapport intermédiaire

Novembre 2008

Client: MEEDDAT

Liste des personnes ayant participé à l'étude : Simone Schucht

PRÉAMBULE

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

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

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

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

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

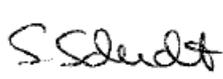
	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Simone SCHUCHT	Jean-Marc BRIGNON	Laurence ROUIL
Qualité	Ingénieur Economiste à l'unité Economie et décision pour l'environnement	Responsable de l'unité Economie et décision pour l'environnement	Chef du pôle Modélisation environnementale et décision
Visa			

TABLE DES MATIÈRES

RESUME	7
GLOSSAIRE	11
1. INTRODUCTION	13
2. LE MODELE GAINS-EUROPE	15
2.1 STRUCTURE GENERALE	16
2.2 MODULE EMISSIONS - COUTS (EMCO)	17
2.2.1 Emissions	17
2.2.2 Coûts	18
2.3 MODULE TRANSFERTS ET DEPOT (DEP)	19
2.3.1 Dispersion	19
2.3.2 Impact environnemental et sanitaire	19
2.4 MODULE OPTIMISATION (OPT)	20
2.4.1 Fonctionnement	20
2.4.2 Variables d'entrée	21
2.4.3 Variables de décision	21
2.4.4 Objectifs et contraintes	22
2.4.5 Données de sortie	27
2.5 DIFFERENTS MODES DE FONCTIONNEMENT	30
2.5.1 Mode « scénario de référence »	30
2.5.2 Mode « stratégie de réduction des émissions »	30
2.5.3 Mode « optimisation »	31
3. AVANTAGES DE L'APPROCHE GAINS PAR RAPPORT A L'ANCIEN MODELE RAINS	35
3.1 PRISE EN COMPTE DES GAZ A EFFET DE SERRE	35
3.2 PRISE EN COMPTE DE MESURES AUTRES QUE 'END-OF-PIPE'	35
3.3 REPRESENTATION EXPLICITE DE TECHNOLOGIES	36
4. LIMITES DU MODELE, EVOLUTIONS EN COURS ET POINTS A CLARIFIER	38
4.1 LIMITES DU MODELE GAINS ET MODELES COMPLEMENTAIRES	38
4.2 EVOLUTIONS EN COURS OU PREVUES	41
4.3 POINTS A CLARIFIER AVEC L'IIASA	41
4.3.1 Questions par rapport à certains éléments de la fonction d'objectifs	41
4.3.2 Questions par rapport à la modélisation des contraintes	42
4.3.3 Questions diverses	42
RÉFÉRENCES	44

TABLE DES ILLUSTRATIONS

FIGURE 1 : L'APPROCHE MULTI-POLLUANTS MULTI-EFFETS DU MODELE GAINS (SOURCE : IIASA)	14
FIGURE 2 : POURCENTAGE DES ECOSYSTEMES AVEC DES DEPOTS EN AZOTE EN EXCES DES CHARGES CRITIQUES POUR L'EUTROPHISATION EN 2000 (A GAUCHE) ET POUR LE SCENARIO OPTIMISE EN 2020 (A DROITE) (SOURCE : AMANN ET AL, 2008A).....	28
FIGURE 3 : REDUCTION D'ESPERANCE DE VIE (EN NOMBRE DE MOIS) DUE AUX PARTICULES FINES EN 2000 (A GAUCHE) ET POUR LE SCENARIO OPTIMISE EN 2020 (A DROITE) (SOURCE : AMANN ET AL, 2008A)	29
FIGURE 4 : FONCTIONNEMENT DU MODELE EN MODE SCENARIO 1 : SCENARIO DE REFERENCE	30
FIGURE 5 : FONCTIONNEMENT DU MODELE EN MODE SCENARIO 2 : STRATEGIE DE REDUCTION DES EMISSIONS	31
FIGURE 6 : FONCTIONNEMENT DU MODELE EN MODE D'OPTIMISATION 1 : GAINS EN MODE RAINS	32
FIGURE 7 : FONCTIONNEMENT DU MODELE EN MODE D'OPTIMISATION 2 : GAINS EN MODE GAINS	33
FIGURE 8 : IMPACT DES MESURES DU TYPE « CHANGEMENTS STRUCTURELS » SUR LA COURBE DE COUTS POUR LES PM _{2,5} (SOURCE : IIASA, GRAPHIQUE PUBLIE DANS LA REVUE DE GAINS PHASE I (AGREN ET AL, 2007)).....	33
FIGURE 9 : LA CHAINE DES MODELES PARTICIPANT AU PROJET EC4MACS (SOURCE : IIASA).....	40

RESUME

Le modèle GAINS (Greenhouse gases – Air pollution INteractions and Synergies) est un modèle d'évaluation intégrée multi-polluants multi-effets. Il étudie des stratégies coût-efficaces de réduction de la pollution atmosphérique transfrontière et de gaz à effet de serre en Europe, ainsi que les interactions entre les deux problématiques. GAINS est une extension de l'ancien modèle RAINS (Regional Air Pollution INformation and Simulation) qui était limité à l'analyse des stratégies de réduction de la pollution atmosphérique transfrontière.

Le modèle prend en compte les émissions de cinq polluants atmosphériques et des 6 gaz du Protocole de Kyoto. Il s'intéresse également aux effets environnementaux de polluants atmosphériques sur l'acidification et l'eutrophisation ainsi qu'aux effets de l'ozone troposphérique et des particules sur la santé. Il calcule les coûts et les effets de stratégies de réduction d'émissions.

Contrairement à l'ancien modèle RAINS, dans GAINS les réductions d'émissions sont obtenues non seulement par des changements concernant les techniques de réduction de la pollution, mais également par des changements dits « structurels ». Actuellement seuls des changements structurels dans le domaine de l'énergie sont modélisés. Ainsi, GAINS prend en compte des mesures contribuant à une augmentation de l'efficacité de conversion en énergie de combustibles et des mesures contribuant à une réduction de la demande finale. Des changements de répartition entre différents combustibles peuvent également contribuer à la réduction des émissions.

La prise en compte dans GAINS des interactions, physico-chimiques entre polluants atmosphériques (PA) et gaz à effet de serre (GES) d'une part, technico-économiques entre mesures de réduction des différents gaz d'autre part, permet aux modélisateurs de l'IIASA d'étudier les effets synergiques et antagonistes des mesures de réduction des émissions. Elle permet ainsi de développer des stratégies intégrées de réduction de pollution atmosphérique et des gaz à effet de serre, qui, d'un point de vue de leurs effets ou des coûts associés sont plus efficaces que des stratégies visant les deux problèmes de pollution séparément.

Avec la prise en compte des GES, le nombre de mesures de réduction de la pollution a significativement augmenté. Ceci accroît le potentiel maximal de réduction des émissions. De plus, la prise en compte d'options du type « changement structurel » permet d'aller plus loin dans la réduction des émissions tout en permettant souvent d'en réduire le coût.

Contrairement à RAINS, GAINS utilise une représentation explicite des techniques de réduction de la pollution. Ceci permet de présenter de façon plus adéquate des technologies qui ont un effet sur plusieurs polluants (« technologies multi polluants »). Chaque technique est caractérisée par son coût et son impact sur un ou plusieurs polluants. Les technologies multi polluants sont donc évaluées sur la base de leur capacité à réduire plusieurs polluants de façon simultanée. Premièrement, cela évite une allocation arbitraire de coûts de réduction des émissions sur les polluants concernés. En effet, dans le modèle RAINS, l'optimisation utilisait des courbes de coûts mono polluant. Dans le cas de techniques ayant un effet sur plusieurs polluants, l'ancienne approche nécessitait

d'attribuer de façon arbitraire les coûts de ces techniques à un seul polluant. Deuxièmement, tandis que de telles technologies ne sont parfois pas coût-efficaces dans une approche mono polluant, elles peuvent l'être dans une approche multi polluants. Ce dernier aspect est également vrai pour les mesures du type « changement structurel ». Les courbes de coûts par polluant qui étaient utilisées dans RAINS ne sont plus automatiquement créées dans le modèle GAINS et ne sont plus utilisées dans l'optimisation. Toutefois, elles peuvent être créées de façon *ex post*.

Les types de coûts considérés dans le modèle sont les coûts d'investissement ainsi que les coûts de fonctionnement et de maintenance fixes et variables. Cela ne concerne pas uniquement les technologies de réduction d'émissions. Les coûts de mesures du type « changement structurel » sont également pris en compte. Il s'agit par exemple des coûts additionnels d'une substitution d'un combustible par un autre, des coûts pour réduire la demande d'énergie ou encore des coûts pour augmenter l'efficacité de la conversion en énergie de combustibles.

Le modèle GAINS peut être utilisé selon deux modes : un « mode scénario » et un « mode optimisation ». Dans le « mode scénario » le modèle, à partir de scénarios d'activité, fait des projections d'émissions de PA et de GES, et détermine l'impact de la pollution atmosphérique sur la santé et les écosystèmes. Il peut également estimer les coûts de politiques de réduction des émissions de polluants atmosphériques et de GES. Dans le « mode optimisation » le modèle détermine, à partir d'objectifs environnementaux, quelle est la façon de répartir les réductions des émissions entre pays pour atteindre les objectifs au moindre coût. Il semblerait que ce mode permette également la simulation d'instruments économiques, comme des prix de carbone exogènes ou des taxes environnementales.

La fonction d'objectifs qui est minimisée lors de l'optimisation comprend trois composantes : 1) les coûts pour les techniques de traitement des rejets, 2) les coûts des substitutions d'activités, ainsi que 3) un terme qui prend en compte les coûts liés à un prix de carbone exogène. Plusieurs types de contraintes sont utilisés dans l'optimisation : des contraintes assurant la cohérence du modèle et des contraintes dont les valeurs numériques reflètent des données se trouvant dans la base de données GAINS (e.g. taux maximaux d'application, contraintes de ressources), ces deux types de contraintes ayant appliqués par défaut, ainsi que des contraintes environnementales (objectifs de réduction des dépassements de charges critiques pour l'acidification et l'eutrophisation, objectifs de réduction de l'exposition humaine à la pollution atmosphérique) qui dépendent des applications politiques spécifiques du modèle.

Les résultats fournis par le modèle sont les réductions d'émissions, les coûts totaux de réduction de la pollution ainsi que les coûts marginaux et les coûts par unité de réduction des émissions par pays, région ou secteur, et les expositions (à l'ozone et aux particules, acidification et eutrophisation) dans chaque cellule de la grille EMEP. Les indicateurs des effets environnementaux et sanitaires sont les suivants : dépôts de composés de soufre et d'azote ainsi que dépôts en excès des charges critiques pour l'acidification et l'eutrophisation ; concentrations de particules fines et d'ozone et réduction d'espérance de vie due aux particules et à l'ozone.

Le modèle GAINS présente un certain nombre de limites.

Le module d'optimisation, s'il présente l'intérêt de « prouver » que les stratégies proposées sont économiquement efficaces et donc acceptables par les acteurs industriels et politiques, n'en demeure pas moins parfois d'un fonctionnement encore moyennement transparent.

GAINS ne modélise pas le système climatique dans sa version actuelle. Il se focalise sur l'analyse d'effets synergiques entre le contrôle des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre. GAINS n'est pas non plus un modèle énergétique spécialisé. Pour analyser des mesures du type « changement structurel » il est donc nécessaire de faire d'interagir GAINS avec des modèles énergétiques spécialisés. Les potentiels de mesures du type « changement structurel » sont identifiés sur la base de scénarios énergétiques 'extrêmes' fournis par de modèles spécialisés, comme le modèle PRIMES de l'Université Technique d'Athènes. Pour la modélisation de changements structurels le modèle utilise en fait des représentations « résumées » des modèles spécialisés. L'interaction entre différents modèles peut conduire à des incohérences lorsqu'ils utilisent différentes données, agrégations ou concepts de coûts. Une transparence concernant les mesures prises en compte dans les différents modèles est également nécessaires pour éviter des double comptages ou sur- ou sous-estimations de potentiels de réduction des émissions.

GAINS ne modélise pas de mesures qui puissent être regroupées sous le terme de « changements de comportement », entre autre car le concept de coût s'appliquant aux choix de consommateurs n'est pas directement compatible avec le concept de coût appliqué dans GAINS. L'IIASA affirme en revanche tenir compte de changements de comportement à travers des scénarios exogènes alternatifs. Enfin, le modèle n'évalue pas non plus les effets macro-économiques des stratégies de réduction des émissions modélisées.

Concernant les évolutions en cours, L'IIASA semble envisager la prise en compte de mesures du type « changement structurel » non seulement pour l'énergie mais également dans le secteur de l'agriculture. Il semble également envisagé d'élargir l'analyse d'options de réduction d'émissions de GES dans GAINS à d'autres secteurs, activités et mesures de dépollution que ceux pris en compte dans la version 1.0 du modèle. De plus, des travaux pour augmenter la cohérence entre les différents modèles utilisés pour des applications politiques dans le cadre de l'Union européenne et de la Convention de Genève sont en cours (projet EC4MACS). Ceci concerne, entre autre, les interactions entre GAINS et le modèle énergétique PRIMES.

GLOSSAIRE

AOT40 :	Accumulated concentration of ozone over a threshold of 40 ppb
CAFE :	Clean Air For Europe
CCE :	Coordination Center for Effects
CE :	Commission européenne
CH ₄ :	Méthane
CHP :	Production combinée électricité-chaleur
CLRTAP :	Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution
CO ₂ :	Dioxyde de carbone
COV(NM) :	Composés organiques volatils (non méthaniques)
EC4MACS :	European Consortium for Modelling of Air Pollution and Climate Strategies (EU-Life project)
EMEP :	Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-Range Transmission of Air pollutants in Europe
GAINS :	Greenhouse gases – Air pollution INteractions and Synergies
GES :	Gaz à effet de serre
GHG :	Greenhouse gases
HFC :	Hydrocarbure fluoré
IIASA :	International Institute for Applied Systems Analysis
IGCC :	Centrales (électriques) à cycle combiné à gazéification intégrée
IPCC :	Intergovernmental Panel on Climate Change
MRR :	Maximum Reductions in the RAINS model
N ₂ O :	Protoxyde d'azote
NEC :	National emission ceilings
NH ₃ :	Ammoniac
NO _x :	Oxydes d'azote
OMS :	Organisation mondiale de la santé
PA :	Pollution atmosphérique
PM :	Particules
PFC :	Hydrocarbure perfluoré
Ppb :	Parties par milliard
RAINS :	Regional Air Pollution Information and Simulation
SCR :	Selective catalytic reduction

SF₆ : Hexafluorure de soufre
SO₂ : Dioxyde de soufre
SOMO35 : Sum of means over 35 ppb (pour l'ozone)
TSAP Thematic Strategy on Air Pollution
TSP : Total Suspended Particulate
UE : Union européenne
UN ECE : United Nations Economic Commission for Europe
UN FCCC : United Nations Framework Convention on Climate Change
YOLL : Years of life lost

1. INTRODUCTION

Le modèle GAINS (**G**reenhouse gases – **A**ir pollution **I**nteractions and **S**ynergies) est un modèle d'évaluation intégrée multi-polluants multi-effets qui s'intéresse aux questions de transport à longue distance de la pollution atmosphérique en Europe (de l'Atlantique à l'Oural), au changement climatique ainsi qu'aux possibles synergies entre les politiques visant ces deux problèmes de pollution. Il constitue une extension du modèle RAINS (**R**egional **A**ir Pollution **I**nformation and **S**imulation) qui était limité à l'analyse de la pollution atmosphérique transfrontière.

Du côté de la pollution atmosphérique (PA), GAINS-Europe couvre les émissions d'oxydes d'azote (NO_x), de dioxyde de soufre (SO₂), de composés organiques volatils non méthaniques (COV), d'ammoniac (NH₃) et des particules (PM). Les émissions des PM dans GAINS sont calculées pour trois catégories : PM_{2,5}, PM_{10-PM_{2,5}}, et PM_{> 10µm}. Leur somme représente les particules totales (PM_{TSP}). Le modèle online¹ produit des résultats pour les PM_{2,5}, PM₁₀ et PM_{TSP}. Le modèle s'intéresse également aux effets environnementaux des polluants atmosphériques en termes d'acidification, d'eutrophisation et aux effets sanitaires de la formation d'ozone troposphérique et des particules. Du côté du changement climatique, GAINS prend en compte les émissions des six gaz à effet de serre qui font partie du Protocole de Kyoto : dioxyde de carbone (CO₂), méthane (CH₄), protoxyde d'azote (N₂O), hydrocarbures fluorés (HFC), hydrocarbures perfluorés (PFC) et hexafluorure de soufre (SF₆).

Le modèle analyse des interactions physiques entre les différents gaz pris en compte, prend en considération les synergies et effets antagonistes entre les différentes mesures de réduction des émissions et analyse leurs effets sur la santé et les écosystèmes comme décrit dans le Graphique 1.

Développé par l'IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis), organisation non gouvernementale de recherche située à Laxenburg (Autriche), le modèle RAINS avait été mis en œuvre plusieurs fois depuis le début des années 1990 pour fournir les bases de la négociation sur la diminution des émissions nationales de polluants atmosphériques dans le cadre de la Convention de Genève² et de l'Union européenne (UE). Plus récemment le modèle GAINS a également été utilisé pour fournir les bases de la négociation sur la diminution des émissions nationales de gaz à effet de serre dans le cadre de l'UE. Actuellement, GAINS est utilisé pour la révision de la Directive sur les plafonds nationaux d'émissions (dite « Directive NEC »)³ de l'UE.

¹ <http://www.iiasa.ac.at/rains/gains-online.html?sb=9>

² Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance (CLRTAP) de 1979, <http://www.unece.org/env/lrtap/>.

³ Directive 2001/81/CE du 23 octobre 2001.

	PM	SO ₂	NO _x	VOC	NH ₃	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	PFCs HFCs SF ₆
Health impacts: PM	√	√	√	√	√				
O ₃			√	√			√		
Vegetation damage: O ₃			√	√			√		
Acidification		√	√		√				
Eutrophication			√		√				
Radiative forcing: - direct						√	√	√	√
- via aerosols	√	√	√	√	√				
- via OH			√	√			√		

Figure 1 : L'approche multi-polluants multi-effets du modèle GAINS (Source : IIASA)⁴

Ce rapport décrit, de façon synthétique, la structure et le fonctionnement du modèle GAINS-Europe. Des modèles GAINS ont été développés ou sont en cours de développement également pour d'autres continents, par exemple GAINS-Asie (pour l'Inde et la Chine). Des modèles GAINS nationaux existent également. Ce rapport décrit uniquement le modèle GAINS-Europe.

Certaines fonctionnalités du modèle dépendent des applications politiques pour lesquelles il est utilisé. Dans le cadre de la révision de la Directive NEC, par exemple, les fonctionnalités du modèle sont limitées afin de reproduire les résultats de l'ancien modèle RAINS. Tout au long de ce rapport il est spécifié quelles fonctionnalités s'appliquent à chaque type d'exercice de modélisation.

Le chapitre 2 du rapport présente la structure générale de GAINS-Europe, ses différents modules et modes de fonctionnement. Il discute également les variables d'entrée, de décision et de sortie ainsi que la fonction d'objectifs et les contraintes utilisées dans l'optimisation. Le chapitre 3 décrit certains avantages du modèle GAINS par rapport à l'approche de l'ancien modèle RAINS. Les limites du modèle, les évolutions en cours ainsi que certains points à clarifier avec l'IIASA sont présentés dans le chapitre 4.

⁴ Cf. <http://www.iiasa.ac.at/rains/gains-presentations.html?sb=12>, présentation de l'IIASA lors de la 'Conference on Air Pollution and Greenhouse Gas Emission Projections for 2020', à Bruxelles, le 29 septembre 2006.

2. LE MODELE GAINS-EUROPE

Ce chapitre est destiné à donner un aperçu bref et synthétique du modèle GAINS (GHG - Air Pollution INteractions and Synergies) et de son fonctionnement. Sont présentés la structure du modèle, ses trois modules (émissions et coûts, transferts et dépôts, optimisation) et ses différents modes d'utilisation (modes scénario et mode optimisation). Dans ce chapitre, seuls les aspects du modèle pour lesquels l'IIASA a publié des rapports sont abordés. Le modèle est décrit sur la base de rapports méthodologiques disponibles en juillet 2008 et qui concernent la version 1.0 du modèle.

Ce moment correspond au développement de la proposition par la Commission européenne (CE) de la Directive NEC révisée⁵, de la révision du Protocole de Göteborg⁶ et de la décision du Parlement européen et du Conseil sur l'effort à fournir par les États membres pour réduire leurs émissions de gaz à effet de serre⁷.

Ce rapport se base en partie sur un ancien rapport de l'INERIS qui portait sur RAINS : « L'IIASA et la modélisation intégrée de la pollution atmosphérique transfrontière – Bilan et évaluation » (Soleille et al, 2003). Les parties reprises de ce rapport ont été actualisées sur la base de nombreux rapports méthodologiques publiés par l'IIASA, prenant ainsi en compte les modifications qui s'appliquent suite à la prise en compte dans le modèle des gaz à effet de serre.

En ce qui concerne la pollution atmosphérique, et dans une moindre mesure les GES, GAINS utilise en grande partie les données, les modes de calcul et les fonctionnalités de l'ancien modèle RAINS. Toutefois, certaines innovations par rapport à RAINS dans les fonctions de calcul ont été nécessaires pour la prise en compte des GES. Certaines s'appliquent uniquement lorsque les possibilités de réduction des GES et les interactions entre stratégies visant la PA et les GES sont analysées. Un exemple d'innovation est l'utilisation d'une représentation explicite des techniques de réduction de pollution au lieu de l'ancienne approche par courbes de coûts par polluant.

Des évolutions, notamment de la partie du modèle s'intéressant aux GES, sont en cours. Des améliorations méthodologiques ainsi qu'une revue des données d'entrée sont également prévues dans le cadre du projet EC4MACS (European Consortium for Modelling of Air Pollution and Climate Strategies)⁸, qui est financé par le programme LIFE de l'UE. Ce projet rassemble un consortium d'institutions pour créer un réseau de modèles permettant une analyse intégrée complète de

⁵ Révision de la Directive 2001/81/CE du 23 octobre 2001 fixant pour 2010 des plafonds d'émission nationaux pour quatre polluants atmosphériques : les oxydes d'azote (NOx), le dioxyde de soufre (SO₂), les composés organiques volatils non méthaniques (COV) et l'ammoniac (NH₃), dite directive NEC (pour National emission ceilings). Cette révision prend également en compte les particules (PM).

⁶ Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone de 1999, http://www.unece.org/env/lrtap/multi_h1.htm.

⁷ COM(2008) 17 final, Décision du parlement européen et du Conseil relative à l'effort à fournir par les États membres pour réduire leurs émissions de gaz à effet de serre afin de respecter les engagements de la Communauté en matière de réduction de ces émissions jusqu'en 2020

⁸ <http://www.ec4macs.eu/home/index.html>

l'efficacité de politiques visant les polluants atmosphériques et les GES. Mais les rapports méthodologiques sur les modèles faisant partie de ce projet, dont GAINS, ne seront pas disponibles avant novembre.

2.1 STRUCTURE GENERALE

Le modèle GAINS décrit les sources d'émissions de certains polluants atmosphériques, le transport de ces polluants, leur dispersion et certains de leurs effets sur la santé et les écosystèmes. Les polluants considérés sont le dioxyde de soufre (SO₂), les oxydes d'azote (NO_x), l'ammoniac (NH₃), les composés organiques volatils non méthaniques (COV) et les particules (PM). Les émissions des PM dans GAINS sont calculées pour trois catégories : PM_{2,5}, PM_{10-PM_{2,5}}, et PM_{> 10µm}. Leur somme représente les particules totales (PM_{TSP}). Le modèle online produit des résultats pour les PM_{2,5}, PM₁₀ et PM_{TSP}. Concernant la PA, GAINS étudie les impacts de l'ozone troposphérique et des particules sur la santé humaine ainsi que les impacts sur les écosystèmes des dépôts acidifiants et eutrophisants.. Le modèle décrit également les sources d'émissions des 6 gaz de Kyoto : dioxyde de carbone (CO₂), méthane (CH₄), protoxyde d'azote (N₂O), hydrocarbure fluoré (HFC), hydrocarbure perfluoré (PFC), et hexafluorure de soufre (SF₆). Pour les deux, polluants atmosphériques et gaz à effet de serre, GAINS modélise des mesures de réduction d'émissions : leurs potentiels de réduction d'émissions, leurs coûts ainsi que leurs potentiels d'application. L'intégration des deux domaines, pollution atmosphérique et changement climatique, dans un seul modèle permet d'analyser les interactions entre le contrôle des GES et de la PA, c'est à dire d'explorer des éventuels effets synergiques et antagonistes.

GAINS-Europe couvre 42 régions terrestres en Europe, dont 38 pays et 4 régions dans la partie européenne de la Russie. De plus, 5 régions maritimes sont prises en compte. L'Europe est divisée selon une grille régulière de cellules de 50 km sur 50 km (grille EMEP⁹). La période prise en compte dans les simulations s'étend en général de 1990 à 2020.

Ce modèle comprend trois modules :

- le module émissions-coûts (EMCO) ;
- le module transferts-dépôt (DEP) ;
- le module d'optimisation (OPT).

Le modèle GAINS peut être utilisé selon deux modes :

- Le mode « scénario ». À partir de scénarios d'activité, le modèle fait des projections d'émissions et détermine l'impact de la pollution atmosphérique sur la santé et les écosystèmes. Il peut également estimer les coûts de politiques de réduction des émissions de polluants atmosphériques et de GES.

⁹ Modèle de dispersion et de dépôt atmosphérique international, <http://www.emep.int/>. EMEP signifie « Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-Range Transmission of Air pollutants in Europe ».

- Le mode « optimisation ». À partir d'objectifs environnementaux, le modèle détermine quelle est la façon de répartir les réductions des émissions entre pays pour atteindre les objectifs au moindre coût. Il semblerait que ce mode permette également la simulation d'instruments économiques, comme des prix de carbone exogènes ou des taxes environnementales (cf. également la partie 4.3 sur certains points à clarifier avec l'IIASA).

2.2 MODULE EMISSIONS - COUTS (EMCO)

2.2.1 Emissions

Ce module évalue les émissions actuelles et réalise des projections d'émissions pour les polluants suivants : SO₂, NO_x, NH₃, COVNM, PM (PM_{2,5}, PM₁₀ et PM_{TSP} dans le modèle online), CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC et SF₆. Pour cela il utilise les données suivantes :

- Scénarios d'activité (principalement des scénarios énergétiques et agricoles, le transport étant inclus dans le scénario énergétique).
- Facteurs d'émission dérivés de la méthodologie de CORINAIR pour la PA, et pour les GES notamment des valeurs de référence du 'Intergovernmental Panel on Climate Change' (IPCC) ou des valeurs rapportées à la 'United Nations Framework Convention on Climate Change' (UNFCCC) par des parties.

Dans l'ancien modèle RAINS les scénarios d'activité (énergie, transport, agriculture principalement) étaient des données exogènes qui ne changeaient pas sous l'effet des contraintes imposées aux émissions. Dans GAINS, les scénarios d'activité sont des données exogènes ou endogènes en fonction du mode d'utilisation du modèle. Dans le mode « optimisation » le scénario énergétique peut en partie devenir endogène (cf. partie 2.5).

Ces scénarios d'activité proviennent soit de modèles européens, soit de communications, par les pays, de leurs propres scénarios nationaux. Pour la partie énergie les scénarios européens sont les scénarios énergétiques de la DG TREN, établis avec le modèle PRIMES de l'Université Technique d'Athènes. Ils fournissent également les données d'activité dans le secteur des sources mobiles. Pour l'agriculture c'est le modèle CAPRI, développé par l'Université de Bonn, qui fournit les scénarios européens. Il dépend des applications politiques lequel des deux types de scénario, européens ou nationaux, est utilisé, parfois les deux sont utilisés du moins pour des analyses de sensibilité.

Contrairement à l'ancien modèle RAINS, dans GAINS les réductions d'émissions sont obtenues non seulement par application de techniques de réduction de la pollution, mais également par des changements dits « structurels ». Actuellement, seuls des changements structurels dans le domaine de l'énergie sont modélisés. Il est également prévu de prendre en compte des changements structurels dans le secteur de l'agriculture. Pour l'énergie, GAINS prend en compte des mesures contribuant à une augmentation de l'efficacité de conversion de combustibles (moins d'énergie primaire est nécessaire pour satisfaire un niveau donné de la demande finale) et des mesures contribuant à une réduction de la demande finale (par exemple isolation de bâtiments). Un changement de répartition dans l'usage de différents combustibles peut également contribuer à la réduction d'émissions

(par exemple substitution d'une partie des combustibles fossiles par des énergies renouvelables). Si GAINS prend donc en compte certains « changements structurels », les changements de comportement sont par contre toujours exclus du modèle (par exemple le transfert modal des véhicules particuliers vers les transports en commun).

2.2.2 Coûts

Ce module évalue également les coûts de réduction des émissions. Les types de coûts considérés sont les coûts d'investissement ainsi que les coûts de fonctionnement et de maintenance fixes et variables.

L'ancien modèle RAINS construisait, à partir de données sur les techniques de réduction des émissions dans chaque pays et sur leurs coûts, des courbes de coût pour les différents polluants et les différents pays. Ces courbes pouvaient varier significativement en fonction des pays, à cause de l'impact de facteurs nationaux, tels que la structure de l'utilisation des énergies ou les infrastructures techniques. Cette approche n'est plus utilisée.

GAINS utilise une représentation explicite des techniques de réduction de la pollution. Ceci permet de présenter de façon plus adéquate des techniques qui ont un effet sur plusieurs polluants (dénommées « technologies multi polluants » ci-après). Chaque technique est caractérisée par son coût et son impact sur un ou plusieurs polluants. Des courbes de coûts mono polluant ne sont donc plus automatiquement créées par le modèle et ne sont plus utilisées dans l'optimisation. Dans RAINS, les variables de décision dans l'optimisation des coûts étaient des segments des courbes de coûts mono polluants basés sur une projection énergétique donnée. Dans GAINS, les variables de décision sont les niveaux d'activité de mesures de réduction des émissions individuelles (mesures techniques et structurelles).

Dans le cas de techniques ayant un effet sur plusieurs polluants, l'ancienne approche basée sur des courbes de coûts mono polluant nécessitait d'attribuer, de façon arbitraire, les coûts de technologies multi polluants à un seul polluant. Ceci ne posait pas un problème majeur, car concernant la pollution atmosphérique, la plupart des mesures de réduction d'émissions prises en compte dans RAINS étaient des mesures mono polluant. Les rares exceptions, comme les mesures décrites par les normes EURO dans le secteur du transport, étaient analysées de façon séparée dans des scénarios. Avec la prise en compte des GES, le nombre de mesures ayant un effet sur plusieurs polluants augmente de façon significative. Ceci est vrai aussi bien pour les technologies de dépollution que pour les mesures du type changement structurel.

Il est toutefois possible de créer, *ex post*, des courbes de coûts par polluant. Et à la demande des pays, ces courbes sont produites dans le modèle GAINS-online.

Comme cela a été indiqué plus haut, à part des techniques de réduction de rejets, GAINS prend également en compte les effets de « changements structurels », c'est à dire les coûts additionnels d'une substitution d'un combustible par un autre, les coûts pour réduire la demande d'énergie et les coûts pour augmenter l'efficacité de la conversion de combustibles.

2.3 MODULE TRANSFERTS ET DEPOT (DEP)

Le module d'évaluation des dépôts et des charges critiques (DEP) ne concerne que la pollution atmosphérique.

2.3.1 Dispersion

La principale fonction de ce module est de calculer, à partir des émissions de polluants fournies par le module EMCO, les dépôts acides, les dépôts eutrophisants, la concentration d'ozone et des particules dans les cellules de la grille EMEP (grille de 50 km x 50 km sur laquelle sont calculés précisément les concentrations et dépôts de polluants dans les scénarios de référence par le modèle EMEP). Pour l'acidification et l'eutrophisation le module DEP compare ces dépôts avec les cartes de sensibilité environnementale (les cartes de charges critiques). Pour l'ozone et les particules (PM₁₀ et PM_{2,5}) les indicateurs relatifs à leur impact sanitaire sont calculés (cf. partie 2.3.2). Les coefficients de transfert, sous forme de matrices (pays-vers-cellule), proviennent du modèle chimie-transport EMEP¹⁰. EMEP calcule des matrices de transfert pour un ensemble d'années afin de prendre en compte la variabilité météorologique.

2.3.2 Impact environnemental et sanitaire

Dans le domaine de la pollution atmosphérique GAINS considère les indicateurs suivants pour estimer quatre impacts environnementaux et sanitaires :

- Les dépôts de composés acidifiants et eutrophisants sont exprimés en taux de dépôt annuel. Le modèle GAINS prend en compte les sensibilités des écosystèmes aux dépôts acides et eutrophisants grâce au concept de charges critiques, qui représentent les niveaux de dépôts à long terme maximaux qui peuvent être tolérés par les écosystèmes sans dommage. Le modèle utilise les bases de données sur les charges critiques compilées par le CCE (Coordination Centre for Effects) de la Commission Economique pour l'Europe des Nations Unies (UNECE). L'indicateur est le dépôt moyen accumulé en excès des charges critiques.
- Actuellement les impacts de l'ozone sur la santé sont exprimés en termes de SOMO35, défini comme somme sur l'année des moyennes journalières maximales sur 8 heures supérieures à 35 ppb (calcul de l'ozone en excès par rapport à la valeur guide de l'Organisation Mondiale de la Santé de 35 ppb). Dans certaines simulations destinées à aider des prises de décision politiques, l'IIASA calcule également le nombre de cas de morts prématurés par an dus à l'ozone (e.g. Amann et al, 2008). Les impacts de l'ozone sur la morbidité ne sont pas quantifiés par GAINS, mais uniquement *ex post* dans des études d'analyse des bénéfices¹¹.
- Pour les impacts des particules fines sur la santé GAINS quantifie la mortalité prématurée attribuable aux expositions de long terme aux PM_{2,5}. L'impact des

¹⁰ Deux codes de transport EMEP ont été développés, l'un lagrangien et l'autre eulérien. Les protocoles précédents ont été établis sur la base des calculs lagrangiens. Les simulations actuelles devraient être réalisées à partir du modèle eulérien, censé être plus précis.

¹¹ Cf. par exemple AEA (2008).

autres particules est négligé. De plus, seuls les particules fines provenant de sources primaires et les aérosols inorganiques secondaires sont pris en compte dans le modèle. Les particules d'origine naturelle et les aérosols organiques et secondaires ne sont pas pris en compte. On utilise comme indicateur les « années de vie perdues » (YOLL – Years of life lost). Parfois, les effets de l'exposition aux particules fines sont également exprimés en termes de réduction de l'espérance de vie (cf. par exemple Amann et al, 2008).

Concernant les impacts sur la végétation de l'ozone, les informations disponibles ne sont pas claires. Dans le passé (dans RAINS) cet effet était exprimé en termes d'AOT40 (concentrations horaires d'ozone au-dessus d'un seuil de 40 ppb accumulées sur une période de végétation). Cet indicateur ayant été critiqué, et la quantification de seuils critiques pour l'indicateur alternatif basé sur le concept de flux d'ozone n'étant pas terminée, IIASA indique que l'indicateur SOMO35, utilisé pour quantifier les impacts de l'ozone sur la santé, serait considéré comme plus adapté pour évaluer les impacts sur la végétation que les indicateurs alternatifs disponibles (e.g. Amann et al, 2007a). Dans ce rapport, l'IIASA indique également que les impacts de l'ozone sur la végétation seraient quantifiés *ex post* dans l'analyse des bénéfices. Toutefois, dans son plus récent rapport modélisant des plafonds nationaux d'émissions pour 2020 (Amann et al, 2008a), l'IIASA quantifie les surfaces de forêts pour lesquelles l'ozone dépasse les niveaux critiques selon l'AOT40.

Dans le domaine des écosystèmes, les indicateurs utilisés actuellement ne sont pas tous au sens propre des indicateurs d'effets. Il s'agit d'indicateurs d'excès de dépôt pour l'acidification et l'eutrophisation. Les relations entre ces excès et les effets sur les écosystèmes ne sont pas abordées dans le modèle. Elles devraient être analysées en aval du modèle, dans des analyses coûts-bénéfices, mais il n'existe pas encore de méthode généralement acceptée.

Par contre, pour le domaine des impacts sanitaires, dans la mesure où l'IIASA quantifie la mortalité prématurée ou les années de vie perdues dues à l'ozone et aux particules, il s'agit d'indicateurs d'effets proprement dit.

Il semblerait que GAINS n'utilise pas d'indicateur pour les impacts des GES, à part des effets de réductions des émissions sur le potentiel de réchauffement global. GAINS, ne calcule pas de concentrations de GES.

2.4 MODULE OPTIMISATION (OPT)

2.4.1 Fonctionnement

Pour déterminer la répartition de coût minimal des réductions d'émissions en Europe, le module d'optimisation minimise, selon des variables de décision, à partir de certaines données d'entrée, une fonction d'objectifs en respectant différentes contraintes ; i.e. il trouve pour quelle(s) valeur(s) des variables de décision, la fonction d'objectifs est minimale et les contraintes respectées.

Le module d'optimisation de GAINS détermine la répartition de coût minimal des réductions d'émissions en Europe, par Etat, de telle sorte qu'une ou plusieurs des contraintes suivantes soient respectées (la sélection/désélection des contraintes pilotant l'optimisation est à la main de l'IIASA uniquement) :

- dans toutes les cellules sélectionnées, les dépassements de charges critiques pour acidification et l'eutrophisation et l'exposition à l'ozone et aux particules (ou le nombre de cas de morts prématurées et le nombre d'années de vie perdues respectivement pour l'ozone et les particules) sont inférieurs ou égaux aux objectifs spécifiés. Ces objectifs peuvent être spécifiés pour un polluant ou pour une combinaison de polluants (optimisation multi-polluants/multi-effets) ;
- les émissions de GES sont inférieures ou égales aux objectifs (plafonds) spécifiés ;
- toutes les mesures de réduction de GES sont prises dont le coût est inférieur à un prix de carbone fixé de façon exogène.

GAINS est en effet capable de simuler des instruments politiques économiques, non seulement des taxes carbone pour réduire les émissions de GES, mais également des permis négociables et les mécanismes flexibles prévus dans le Protocole de Kyoto, ainsi que des taxes sur des émissions de polluants atmosphériques (cf. partie 2.4.4.1).

2.4.2 Variables d'entrée

Parmi les données d'entrée, on peut distinguer des données physico-chimiques et économiques d'une part et des données politiques d'autre part. Les données physico-chimiques et économiques comportent :

- Les scénarios d'activité qui sous-tendent les inventaires d'émissions,
- les inventaires d'émissions,
- des informations sur les techniques de dépollution et leurs efficacités de dépollution et leurs coûts,
- des matrices de transfert de polluants,
- les bases de données sur les charges critiques,
- les données démographiques (population au dessus de 30 ans par cellule) utilisées pour calculer les YOLL.

Le second jeu de données d'entrée, les données politiques, est constitué par les objectifs environnementaux. En termes de formulation mathématique du problème, ces objectifs environnementaux interviennent au niveau des contraintes (cf. la partie 2.4.4.2).

2.4.3 Variables de décision

Il s'agit des variables que l'on fait varier lors de l'optimisation (i.e. le module trouve pour quelle(s) valeur(s) de ces variables les coûts sont minimaux). Elles sont de plusieurs sortes :

- Les niveaux d'une activité donnée, dans un secteur et pays donné, qui sont contrôlés par une technologie de réduction de pollution spécifique. Ces variables ne peuvent prendre que des valeurs non-négatives.

- Les variables de substitution d'activités.
Dans GAINS, certaines activités peuvent être substituées par d'autres. Par exemple, l'utilisation de charbon dans le secteur de la production d'électricité peut être réduite en faveur d'une plus grande utilisation de gaz ou d'énergies renouvelables. Dans le modèle, ce sont des combinaisons entre secteurs et activités qui sont donc remplacées par d'autres. Souvent, mais pas toujours, c'est uniquement l'activité qui est substituée mais à l'intérieur du même secteur GAINS. Il y a naturellement des limites à de telles substitutions (cf. la partie "contraintes" ci-après) qui peuvent changer en fonction des pays.

Dans le rapport de l'IASA décrivant le module d'optimisation il n'est pas explicitement question des autres mesures du type « changement structurel » lorsque les variables de décision sont discutées. En principe, les augmentations d'efficacité de conversion et d'utilisation de l'énergie devraient également faire partie de ces variables.

Un certain nombre d'autres variables peut être déduites des deux variables de décision : le niveau total d'une activité donnée, les taux d'application des technologies individuelles, les émissions d'un polluant donné.

2.4.4 Objectifs et contraintes

2.4.4.1 Fonction d'objectifs

La fonction d'objectifs est la fonction mathématique qui est minimisée lors de l'optimisation. Elle comporte trois termes : les coûts des techniques de traitement de rejets, les coûts de la substitution d'activités, ainsi qu'un terme qui prend en compte les coûts liés à un prix de carbone exogène.

- Les coûts des techniques de traitement des rejets :
Sont dénommées « technologies end-of-pipe » dans GAINS, de façon simplificatrice, toutes les mesures qui réduisent un facteur d'émissions sans changer le niveau d'activité. Ceci couvre des technologies comme par exemple la réduction catalytique sélective (SCR), mais également des paquets de mesures comme les normes EURO dans le secteur du transport ou encore une mesure comme « BAN » qui bannit par exemple l'incinération non contrôlée des résidus d'agriculture.
Chaque technologie est associée à un coût par unité d'activité donnée, dans un secteur et pays donnés. La multiplication de ce coût unitaire par la quantité de l'activité contrôlée, sommée sur tous les pays, secteurs, activités et technologies, donne donc le coût total des techniques de traitement de rejets.
- Les coûts de substitution d'activités :
GAINS offre la possibilité de remplacer certaines activités données dans la 'baseline' par d'autres.
Ces substitutions ont un coût unitaire. Ce coût exprime, par exemple, combien il coûte de substituer une unité de charbon par une quantité équivalente (en termes d'électricité ou de chaleur produites) de gaz dans le secteur des centrales thermiques. La multiplication de ce coût unitaire par la quantité d'activité substituée, sommée sur tous les pays, secteurs et activités, donne le coût total des substitutions d'activité.

- Les coûts liés à un prix de carbone exogène (« climate penalty term » dans le langage GAINS) :

Ce terme dans la fonction d'objectifs force le modèle à réagir à un prix de carbone exogène. Ce terme correspond aux recettes qui sont égales au prix du carbone (ou d'une taxe carbone) multiplié par la quantité des émissions de GES (exprimées en terme de potentiel de réchauffement de la planète).

En absence d'autres contraintes, ce terme assure que l'optimisation va sélectionner toutes les possibilités de réduction de GES qui se trouvent dans le modèle et dont le coût est inférieur au prix exogène du carbone.

Lorsqu'il s'agit de simuler un système de permis négociables, deux cas sont à distinguer. Si le système ne s'applique qu'aux pays ou régions couverts par le modèle, cette simulation ne change pas la fonction d'objectifs. Seule la contrainte sur les émissions est modifiée pour inclure les émissions de toutes les régions concernées. En revanche, lorsqu'il s'agit de simuler un système de permis négociables qui s'applique également à des régions à l'extérieur du modèle, la fonction d'objectifs est modifiée afin de couvrir, en plus des coûts de réduction des émissions à l'intérieur du domaine du modèle, également les coûts (nets) d'achats d'émissions à l'extérieur. Ces coûts nets correspondent au prix du permis par unité de polluant multiplié par la quantité (nette) achetée. On peut supposer que les recettes liées à la vente de permis sont également prises en compte.

2.4.4.2 Contraintes

Plusieurs types de contraintes sont utilisés dans le modèle GAINS : des contraintes environnementales (les objectifs politiques environnementaux), des équations d'équilibre, des contraintes technologiques, des contraintes d'activité et des contraintes assurant une cohérence dans le modèle. Tandis que les contraintes assurant la cohérence du modèle et celles dont les valeurs numériques sont basées sur des données collectées dans le modèle sont appliquées par défaut, les contraintes environnementales dépendent des applications politiques spécifiques du modèle.

Les contraintes environnementales sont utilisées lorsque des objectifs environnementaux existent, par exemple pour des applications politiques du modèle comme la révision de la Directive NEC :

- Plafond pour l'indicateur YOLL,
- Plafond pour l'indicateur sur l'acidification, *a priori* comme pour RAINS exprimé en termes de pourcentage de cellules pour lesquelles les charges critiques sont dépassées,
- Plafond pour l'indicateur sur l'eutrophisation, *a priori* comme pour RAINS exprimé en termes de pourcentage de cellules pour lesquelles les charges critiques sont dépassées,
- Plafond pour l'indicateur SOMO35 ou pour le nombre de cas de morts prématurées dues à l'ozone.

Pour chacun des indicateurs, la valeur résultant de l'optimisation doit être inférieure ou égale au plafond défini.

Le rapport de l'IIASA sur l'approche de l'optimisation dans GAINS ne mentionne pas de contrainte environnementale pour les GES. Toutefois, un plafond comparable devrait également pouvoir s'appliquer aux GES.

Pour des analyses menées dans le cadre de la révision de la Directive NEC, le module a été utilisé avec des jeux complexes de contraintes environnementales pour chaque effet. Ne sont évoqués ici que les principes les plus importants.

Les contraintes environnementales sont en fait exprimées en termes d'objectifs de réduction en pour cent d'un indicateur donné. Cela s'explique par le fait qu'il a été estimé qu'il n'était pas possible d'atteindre dès 2020 les objectifs environnementaux finaux. Des objectifs intermédiaires ont donc été définis pour 2020. Pour cela est utilisé le concept de 'gap closure' : on cherche à obtenir en 2020 la suppression ('closure') partielle de l'écart ('gap') entre la situation en 1990 et l'objectif définitif. Les objectifs intermédiaires sont d'atteindre, dans chaque cellule de la grille, un 'gap closure' pour les différents effets environnementaux au moins égal à un certain pourcentage. Plus récemment cette approche a été modifiée. Dans les modélisations pour la révision de la Directive NEC on cherche actuellement à obtenir en 2020 la suppression partielle de l'écart entre la situation de référence du scénario correspondant à la réglementation en vigueur et le scénario représentant non pas les objectifs politiques finaux, mais une situation où toutes les techniques de réduction des rejets sont mises en œuvre dans toutes les activités et tous les pays.

Prenons le cas du SOMO35, indicateur de l'impact de l'ozone sur la santé humaine. L'objectif final est de respecter les recommandations de l'OMS, ce qui correspond approximativement à avoir un SOMO35 nul. L'objectif intermédiaire pour 2020 est alors d'obtenir une réduction du SOMO35 d'au moins X % dans toutes les cellules de la grille. On parle alors d'un 'gap closure' du SOMO35 de X %.

Les équations d'équilibre :

Des équations d'équilibre assurent la cohérence entre des variables d'activité lorsque des substitutions d'activités ont lieu. Elles assurent que des modifications d'activité (relatives à la '*baseline*') sont prises en compte pour l'activité substituée ainsi que pour l'activité par laquelle celle-ci est substituée. Deux équations d'équilibre énergétique existent : pour la production d'électricité et de chaleur. Elles prennent en compte des modifications également dans l'efficacité de conversion. Elles assurent que des quantités d'électricité et de chaleur cohérentes avec celles produites dans la '*baseline*' sont également produites après que ces substitutions ont eu lieu.

Trois types de contraintes technologiques sont utilisés : elles concernent l'applicabilité de technologies, des normes technologiques, et des potentiels technologiques.

- L'applicabilité de technologies :
Une borne supérieure aux taux d'application (dénommée 'applicabilité') de certaines technologies est imposée lorsque celles-ci ne sont pas applicables à toutes les installations concernées par la technologie (par exemple parce qu'il n'y a pas assez d'espace à proximité d'une installation pour installer l'équipement supplémentaire nécessaire).
La situation est plus complexe pour le contrôle du NH₃. Afin d'assurer un

nombre gérable de technologies, celles-ci ont été regroupées en des paquets de technologies. Des applicabilités sont définies pour les technologies individuelles dans ces paquets. L'application totale d'une technologie individuelle donnée est alors limitée à travers tous les paquets de technologies dans lesquels cette technologie est présente.

Pour un certain nombre de technologies de contrôle de NH₃ (SA, LNF, BF, LNA, LNA_high, LNA_low)¹² des taux d'application minimaux sont également définis. Ils assurent que l'application de ces technologies n'est pas réduite par rapport au scénario '*baseline*'.

Enfin, il y a également des contraintes assurant que pour chaque combinaison secteur-activité les émissions (par polluant) ne peuvent pas augmenter par rapport aux émissions de la '*baseline*'¹³.

- Normes technologiques :
Dans l'optimisation la part de certaines technologies de réduction de pollution émanant d'une réglementation antérieure (comme par exemple les normes EURO II) ne doit pas augmenter par rapport à la '*baseline*'. Cette contrainte est également appliquée pour la mesure 'no control'¹⁴. Elle consiste en une définition de bornes supérieures d'application.
- Potentiels technologiques (cf. également la partie sur les contraintes d'activité ci-après) :
Des bornes inférieures et supérieures à la quantité d'une activité donnée qui peut être contrôlée par une technologie donnée peuvent également être définies, notamment afin d'empêcher une mise à la casse prématurée d'équipement récemment installé. Cette notion est analogue à celle d'applicabilité définie ci-avant.
Cette approche peut également être utilisée pour exclure la prise en compte de technologies multi polluants, comme des normes EURO, dans l'optimisation. Cela a été fait pour reproduire, avec le modèle GAINS, les résultats de l'ancien modèle RAINS dans la modélisation des nouveaux plafonds nationaux d'émissions dans la révision de la Directive NEC (cf. également la partie 2.5.3.1 ci-après).

Deux types de contraintes d'activité sont définis dans le modèle : des contraintes liées à l'utilisation de certaines ressources (qui ressemblent aux contraintes relatives aux potentiels technologiques définies plus haut) et des bornes relatives à la substitution de ressources.

- Contraintes d'utilisation de ressources :
Lorsque des niveaux d'activités peuvent changer dans le modèle, ceux-ci sont associés avec des bornes inférieures et supérieures. L'utilisation de sources

¹² SA : adaptation des bâtiments d'élevage, LNF : aliments à basse teneur en azote, BF : bio-filtration, LNA : basse application d'ammoniac, LNA_high : basse application d'ammoniac haute efficacité, LNA_low : basse application d'ammoniac faible efficacité.

¹³ C'est à dire les émissions (par polluant) en 2020 ne peuvent pas augmenter par rapport aux émissions de la '*baseline*' en 2020. Ce n'est donc pas une contrainte qui limite la croissance économique (d'un secteur).

¹⁴ Dans le jeu de technologies prises en compte dans GAINS il se trouve en effet une option dénommée 'no-control'. Ceci permet d'associer chaque activité, contrôlée ou non, à une technologie.

d'énergie renouvelables, par exemple, est limitée au potentiel économique défini dans GAINS. Il peut également y avoir des bornes inférieures ou supérieures pour l'utilisation de certains combustibles fossiles.

- Bornes relatives à la substitution de ressources :
Une variante des contraintes précédentes est la limitation de substitutions individuelles de combustibles, par exemple la limitation du potentiel d'une co-combustion dans les centrales électriques ou dans certains secteurs industriels.

Les contraintes assurant une cohérence entre les différents niveaux d'agrégation dans le modèle s'appliquent aux secteurs des centrales électriques, aux chaudières de différents types, aux « autres combustibles solides » et aux substitutions entre combustibles.

- Agrégation de différents types de centrales :
Contrairement à RAINS, GAINS distingue différents types de centrales. Un premier niveau de désagrégation distingue installations IGCC (centrales (électriques) à cycle combiné à gazéification intégrée) et installations non IGCC. A l'intérieur de ces deux groupes sont distingués d'autres types de centrales¹⁵ (deuxième niveau de désagrégation).
L'activité est calculée au deuxième niveau de désagrégation, mais les émissions au premier niveau. Sont donc imposées des contraintes assurant que la somme des activités du niveau 2 de désagrégation soit égale à la somme des activités du niveau 1 de désagrégation.
- Parts de différents types de chaudières :
Dans GAINS, chaque secteur de combustion a une sous-structure individuelle correspondant aux différents types de chaudières. De façon simplificatrice, l'hypothèse est faite que les parts de ces sous-secteurs dans l'activité d'un secteur de combustion donné ne changent pas dans l'optimisation (cf. également partie 4.3.2).
- Agrégation des « autres combustibles solides » :
Il y a également deux niveaux d'agrégation pour les « autres combustibles solides ». Des contraintes sont formulées qui assurent également la cohérence entre les calculs à différents niveaux de désagrégation pour ces combustibles.
- Agrégation de substitutions de combustibles :
Enfin, il y a des contraintes assurant la cohérence dans le secteur des centrales et concernant l'agrégation des « autres combustibles solides » non seulement par rapport à l'activité totale (cf. plus haut) mais également par rapport aux substitutions entre différents combustibles.

¹⁵ Sont distinguées des centrales IGCC produisant uniquement de l'électricité, des centrales CHP (production combinée électricité-chaleur) IGCC dans le secteur du chauffage urbain, des installations industrielles type CHP IGCC, des centrales non IGCC produisant uniquement de l'électricité, des centrales CHP mais non IGCC dans le secteur du chauffage urbain, des installations industrielles type CHP mais non IGCC et des installations non IGCC produisant uniquement de la chaleur pour le secteur du chauffage urbain.

2.4.5 Données de sortie

Les résultats fournis par le modèle sont les variables suivantes :

- Les réductions d'émissions (optimales en cas d'emploi du module d'optimisation) ;
- les coûts totaux (souvent exprimés en terme de coûts au-dessus des coûts du scénario '*baseline*' qui représente les projections d'activité pour une évolution '*business as usual*' et pour la réglementation en vigueur) et les coûts marginaux ainsi que les coûts par unité de réduction des émissions par pays, région ou secteur ;
- les expositions (concentrations de particules fines, concentrations d'ozone, dépôts de composés de soufre et d'azote) dans chaque cellule de la grille après l'optimisation. Pour l'acidification et l'eutrophisation le modèle fournit également les dépôts en excès des charges critiques. Les impacts sur la santé des particules fines sont présentés en termes de réduction d'espérance de vie (réduction d'espérance de vie moyenne en nombre de mois) et d'années de vie perdues. Et les impacts sur la santé de l'ozone sont présentés également en termes de réduction d'espérance de vie (exprimé en nombre de morts prématurés par an).

Les Graphiques 2 et 3 ci-après montrent deux exemples de cartes fournies par le modèle GAINS pour illustrer les effets des polluants sur la santé et les écosystèmes.

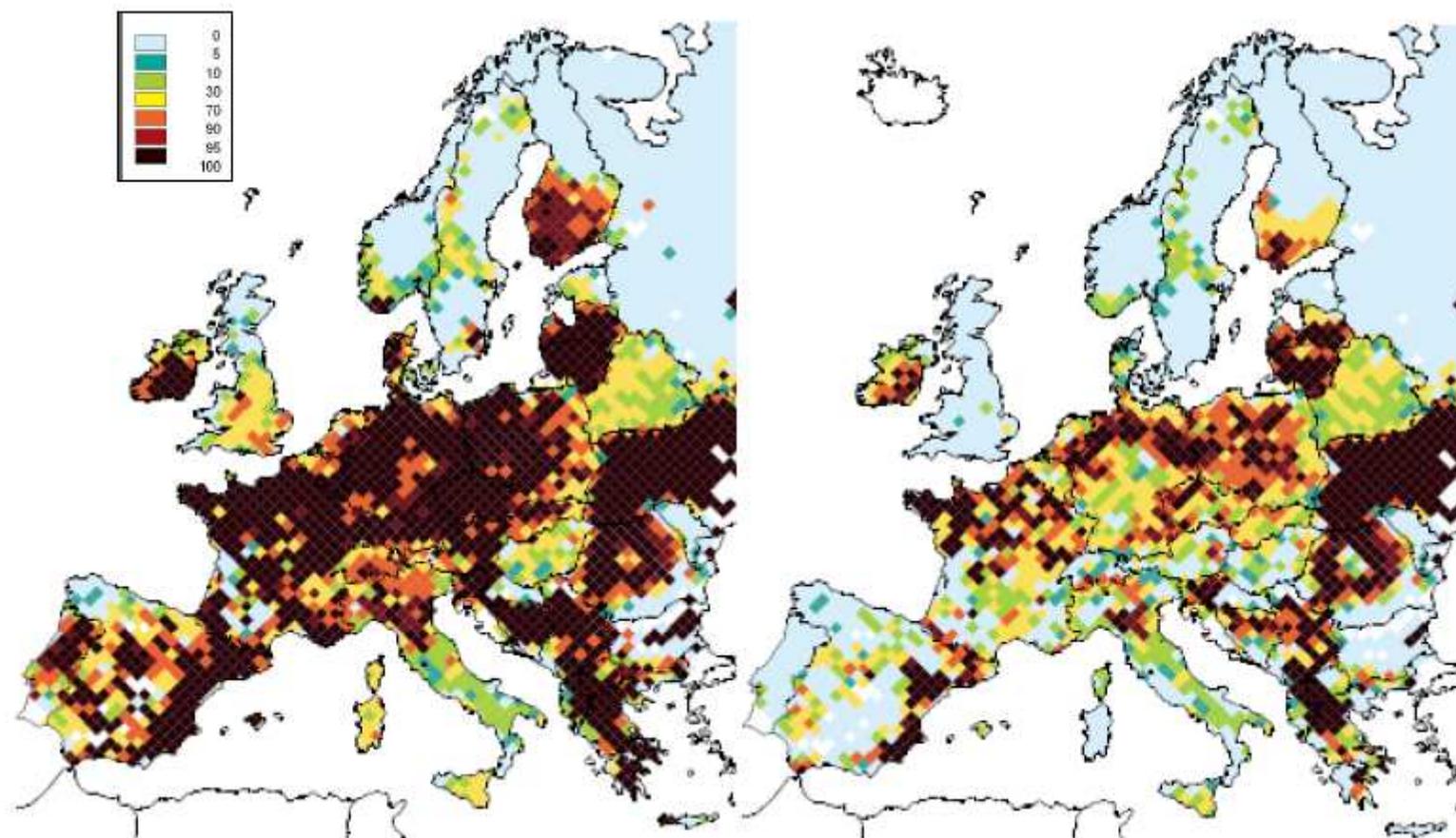


Figure 2 : Pourcentage des écosystèmes avec des dépôts en azote en excès des charges critiques pour l'eutrophisation en 2000 (à gauche) et pour le scénario optimisé en 2020 (à droite) (Source : Amann et al, 2008a)

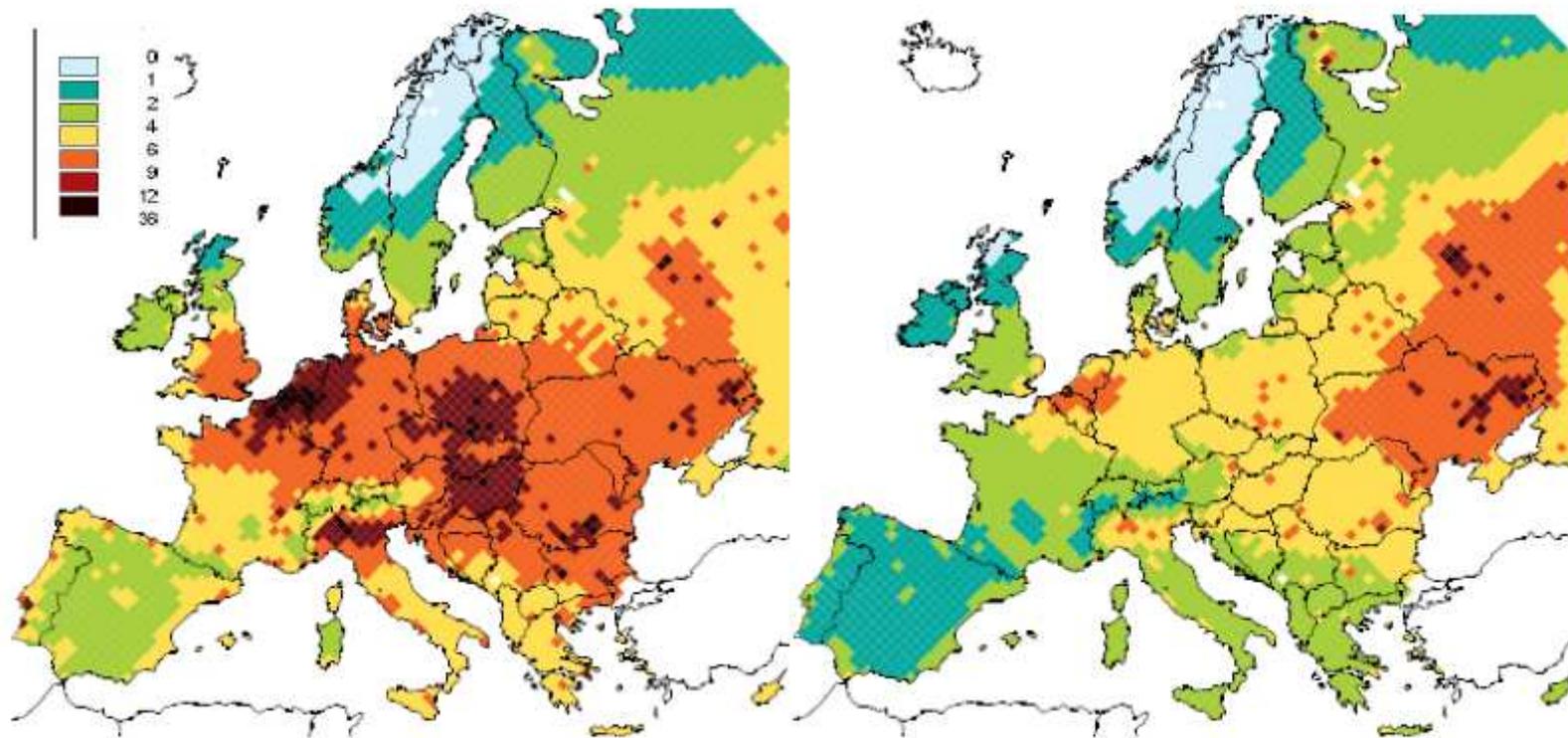


Figure 3 : Réduction d'espérance de vie (en nombre de mois) due aux particules fines en 2000 (à gauche) et pour le scénario optimisé en 2020 (à droite) (Source : Amann et al, 2008a)

2.5 DIFFERENTS MODES DE FONCTIONNEMENT

Dans les schémas présentés ci-après sont indiqués les trois modules du modèle GAINS : les modules émissions et coûts, transferts et dépôts et le module d'optimisation. GAINS peut fonctionner dans 3 modes : 2 modes scénario, utilisant uniquement les premiers deux modules, et un mode optimisation. Concernant le mode optimisation, il y a actuellement deux sous-modes de fonctionnement : GAINS fonctionnant en mode RAINS et GAINS fonctionnant en mode GAINS.

2.5.1 Mode « scénario de référence »

Le premier mode de fonctionnement, dénommé ici mode « scénario de référence », permet de calculer, pour des scénarios d'activité '*baseline*' qui représentent des variables exogènes, les émissions et les impacts qui en résultent (cf. Graphique 4). Des *runs* du modèle dans ce mode donnent donc des résultats répondant à des questions du type de la suivante : En appliquant toute la réglementation environnementale en vigueur dans la période considérée, quel serait le niveau d'émissions et quels seraient les impacts environnementaux et sanitaires si l'activité économique correspondait au scénario '*baseline*' ?

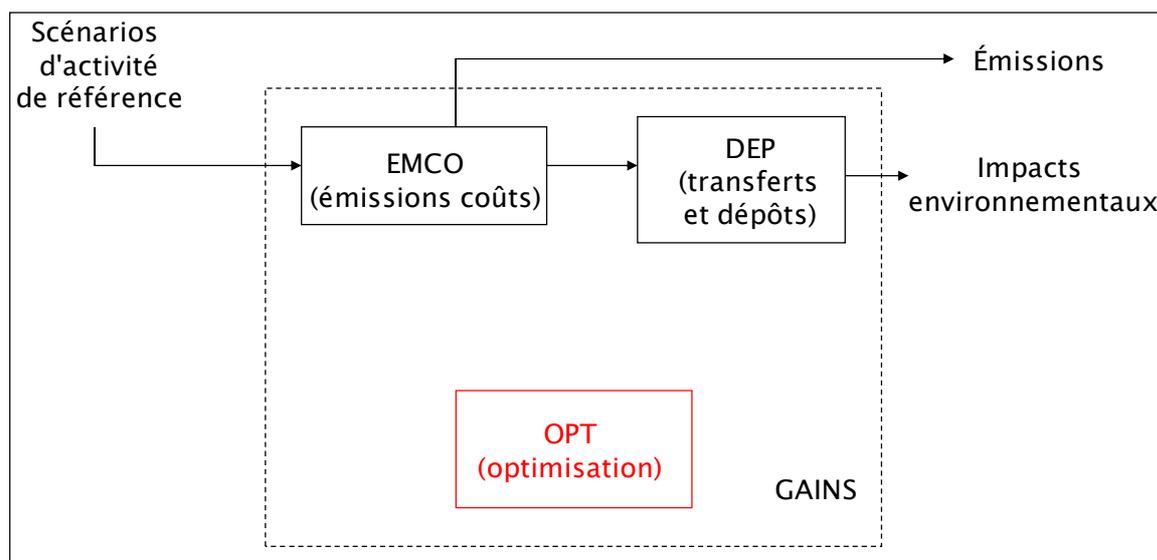


Figure 4 : Fonctionnement du modèle en mode scénario 1 : scénario de référence

2.5.2 Mode « stratégie de réduction des émissions »

Le deuxième mode, dénommé ici mode « stratégie de réduction des émissions » se base également sur des scénarios d'activité mais de plus prend en compte des stratégies de réduction d'émissions. On entend par stratégies de réduction d'émissions les mesures additionnelles mises en œuvre dans la période considérée. Ce mode calcule, en plus des émissions et des effets, les coûts de ces politiques, c'est à dire les coûts des mesures additionnelles de réduction d'émissions (cf. Graphique 5).

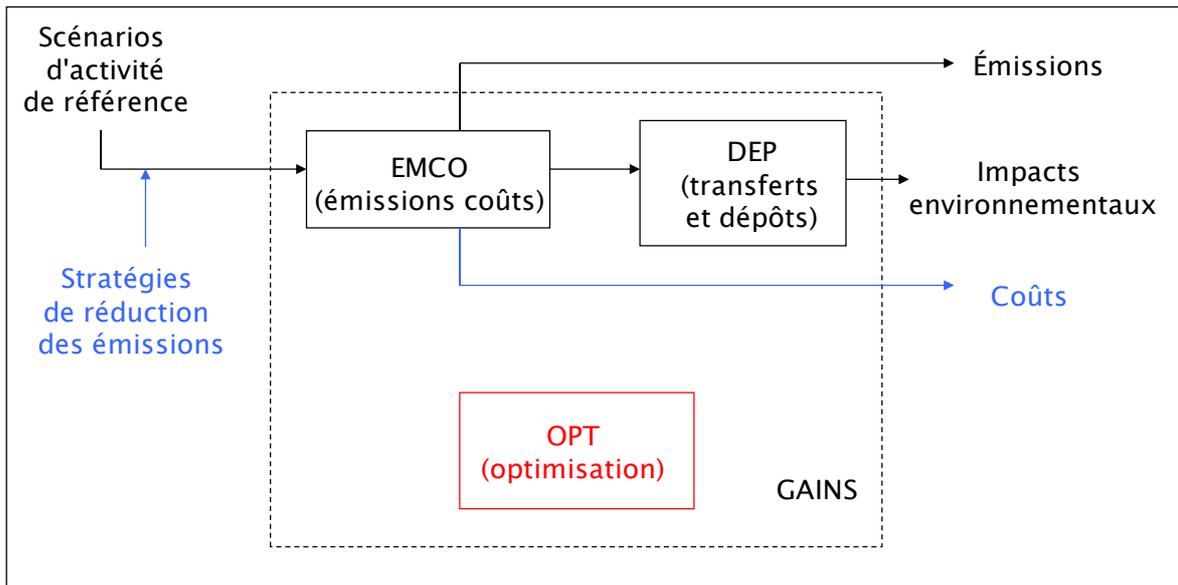


Figure 5 : Fonctionnement du modèle en mode scénario 2 : stratégie de réduction des émissions

2.5.3 Mode « optimisation »

Le troisième mode utilise le module d'optimisation. Dans ce mode on ajoute des contraintes, c'est à dire des objectifs environnementaux en termes d'acidification, d'eutrophisation, d'années de vie perdues ou de cas de mortalité prématurée (et, éventuellement, de réduction d'émissions des GES).

Le module calcule alors pour quelle valeur des variables de décision (notamment les technologies de contrôle d'émissions et les substitutions d'activités) les objectifs environnementaux sont respectés à moindre coût (critère de coût-efficacité). Exprimé de façon différente, le modèle détermine la façon de répartir les réductions d'émissions entre pays pour atteindre les objectifs à moindre coût.

Dans RAINS, l'optimisation avait choisi jusqu'à quel point monter sur chaque courbe de coûts mono polluant. Les niveaux d'activité (énergie etc.) restaient fixes. Dans GAINS, l'optimisation peut choisir entre mesures techniques de réduction des émissions et changements dans l'activité (uniquement énergie, actuellement), comme par exemple des modifications de combinaisons de combustibles.

Concernant l'optimisation, deux sous-modes de fonctionnement sont actuellement distingués : « GAINS en mode RAINS » et « GAINS en mode GAINS ».

2.5.3.1 GAINS en mode RAINS

Le passage du modèle RAINS au modèle GAINS s'est fait pendant que les travaux de modélisation pour la révision de la Directive NEC étaient en cours. Dans le cadre du programme CAFE (Clean Air for Europe) les objectifs sur l'environnement et sur la santé à mettre en œuvre à travers cette nouvelle Directive ont été publiés, en 2005, dans la Stratégie Thématique sur la Pollution de l'Air¹⁶ (TSAP). Ils ont été définis sur la base de modélisations avec RAINS. Afin

¹⁶ http://ec.europa.eu/environment/archives/air/cale/pdf/strat_com_en.pdf

d'assurer que le nouveau modèle soit capable de produire des solutions équivalentes à celles de l'ancien modèle, l'IIASA a créé la possibilité de faire fonctionner GAINS dans un mode qui correspond au fonctionnement de l'ancien modèle RAINS.

Dans ce mode, certaines fonctionnalités du modèle GAINS sont désactivées, notamment la modélisation de changements structurels (augmentation de l'efficacité de conversion et d'utilisation de combustibles, substitutions entre différents combustibles) et des GES. Comme c'était le cas dans RAINS, les technologies multi polluants, notamment les paquets de technologies correspondants aux normes EURO pour le transport, sont également exclus de l'optimisation¹⁷. La fonction d'objectifs est donc limitée à la minimisation des coûts de technologies de type « end-of-pipe » pour les polluants atmosphériques, notamment dans le domaine des sources fixes. Les variables de décision sont les niveaux d'activités dans tous les secteurs et pays auxquels appliquer les différentes techniques de traitement de rejets. Les scénarios d'activité restent des variables exogènes (cf. Graphique 6).

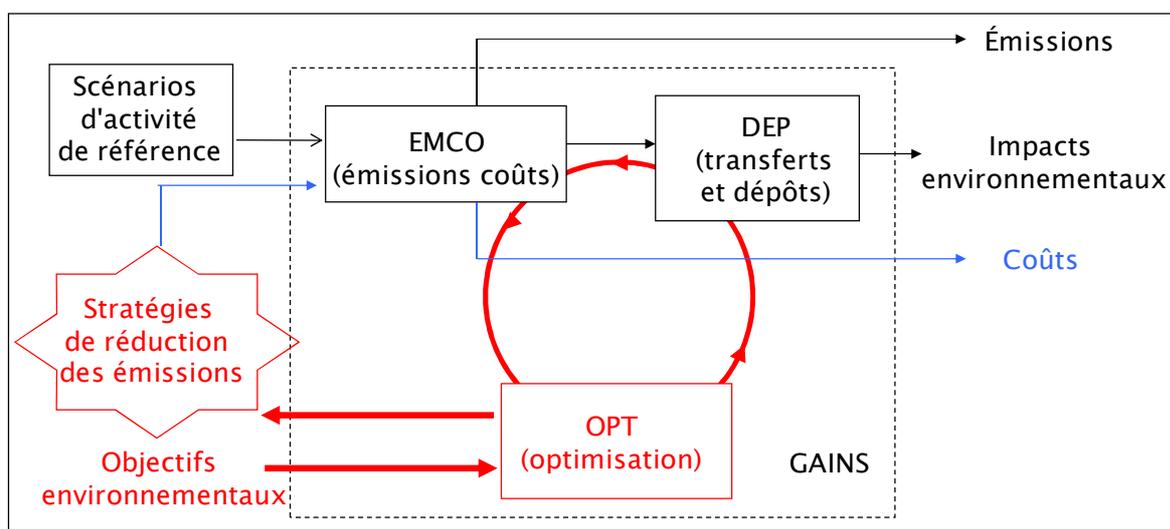


Figure 6 : Fonctionnement du modèle en mode d'optimisation 1 : Gains en mode RAINS

2.5.3.2 GAINS en mode GAINS

Lorsque toutes les fonctionnalités du modèle GAINS sont activées, le modèle optimise également la façon de réduire les GES, et les variables de décision sont toutes les technologies de réduction d'émissions, qu'elles soient mono ou multi polluant, ainsi que les changements structurels actuellement pris en compte dans le modèle. En autorisant des changements d'activité qui répondent au critère coût-

¹⁷ Ceci peut être fait via l'utilisation de contraintes additionnelles, par exemple en imposant que l'application de certaines technologies dans le résultat de l'optimisation corresponde au niveau d'application dans la 'baseline'. Plus précisément, les bornes inférieures et supérieures de l'activité à laquelle la technologie concernée s'applique sont fixées à un niveau égal à celui de la 'baseline' (cf. la partie 2.4.4.2). C'était le cas pour les normes EURO dans la modélisation pour la révision de la Directive NEC.

efficacité, les scénarios d'activité deviennent, en partie, endogènes (cf. Graphique 7).

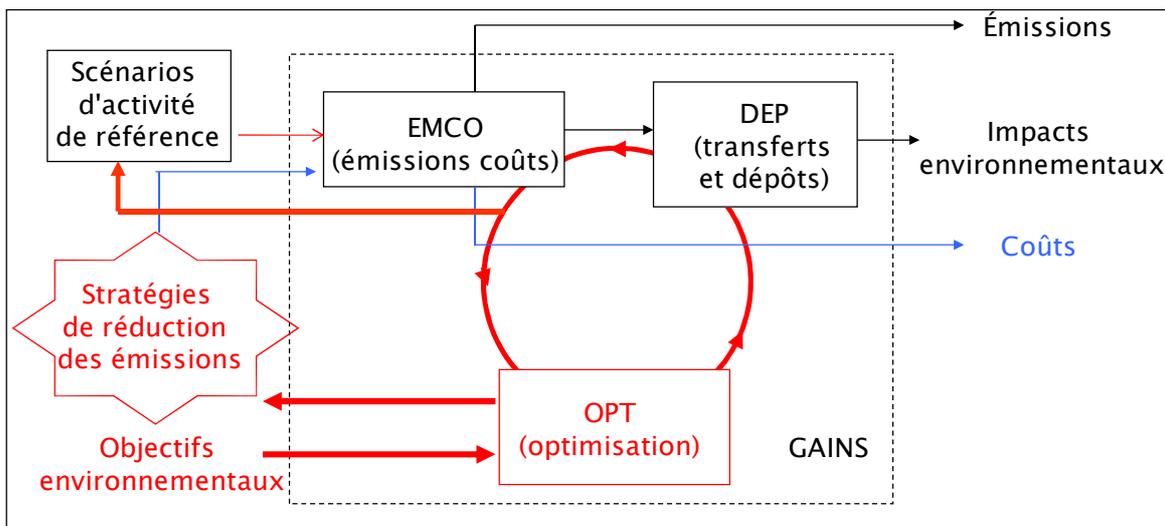


Figure 7 : Fonctionnement du modèle en mode d'optimisation 2 : Gains en mode GAINS

Les effets des deux modes d'optimisation sur les coûts de réduction des émissions de particules sont présentés, à titre d'exemple, dans le Graphique 8.

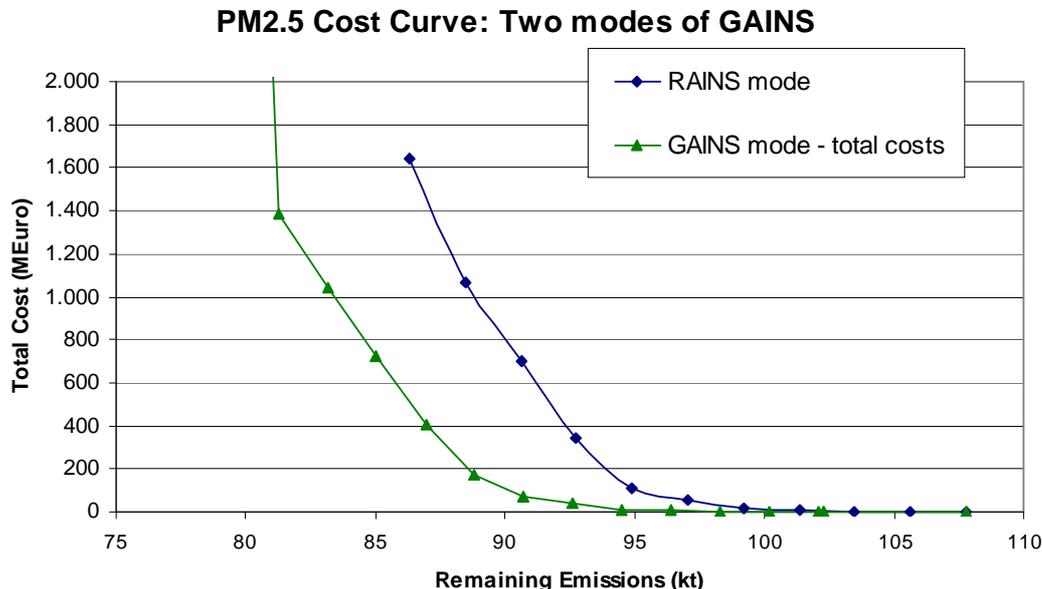


Figure 8 : Impact des mesures du type « changements structurels » sur la courbe de coûts pour les PM_{2,5} (Source : IIASA, graphique publié dans la revue de GAINS phase I (Agren et al, 2007))

Le Graphique 8 montre deux courbes de coûts pour un pays. La courbe bleue correspond au mode RAINS du modèle. Elle classe les différentes techniques de réduction des rejets en ordre croissant de leurs coûts marginaux et en prenant en

compte des taux maximaux d'application. Pour générer la courbe verte, les restrictions concernant les changements structurels ont été enlevées. La courbe présente donc les résultats du mode GAINS du modèle. Le potentiel de réduction des émissions est plus élevé dans cette courbe que dans celle du mode RAINS, et un niveau donné d'émissions peut être atteint à un coût plus faible. Ceci s'explique par le fait que le système énergétique n'est pas le même. La courbe bleue (mode RAINS) a été construite sur la base d'un scénario énergétique de référence. Dans le cas de la courbe verte (mode GAINS) la quantité de combustibles fossiles utilisée est plus faible, les capacités nécessitant un contrôle de leurs émissions sont donc moins élevées.

3. AVANTAGES DE L'APPROCHE GAINS PAR RAPPORT A L'ANCIEN MODELE RAINS

3.1 PRISE EN COMPTE DES GAZ A EFFET DE SERRE

Certains polluants atmosphériques (e.g. ozone troposphérique, aérosols) sont eux mêmes des gaz à effet de serre ayant un potentiel de forçage radiatif. D'autres polluants atmosphériques (NO_x, CO, COV) agissent comme des GES indirects, influençant la durée de vie de GES directs (e.g. méthane, HFC).

Les polluants atmosphériques et les gaz à effet de serre ont souvent des sources communes. Certaines mesures de réduction d'émissions influencent donc les polluants atmosphériques aussi bien que les gaz à effet de serre. Ces interactions peuvent être synergiques mais aussi antagonistes. Il y a donc des interactions physiques et économiques entre différentes mesures de réduction d'émissions.

Le modèle GAINS permet d'étudier les effets synergiques et antagonistes sur la PA et les GES des mesures de réduction des émissions prises en compte dans le modèle. Il permet ainsi de développer des stratégies intégrées de réduction de pollution atmosphérique et des gaz à effet de serre, qui, d'un point de vue de leurs effets ou des coûts associés sont plus optimales que des stratégies visant les deux problèmes de pollution séparément.

3.2 PRISE EN COMPTE DE MESURES AUTRES QUE 'END-OF-PIPE'

Le modèle RAINS prenait en compte environ 1500 mesures de réduction d'émissions de polluants atmosphériques. C'étaient presque uniquement des mesures du type « end-of-pipe ».

En plus de ces mesures, GAINS prend en compte environ 230 mesures de réduction de CO₂, 28 mesures de réduction du CH₄, 18 options pour le N₂O et 230 options pour réduire les émissions de HFC, PFC et SF₆. Il faut noter que le nombre d'options prises en compte pourrait avoir changé depuis la publication des derniers rapports méthodologiques de l'IIASA.

Environ 500 mesures de réduction d'émissions sur un total d'environ 2000 ont un effet sur plus d'un polluant atmosphérique, de gaz à effet de serre ou des deux. Ces mesures ont donc à la base soit des effets synergiques de réduction d'émissions soit des effets antagonistes.

L'augmentation du nombre des mesures de réduction des émissions considérées dans le modèle a l'avantage d'augmenter le potentiel maximal de réduction d'émissions. De plus, la prise en compte de mesures du type « changement structurel » permet d'aller plus loin dans la réduction des émissions que ce qui est possible en appliquant uniquement des technologies.

Il est également possible que les coûts d'une réduction des émissions donnée soient moins élevés lorsqu'on prend en compte des stratégies de changement structurel que lorsque celles-ci sont exclues de la modélisation. Des premières analyses avec GAINS ont en effet montré qu'en considérant toutes les mesures de réduction d'émissions dans GAINS, et qu'en optimisant de façon simultanée les politiques de réduction de GES et de réduction de la PA, des stratégies peuvent

être identifiées qui sont plus optimales que lorsqu'on optimise les deux domaines de façon séparée.

L'ordre de grandeur des économies permises par l'optimisation conjointe serait le milliard d'euros.¹⁸

3.3 REPRESENTATION EXPLICITE DE TECHNOLOGIES

En contraste avec l'approche de courbes de coûts mono polluants de RAINS, GAINS utilise une représentation explicite de techniques individuelles de réduction de pollution. Ceci permet de présenter de façon plus adéquate les techniques qui ont un effet sur plusieurs polluants. Chaque technique est caractérisée par son coût et son impact sur un ou plusieurs polluants. Ceci s'applique également aux mesures regroupées sous le terme « changements structurels ».

Dans le cas de techniques ayant un effet sur plusieurs polluants, l'ancienne approche basée sur des courbes de coûts mono polluant nécessitait d'attribuer de façon arbitraire les coûts de technologies multi polluants à un seul polluant. Dans RAINS, pour la réduction de la pollution atmosphérique, la plupart des mesures de réduction des émissions étaient des mesures mono polluant. Les rares exceptions, comme les mesures décrites par les normes EURO dans le secteur du transport, étaient analysées de façon séparée. Avec la prise en compte des GES, le nombre de mesures ayant un effet sur plusieurs polluants a augmenté de façon significative.

L'approche GAINS a plusieurs avantages :

- Les coûts de réduction des émissions sont directement associés à des technologies, plutôt qu'à des polluants. Pour des technologies n'affectant qu'un seul polluant la différence n'a pas d'importance. Mais pour des mesures ayant un effet sur plusieurs polluants la différence peut être importante.
- Les technologies multi polluants sont représentées de façon adéquate dans GAINS et évaluées sur la base de leur capacité à réduire plusieurs polluants de façon simultanée. En effet, de telles technologies ne sont parfois pas coût-efficaces dans une approche mono polluant, mais peuvent l'être dans une approche multi polluants.
- Pour les changements structurels, il est également souvent inadéquat d'attribuer leurs coûts à un seul polluant. Il est possible qu'une mesure de changement structurel ne soit pas coût-efficace comme mesure de contrôle d'un seul gaz, mais ce type de mesures l'est souvent pour la réduction de GES et de la PA conjointement.
- Avec chaque modification du système énergétique, les courbes de coûts mono polluant utilisées sous RAINS devraient être recalculées, car le potentiel d'application de technologies du type « end-of-pipe » pour contrôler la PA pourrait être modifié suite aux modifications du scénario d'activités énergétiques. La représentation explicite de technologies dans GAINS évite de

¹⁸ Cf. par exemple <http://www.iiasa.ac.at/rains/gains-presentations.html?sb=12>, présentation de l'IIASA lors de la 'Conference on Air Pollution and Greenhouse Gas Emission Projections for 2020', à Bruxelles, le 29 septembre 2006.

telles procédures lourdes. Le modèle identifie automatiquement le potentiel des technologies disponibles, et ce pour chaque niveau d'activité énergétique.

Le désavantage de l'approche est que les courbes de coûts ne sont plus utilisées, alors qu'elles étaient considérées utiles comme outil de communication et pour développer des perspectives politiques par les décideurs nationaux.

Toutefois, le modèle GAINS est capable de créer des courbes de coût *ex post*. Lorsque c'est le cas, une décision sur l'attribution des coûts de mesures à un ou plusieurs polluants devient donc nécessaire. Pour le cas des mesures multi polluants c'est nécessairement un choix arbitraire. La totalité des coûts d'une technologie pourrait être attribué au polluant principalement réduit par la mesure en question, la totalité des coûts pourrait être attribué à chaque polluant affecté par la mesure, ou les coûts pourraient être repartis à travers plusieurs polluants. Dans la version online du modèle GAINS-Europe les coûts de technologies sont attribués dans leur ensemble au polluant principal réduit par la mesure en question. Quelques règles spécifiques s'appliquent aux NOx et aux particules : Lorsqu'une mesure réduit, entre autres, les émissions des NOx, l'IASA attribue les coûts de cette mesure aux seuls NOx. La deuxième priorité est donnée aux particules.

4. LIMITES DU MODELE, EVOLUTIONS EN COURS ET POINTS A CLARIFIER

4.1 LIMITES DU MODELE GAINS ET MODELES COMPLEMENTAIRES

Le module d'optimisation, s'il présente l'intérêt de « prouver » que les stratégies proposées sont économiquement efficaces et donc acceptables par les acteurs industriels et politiques, n'en demeure pas moins parfois d'un fonctionnement encore moyennement transparent.

GAINS se focalise sur l'analyse d'effets synergiques entre le contrôle d'émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre. Il n'est pas envisagé actuellement d'élargir l'analyse à une modélisation du système climatique. Un modèle d'analyse intégrée qui intègre une modélisation du changement climatique a par exemple été développé au Pays Bas : le modèle IMAGE (Integrated Model to Assess the Greenhouse Effect)¹⁹.

Généralement, les options et potentiels de modifications de systèmes énergétiques sont analysés à l'aide de modèles énergétiques spécialisés. Ces modèles sont très détaillés et complexes. GAINS n'est pas un modèle énergétique et il est difficile d'établir le niveau de détail de la description du système énergétique qui est nécessaire aux évaluations de mesures structurelles dans ce modèle. Pour gérer cette question, l'approche choisie correspond à celle utilisée pour modéliser le transport atmosphérique de polluants et les impacts environnementaux : GAINS utilise des représentations « résumées » (« reduced form representations ») des modèles spécialisés qui sont plus simples à gérer par ce modèle d'analyse intégrée. Elles décrivent pour des indicateurs de sortie choisis la réponse du système vis-à-vis de modifications dans des variables d'entrée sous une forme mathématique efficace. Afin de modéliser le potentiel de changements structurels capables de réduire les émissions de CO₂, GAINS définit des relations entre différentes variables qui garantissent une cohérence physique et applique également des contraintes à la substitution entre différents combustibles qui sont déduites de modèles spécialisés. Le modèle opère alors en conjonction avec des modèles énergétiques spécialisés, qui fournissent les projections '*baseline*' ainsi que les potentiels et les coûts de chaque déviation de cette '*baseline*'.

Dans des applications de GAINS pour la Commission européenne, c'est souvent le modèle énergétique PRIMES qui est utilisé pour fournir de telles informations. Une telle interaction entre modèles demande évidemment une transparence sur les mesures réellement modélisées dans les modèles spécialisés, ainsi que sur les hypothèses faites à leur égard. Il semblerait que cette transparence n'est pas toujours assurée en ce qui concerne le modèle PRIMES.

Par exemple, GAINS identifie certaines mesures de réduction de CO₂ qui conduisent à des économies (elles ont donc un coût négatif). Lorsqu'une '*baseline*' énergétique a été construite en faisant l'hypothèse d'un raisonnement de minimisation de coûts, de telles mesures devraient être adoptées de façon autonome, même sans existence d'une politique environnementale. Toutefois, en

¹⁹ Cf. MNP (2006).

réalité des imperfections de marché empêchent souvent la mise en place de telles mesures. Le potentiel de réduction d'émissions est donc sensible aux hypothèses sur l'application autonome de mesures faites dans la 'baseline'. L'IIASA fait généralement l'hypothèse que toutes les mesures à coût négatif font partie de la 'baseline' PRIMES, les excluant donc comme mesures supplémentaires disponibles dans l'optimisation. Actuellement, l'Université Technique d'Athènes (qui développe le modèle PRIMES) et l'IIASA travaillent ensemble dans le projet EC4MACS qui vise une amélioration des interactions entre les différents modèles.

GAINS ne modélise pas de mesures qui peuvent être regroupées sous le terme de « changements de comportement ». C'est du à un problème méthodologique qui rend leur prise en compte difficile. La modélisation des choix du consommateur pose en effet une difficulté pour des modèles comme GAINS, car le concept de coût-efficacité qui y est utilisé ne correspond pas au concept de coûts de tels acteurs individuels. GAINS analyse l'utilisation optimale de ressources dans la société en se basant uniquement sur des coûts reflétés dans des prix de marché. Pour un consommateur, certaines mesures peuvent conduire à une modification de l'utilité privée qui n'est pas reflétée dans des prix mais qui peut influencer son choix. Il y a actuellement un manque de données pour donner des valeurs acceptées à de telles variables. Par ailleurs, GAINS n'est pas conçu pour modéliser les choix d'acteurs. Ce n'est pas un modèle comportemental. L'IIASA affirme par contre tenir compte de changements de comportement à travers de scénarios exogènes alternatifs, comme des scénarios PRIMES.

Contrairement à GAINS, PRIMES est un modèle comportemental qui, de plus, présente de façon explicite les technologies énergétiques ainsi que de réduction des émissions disponibles. Le modèle simule un équilibre de marché pour la demande et l'offre d'énergie. Il utilise une structure modulaire pour représenter les décisions en termes d'offre et de demande des différents acteurs de l'économie qui déterminent les prix. Les différents modules interagissent via des échanges de combustibles et des prix, ainsi déterminant le prix d'équilibre. PRIMES simule également les choix en termes de technologies produisant et consommant de l'énergie. L'approche modulaire permet de modéliser de façon individuelle les différents secteurs, comme les fournisseurs de combustibles, le secteur de la conversation d'énergie et la demande finale. En principe le modèle est basé sur la minimisation de coûts. Toutefois, il semblerait qu'il utilise également des paramètres pouvant empêcher le modèle d'adopter des solutions techniques coût-efficaces, par exemple pour représenter une perception subjective de coûts de certaines technologies par des consommateurs. Les hypothèses exactes concernant de tels paramètres ne sont pas communiquées.

GAINS ne calcule pas les effets macro-économiques des stratégies de contrôle des émissions. Dans le cadre de modélisations pour la Commission européenne, le modèle d'équilibre général GEM-E3 (General Equilibrium Model - Energy, Environment, Economy)²⁰ est souvent utilisé pour quantifier de tels effets. Le modèle lie des différentes régions du monde via des flux commerciaux et environnementaux. Il modélise les différents secteurs de l'économie et le comportement d'offre et de demande des différents acteurs économiques qui optimisent leurs fonctions individuelles d'objectifs. Les prix sont formés comme résultats des interactions entre l'offre et la demande. Pour la révision de la

²⁰ <http://www.gem-e3.net/>

Directive NEC, par exemple, ce modèle évalue les effets des stratégies optimales proposées par GAINS sur le PIB, l'emploi, la consommation privée, l'investissement, les exportations et les importations, les salaires, les prix relatifs à la consommation, etc.

L'évaluation monétaire des bénéfices des stratégies de réduction des émissions modélisées par GAINS a lieu en aval du modèle. Ce sont notamment les bénéfices d'une réduction des effets des particules et de l'ozone sur la santé (en termes de morbidité et de mortalité) qui sont actuellement évaluées en termes monétaires, et en partie des effets de l'acidification sur les bâtiments. Aucune méthode fiable pour évaluer les bénéfices dus à la réduction des effets sur les écosystèmes n'est disponible actuellement.

Au lieu d'introduire tous ces aspects dans un modèle extrêmement complexe, l'approche poursuivie (et renforcée comme dans le projet de recherche européen EC4MACS) consiste à créer un réseau entre différents modèles spécialisés. Cette chaîne de modèles (Graphique 9) comprend le modèle intégré GAINS pour la PA et les GES, le modèle énergétique PRIMES, le modèle de transport REMOVE, le modèle agricole CAPRI, le modèle chimie-transport EMEP, le modèle macro-économique GEM-E3, le modèle énergétique global POLES, le modèle chimie-transport global TM5 ainsi que de différentes approches pour l'évaluation des impacts sur la santé et les écosystèmes et pour la quantification monétaire des bénéfices.

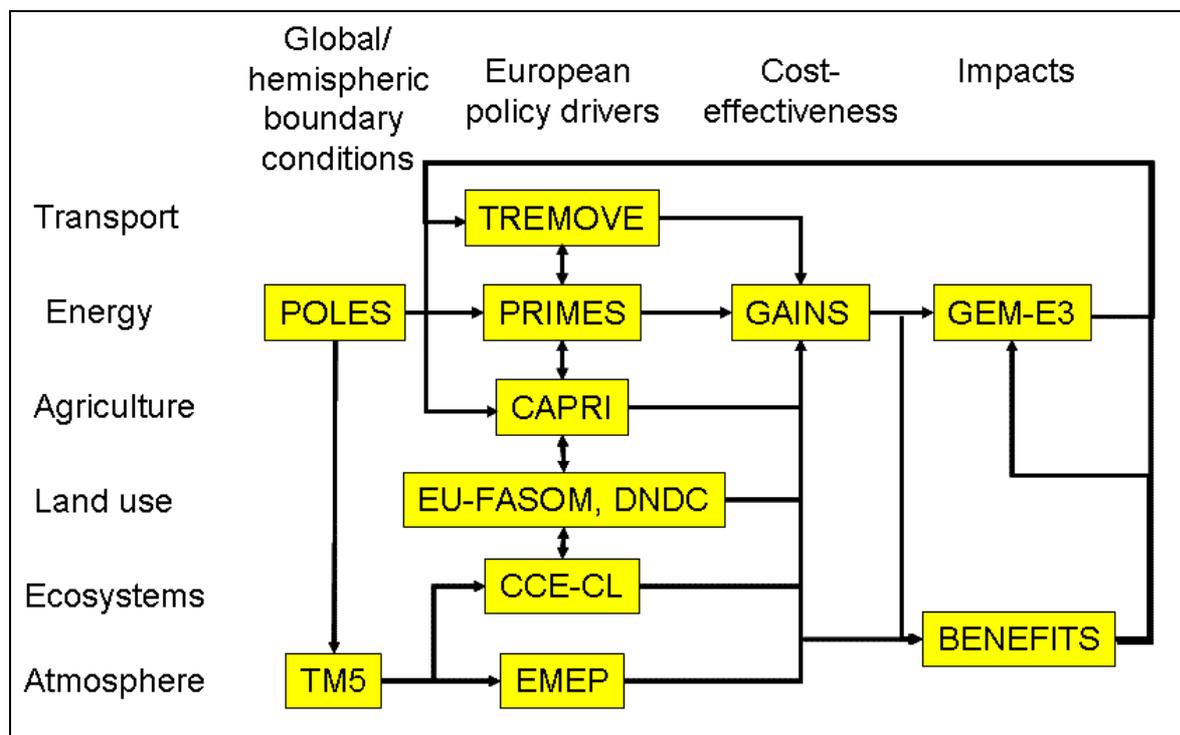


Figure 9 : La chaîne des modèles participant au projet EC4MACS (Source : IIASA²¹)

²¹ <http://www.ec4macs.eu/home/modelssystem.html?sb=4>

4.2 EVOLUTIONS EN COURS OU PREVUES

L'IIASA semble envisager la prise en compte de mesures du type « changement structurel » également dans le secteur de l'agriculture. De telles mesures ne sont pas encore prises en compte dans la version 1.0 du modèle sur laquelle des rapports méthodologiques sont actuellement disponibles.

L'IIASA semble également envisager d'élargir l'analyse d'options de réduction d'émissions de GES dans GAINS à d'autres secteurs, activités et mesures de dépollution que ceux pris en compte dans la version 1.0 du modèle.

4.3 POINTS A CLARIFIER AVEC L'IIASA

Les points suivants seront à clarifier avec l'IIASA.

4.3.1 Questions par rapport à certains éléments de la fonction d'objectifs

Violations des objectifs environnementaux

Dans les applications CAFE du modèle RAINS, des violations d'objectifs environnementaux étaient autorisées. L'IIASA a alors ajouté un terme dans la fonction d'objectifs pour minimiser, en plus des coûts, les violations des objectifs. Un troisième terme dans cette fonction d'objectifs était un artefact mathématique pour privilégier les solutions les plus stables. Le module d'optimisation cherchait donc à atteindre conjointement trois objectifs : minimisation des coûts totaux de réduction des émissions, minimisation des violations des objectifs environnementaux et stabilisation des solutions. Un coefficient multiplicatif était adjoint à chacun des termes de la fonction d'objectifs pour fixer l'importance relative de ces trois objectifs.

Les informations disponibles ne permettent pas de savoir si des violations d'objectifs sont toujours autorisées et si c'est le cas, comment cela est modélisé. Ce point est important dans la mesure où la façon exacte de fixer les coefficients pourrait avoir une influence sensible sur les résultats d'une optimisation. La réponse à cette question dépend probablement des applications spécifiques du modèle.

Concernant les modélisations NEC il doit être vérifié si l'optimisation a eu lieu par cellule, par pays ou sur la totalité de l'Europe. *A priori*, le choix de l'IIASA dépend des différents objectifs environnementaux.

Changements structurels

Tandis qu'il existe un rapport méthodologique décrivant le traitement des substitutions de combustibles, rien n'est dit sur la modélisation des augmentations d'efficacité de conversion d'énergie ou d'efficacité dans l'utilisation. Il n'est pas évident de savoir si le modèle prend en compte des améliorations d'efficacité d'autres technologies et de techniques de dépollution. Enfin, il n'est pas clair si l'approche du « climate penalty term » (modélisation des coûts liés à un prix de carbone exogène) s'applique également à la modélisation d'éventuels instruments économiques pour la PA.

Concernant ce « climate penalty term » il est spécifié dans le rapport de l'IASA décrivant l'optimisation dans GAINS qu'il sert à assurer que l'optimisation va sélectionner toutes les possibilités de réduction de GES qui se trouvent dans le modèle et dont le coût est inférieur au prix exogène de carbone. La raison pour laquelle cette sélection ne peut pas avoir lieu dans le mode scénario n'est pas claire. Une question directement liée concerne l'éventuelle modélisation d'instruments économiques pour la pollution de l'air : fera-t-elle partie des analyses sous le mode scénario ou uniquement sous le mode optimisation ?

4.3.2 Questions par rapport à la modélisation des contraintes

Concernant la modélisation des contraintes (cf. la partie 2.4.4.2) pour le contrôle du NH₃ le rapport sur l'optimisation dans GAINS spécifie que certaines technologies sont regroupées dans des paquets de mesures de réduction de pollution. Aussi, des applicabilités sont définies pour les technologies individuelles dans ces paquets. L'application totale d'une technologie individuelle donnée est alors limitée à travers tous les paquets de technologies dans lesquelles cette technologie est présente.

Il doit être vérifié si cela veut dire que l'applicabilité maximale de toutes les techniques regroupées dans un paquet est elle égale à l'applicabilité de la technologie du paquet pour laquelle celle-ci est la moins élevée.

Dans GAINS, chaque secteur de combustion a une sous-structure individuelle correspondant aux différents types de chaudières. De façon simplificatrice, l'hypothèse est faite que les parts de ces sous-secteurs dans l'activité d'un secteur de combustion donné ne changent pas dans l'optimisation. Il doit être clarifié avec l'IASA pourquoi cette contrainte est utilisée et ce qu'elle implique pour le degré de réalisme du modèle.

Une possible contrainte supplémentaire et qui n'est pas mentionnée dans le rapport concerne les réductions d'émissions maximales qui sont techniquement réalisables (cf. le scénario MRR – réductions maximales sous le modèle RAINS – dans les rapports d'analyse de scénarios pour la révision de la Directive NEC). Ces réductions maximales devraient correspondre à une borne supérieure, qui serait évidemment modifiée lorsque des changements structurels ont lieu.

4.3.3 Questions diverses

Une question qui ne concernera que certaines utilisations du modèle se pose par rapport au concept du « gap closure ». Ce concept, sera-t-il modifié pour des applications sous GAINS pour prendre en compte le fait que la réduction maximale d'émissions ne sera plus égale à la réduction technique maximale, mais que des changements structurels peuvent conduire à des réductions supplémentaires ?

Concernant la quantification de l'exposition à l'ozone de la végétation, GAINS utilise-t-il l'indicateur AOT40 ? Ou se base-t-il plutôt sur l'indicateur SOMO35 et fait-il quantifier les impacts de l'ozone sur la végétation *ex post* dans des analyses des bénéfices ?

Dans plusieurs rapports sur le modèle GAINS l'IASA affirme identifier les potentiels de substitution de combustibles en se basant sur différents scénarios PRIMES. Le potentiel serait par exemple donné par la différence entre un scénario

PRIMES appliquant un prix de carbone de 20€/tonne de CO₂ et un autre modélisant un prix de carbone de 90€/tonne de CO₂. Il n'est pas évident de savoir comment GAINS évaluera alors les coûts de substitutions de combustibles à l'intérieur de ce qui est donné comme limite par des scénarios 'extrêmes' PRIMES. Il est également à clarifier si cette approche s'applique uniquement aux substitutions de combustibles ou également à certains autres types de changements structurels (e.g. mesures conduisant à une réduction de la demande d'énergie finale).

A un moment l'IIASA semblait envisager une modification de l'approche d'optimisation dans GAINS. Au lieu de mesures individuelles plutôt des paquets de mesures seraient modélisés dans le domaine de l'énergie. Aucune information n'est disponible sur la question et celle de ses impacts sur l'approche d'optimisation dans sa totalité.

RÉFÉRENCES

- AEA (2008): 'Analysis of the Costs and Benefits of Proposed Revisions to the National Emission Ceilings Directive', NEC CBA Report 3. National Emission Ceilings for 2020 based on the 2008 Climate & Energy Package, AEA Energy & Environment, London.
- Agren, C.; Grennfelt, P.; Johansson, M.; Maas, R.; Schucht, S. et White, L. (2007) : 'Assessment of similarities and differences between the GAINS and the RAINS models; review of GAINS – Conclusions of the review group', <http://www.iiasa.ac.at/rains/reports/gains-review.pdf>
- Amann, M.; Bertok, I.; Cofala, J.; Heyes, C.; Klimont, Z.; Rafaj, P.; Schöpp, W. et Wagner, F. (2008a) : 'NEC Scenario Analysis Report Nr. 6 - National Emission Ceilings for 2020 based on the 2008 Climate & Energy Package', IIASA, juillet 2008, Laxenburg/Autriche.
- Amann, M.; Höglund-Isaksson, L.; Winiwarter, W.; Tohka, A.; Wagner, F.; Schöpp, W.; Bertok, I. et Heyes, C. (2008b) : 'Emission scenarios for non-CO2 greenhouse gases in the EU-27 – Mitigation potentials and costs in 2020', final report, May 2008, IIASA.
- Amann, M.; Asman, W.; Bertok, I.; Cofala, J.; Heyes, C.; Klimont, Z.; Rafaj, P.; Schöpp, W. et Wagner, F. (2007a) : 'Cost-optimized reductions of air pollutant emissions in the EU Member States to address the environmental objectives of the Thematic Strategy on Air Pollution', NEC Scenario Analysis Report Nr. 3, April 2007, IIASA.
- Amann, M.; Asman, W.; Bertok, I.; Cofala, J.; Heyes, C.; Klimont, Z.; Schöpp, W. et Wagner, F. (2007b) : 'Cost-effective Emission Reductions to meet the Environmental targets of the Thematic Strategy on Air Pollution under Different Greenhouse Gas Constraints', NEC Scenario Analysis Report Nr. 5, June 2007, IIASA.
- Höglund-Isaksson, L. et Mechler, R. (2005) : 'The GAINS Model for Greenhouse Gases – Version 1.0: Methane (CH₄)', IIASA Interim Report IR-05-54, October 2005, IIASA.
- ISSC/NTUA (2005): 'PRIMES model – Version 2 Energy System Model: Design and features', ICS/NTUA.
- Klaassen, G.; Amann, M.; Berglund, C.; Cofala, J.; Höglund-Isaksson, L.; Heyes, C.; Mechler, R.; Tojka, A.; Schöpp, W. et Winiwarter, W. (2004) : 'The Extension of the RAINS Model to Greenhouse Gases', IIASA Interim Report IR-04-015, April 2004, IIASA.
- Klaassen, G.; Berglund, C. et Wagner, F. (2005) : 'The GAINS Model for Greenhouse gases – Version 1.0: Carbon Dioxide (CO₂)', IIASA Interim Report IR-05-053, October 2005, IIASA.
- Klimont, Z.; Cofala, J.; Bertok, I.; Amann, M.; Heyes, C.; et Gyarmas, F. (2002): 'Modelling Particulate Emissions in Europe – A Framework to Estimate Reduction Potential and Control Costs', Interim report IR-02-076, IIASA.

- MNP (2006) : 'Integrated modelling of global environmental change. An overview of IMAGE 2.4', Edited by A.F. Bouwman, T. Kram and K. Klein Goldewijk, Netherlands Environmental Assessment Agency (MNP), Bilthoven, The Netherlands.
- Soleille, S. ; Brignon, J.-M. ; Farret, R. ; Landrieu, G. Le Gall, A.-C. et Rouïl, L (2003) : 'L'IIASA et la modélisation intégrée de la pollution atmosphérique transfrontière – bilan et évaluation', rapport final, rapport INERIS DRC/MECO – 2003 - 45981/note_IIASA, 16 septembre 2003.
- Tohka, A. (2005) : 'The GAINS Model for Greenhouse Gases – Version 1.0: HFC, PFC and SF₆', IIASA Interim Report IR-05-56, October 2005, IIASA.
- Wagner, F. ; Amann, M. et Schöpp, W. (2007) : 'The GAINS Optimization Module as of 1 February 2007', IIASA Interim Report IR-07-004, february 2007, IIASA.
- Wagner, F. ; Schöpp, W. et Heyes, C. (2006) : 'The RAINS optimization module for the Clean Air for Europe (CAFE) Programme', IIASA Interim Report IR-06-029, September 2006, IIASA.
- Winiwarter, W. (2005) : 'The GAINS Model for Greenhouse Gases – Version 1.0: Nitrous Oxide (N₂O)', IIASA Interim Report IR-05-55, October 2005, IIASA.