

COMMISSION ÉCONOMIQUE POUR L'EUROPE
Genève

Etudes sur la pollution atmosphérique — 1

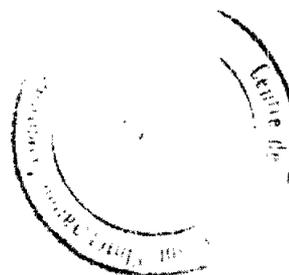
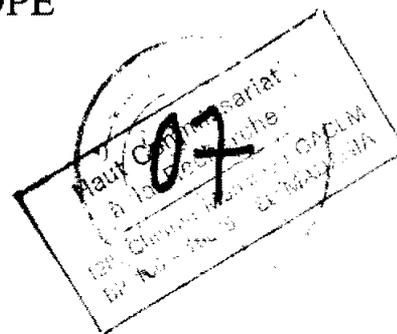
LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE PAR LE SOUFRE

Ses effets et la lutte anti-pollution

*Rapport rédigé dans le cadre de la
Convention sur la pollution atmosphérique
transfrontière à longue distance*

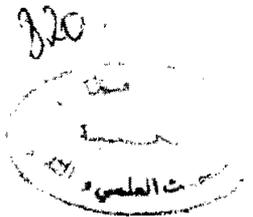


NATIONS UNIES
New York, 1984





ECE/EB.AIR/2



PUBLICATION DES NATIONS UNIES
Numéro de vente : F.84.II.E.8

TABLE DES MATIERES

PREFACE

RESUME

PREMIERE PARTIE

EFFETS DES COMPOSES SULFUREUX ET DES AUTRES FACTEURS POLLUANTS ATMOSPHERIQUES SUR LA SANTE DE L'HOMME ET L'ENVIRONNEMENT

Paragrapes

I.	EFFETS DES COMPOSES SULFUREUX SUR LES ECOSYSTEMES AQUATIQUES	1 - 98
	A. Emissions	3 - 5
	B. Retombées	6 - 9
	C. Influences géochimiques, biologiques et hydrologiques sur l'acidification des eaux	10 - 22
	a) Interactions avec la couverture végétale	11
	b) Acide carbonique	12
	c) Absorption et libération des ions par la végétation et les sols	13 - 14
	d) Altération par les agents atmosphériques	15
	e) Réactions du soufre	16 - 17
	f) Réactions de l'azote	18
	g) Acides organiques	19 - 20
	h) Mobilisation des oligo-éléments et des métaux	21
	i) Hydrologie	22
	D. Effets sur les écosystèmes aquatiques	23 - 84
	a) Effets des apports acides sur la chimie de l'eau	23 - 35
	i) Episodes dans les eaux courantes	31 - 32
	ii) Historique de l'acidification des eaux douces	33 - 35
	b) Relations entre les retombées des composés sulfureux et le pH de l'eau douce	36 - 46
	c) Effets de l'acidification de l'eau sur les éléments du biotope	47 - 55
	i) Effets sur les micro-organismes	48
	ii) Effets sur les plantes	49 - 50
	iii) Effets sur les macro-invertébrés aquatiques	51 - 54
	iv) Effets sur les amphibiens	55
	d) Effets sur les populations de poissons	56 - 80
	i) Observations sur le terrain	56 - 69
	ii) Effets de l'eau acide sur les poissons	70 - 76
	iii) Mécanismes de la détérioration des pêcheries	77 - 80
	e) Effets sur les oiseaux et les mammifères	81 - 84
	E. Conclusions et recommandations concernant les effets des composés sulfureux sur les écosystèmes aquatiques	85 - 95
	F. Recherches à entreprendre sur les effets des composés sulfureux sur les écosystèmes aquatiques	96 - 98
II.	EFFETS DES COMPOSES SULFUREUX SUR LES SOLS, LES EAUX SOUTERRAINES ET LA VEGETATION	99 - 163
	A. Evaluation des effets des composés sulfureux	104 - 143
	a) Effets sur le sol	104 - 126
	i) Effets sur le pH et l'acidité du sol	106 - 108
	ii) Effets sur la disponibilité d'anions mobiles et sur le lessivage des cations	109 - 119

Paragrapbes

iii)	Effets sur la faune et la flore du sol et sur les activités de décomposition et de minéralisation	120 - 122
iv)	Effets sur la mobilisation et la toxicité des oligo-éléments et des métaux	123 - 126
b)	Effets sur les eaux souterraines	127 - 134
i)	Acidité accrue des eaux souterraines	127 - 129
ii)	Contamination par les métaux	130 - 134
c)	Effets sur la végétation	135 - 143
B.	Conclusions et recommandations concernant les effets des composés sulfureux sur les sols, les eaux souterraines et la végétation	144 - 161
C.	Plans de projets de recherche sur les effets des composés sulfureux sur les sols, les eaux souterraines et la végétation	162 - 163
a)	Effets directs des polluants sur la croissance végétale	
b)	Taux et effets des retombées acides	
III.	EFFETS DES COMPOSÉS SULFUREUX SUR LES MATÉRIAUX, Y COMPRIS LES MONUMENTS HISTORIQUES ET CULTURELS	164 - 262
A.	Mécanismes de la corrosion atmosphérique	167 - 185
a)	Influence de différents composés du soufre	168 - 171
b)	Influence des autres polluants	172 - 182
c)	Influence des facteurs météorologiques	183
d)	Effets de seuil	184 - 188
B.	Effets des composés sulfureux sur différents matériaux et relations dose-réponse	180 - 219
a)	Effets sur les métaux	189 - 198
i)	Aciers au carbone non revêtus	193 - 196
ii)	Zinc et acier galvanisé	197 - 200
iii)	Nickel et acier nickelé	201
iv)	Acier inoxydable	202
v)	Matériaux contenant du cuivre	203 - 204
vi)	Matériaux contenant de l'aluminium	205
b)	Effets sur les matériaux de construction, notamment le grès, le calcaire et le béton	206 - 211
c)	Effets sur d'autres matériaux : peintures, matières plastiques, caoutchouc, etc.	212 - 217
d)	Effets sur les produits et le matériel industriels	218 - 219
C.	Coût des dégâts matériels	220 - 232
D.	Effets de l'acidification des eaux et des sols sur la corrosion des matériaux	233 - 238
E.	Activités de recherche en cours aux niveaux national et international sur les effets des composés sulfureux sur les matériaux	239 - 241
F.	Conclusions et recommandations concernant les effets des composés sulfureux sur les matériaux, y compris les monuments historiques et culturels	242 - 253
G.	Plans d'exécution de projets de recherche sur les effets des composés sulfureux sur les matériaux, y compris les monuments historiques et culturels	254 - 262

IV.	EFFETS DES COMPOSES SULFUREUX ET DES AUTRES POLLUANTS ATMOSPHERIQUES SUR LA SANTE	263 - 351
	1. Epidémiologie	
	A. Méthodes épidémiologiques	267 - 278
	B. Polluants atmosphériques	279 - 286
	a) Généralités	279 - 282
	b) Mesure des polluants	283 - 286
	C. Examen des études publiées	287 - 320
	a) Composés sulfureux et particules en suspension	287 - 300
	i) Mortalité	287 - 296
	ii) Morbidité	297 - 300
	b) Oxydes d'azote	301 - 320
	i) Etudes sur l'animal	301
	ii) Etudes sur l'homme	302 - 304
	iii) Etudes épidémiologiques sur la pollution extérieure	305 - 312
	iv) Etudes faites dans les habitations	313 - 320
	D. Conclusion	321 - 323
	2. Calcul du coût des dommages causés à la santé	
	A. Evaluation de la santé d'après les gains	330 - 333
	B. Effets sur les services de santé	334 - 339
	C. Le coût de la santé en Europe - Un exemple récent	340 - 348
	D. Conclusions et recommandations	349 - 351
V.	EFFETS DES COMPOSES SULFUREUX ET D'AUTRES POLLUANTS ATMOSPHERIQUES SUR LA VISIBILITE	352 - 430
	A. Définition de la dégradation de la visibilité	361 - 365
	B. Observations, mesures modèles	366 - 381
	a) Techniques traditionnelles et modernes d'observation de la visibilité	366 - 368
	b) Efficacité des techniques de mesure actuelles	369 - 372
	c) Observation de la visibilité par satellite	373
	d) Modèles de visibilité	374 - 381
	C. Les causes de dégradation et leurs effets	382 - 402
	a) Sources naturelles et sources artificielles	382 - 387
	b) Effets de différentes catégories de sources sur la visibilité	388 - 389
	c) Activités industrielles, transport à longue distance	390 - 392
	d) Influence des sulfates et des aérosols	393 - 402
	D. Relations dose-effet et examen des paramètres météorologiques	403 - 412
	E. Niveaux et tendances dans différentes régions	413 - 418
	F. Conclusions	419 - 430

DEUXIEME PARTIE

TECHNIQUES DE LUTTE ANTIPOLLUTION

Paragrapes

I.	REDUCTION DE LA TENEUR EN SOUFRE DES COMBUSTIBLES POUR LUTTER CONTRE LES EMISSIONS DE SOUFRE	431- 475
A.	Procédés de désulfuration du charbon	431 - 442
a)	Epuration physique du charbon	431 - 439
b)	Epuration chimique du charbon	440 - 442
B.	Procédés de désulfuration du gaz	443 - 446
C.	Désulfuration des combustibles liquides	447 - 475
a)	Désulfuration des fuels résiduels	450 - 464
b)	Désulfuration de combustibles liquides non conventionnels	465 - 467
i)	Huile lourde/bitume	468 - 469
ii)	Charbon	470 - 472
iii)	Schiste bitumineux	473 - 475
II.	MODIFICATION DES PROCÉDES DE COMBUSTION POUR REDUIRE LES EMISSIONS DE SOUFRE	476 - 493
A.	Combustion en lit fluidisé	476 - 490
a)	Lit fluidisé à la pression atmosphérique	480
i)	Lit fluidisé à la pression atmosphérique de type classique	481
ii)	Lit fluidisé rapide	482
b)	Combustion en lit fluidisé sous pression	483 - 487
c)	Evaluation des coûts	488 - 490
B.	Procédé à additif sec	491
C.	Combustion de charbon pulvérisé	492
D.	Combustion de la houille sur une grille	493
III.	DESULFURATION DES GAZ DE COMBUSTION DANS LA LUTTE CONTRE LES EMISSIONS SULFUREUSES	494 - 543
A.	Procédés sans récupération	504 - 523
a)	Le procédé à la chaux et au calcaire	504 - 517
b)	Le procédé à la lessive de soude	518 - 519
c)	Le procédé de double traitement alcalin	520 - 521
d)	Le procédé à l'acide sulfurique dilué	522 - 523
B.	Procédés de récupération	524 - 533
a)	Procédé à l'oxyde de magnésium	524 - 529
b)	Procédé au sulfite de sodium (Wellman-Lord)	530 - 532
c)	Procédé au carbonate aqueux	533
C.	Procédés à sec	534 - 538
D.	Elimination simultanée du SO ₂ et des NO _x	539 - 543
IV.	L'UTILISATION DES MATIERES RECUPEREES ET L'EVACUATION DES DECHETS PRODUITS PAR LES PROCÉDES DE DESULFURATION	544 - 558
A.	Utilisation du soufre	546 - 548
B.	Utilisation du gypse	549 - 551
C.	Evacuation des déchets	552 - 558

V.	EFFICACITE TECHNIQUE ET COÛT DES TECHNIQUES DE LUTTE CONTRE LES EMISSIONS SULFUREUSES	559 - 588
A.	Coût-efficacité des différentes techniques de désulfuration	564 - 587
a)	Désulfuration du charbon	564
b)	Désulfuration du gaz	565 - 566
c)	Désulfuration des combustibles liquides	567 - 572
d)	Modification des procédés de combustion	573 - 578
e)	Désulfuration des gaz de combustion	579 - 581
f)	Combinaisons optimales de plusieurs techniques de désulfuration	582 - 586
g)	Résumé	587
B.	Conclusions	588

TROISIEME PARTIE

I.	DEMARCHE METHODOLOGIQUE ET BESOINS EN DONNEES	589 - 710
A.	L'analyse coûts-avantages et l'environnement en période de difficulté économique	590 - 594
B.	Nature de l'analyse coûts-avantages	595 - 639
a)	Principes de base	595 - 603
b)	Valeurs et prix	604 - 613
c)	La question de la répartition	614 - 622
d)	Temps et actualisation	623 - 631
e)	Incertitude	632 - 638
f)	Résumé schématique de l'analyse coûts-avantages	639
C.	L'analyse coûts-avantages dans le contexte d'une étude sur le SO _x	640 - 709
a)	Le modèle total : introduction	640 - 642
b)	Effets sur la santé	643 - 662
i)	Relations dose-réponse pour la santé	643 - 651
ii)	Evaluation des effets sur la morbidité	652 - 657
iii)	Evaluation des effets sur la mortalité	658 - 662
c)	Effets matériels	663 - 677
i)	Pollution et épuration	663
ii)	Estimation de la corrosion	664 - 666
iii)	Evaluation des effets matériels	667 - 677
a)	Effets directs sur la productivité	667 - 675
b)	Effets sur les monuments historiques	676 - 677
d)	Effets sur les écosystèmes aquatiques	678 - 690
i)	Fonctions de dommage aquatique	678 - 679
ii)	Evaluation des effets aquatiques	680 - 690
e)	Effets sur la végétation	691 - 703
i)	Modèles de réponse biologique	691 - 693
ii)	Evaluation des effets sur les cultures	694 - 699
iii)	Evaluation des effets sur les forêts	700 - 703
f)	Effets sur le paysage	704 - 709
D.	Résumé de la méthodologie applicable à l'étude coûts-avantages sur le SO _x	710
E.	Notes techniques	711 - 759
a)	Classement des projets dans une analyse coûts-avantages	712
b)	Prix et valeurs sociales réelles	713 - 715
c)	Explications détaillées de l'analyse coûts-avantages contingente	716 - 719

Paragraphes

d) Systèmes de pondération distributionnelle	720 - 723
e) Détermination d'un taux d'actualisation	724
f) Evaluation probabiliste de l'incertitude	725 - 740
g) Seuils et relations dose-réponse	741 - 744
h) Evaluation de la dégradation des monuments historiques	745 - 756
i) Etude du prix des logements	757 - 759
II. EXEMPLE DE METHODE PROBABILISTE D'ANALYSE COUTS-AVANTAGES APPLIQUEE A DIFFERENTS SCENARIOS DE REDUCTION DES EMISSIONS SULFUREUSES	760 - 795
A. Le modèle de démonstration	765 - 775
a) Végétation	770
b) Matériaux	771 - 772
c) Mortalité	773 - 775
B. Résultats nominaux et analyse de sensibilité	776 - 781
C. Analyse probabiliste	782 - 787
D. Analyse des décisions	788 - 790
E. Evaluations contingentes	791 - 793
F. Utilité de recherches plus approfondies	794
G. Schéma récapitulatif	795

PREFACE

Les parties contractantes et les signataires de la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance ont, entre autres tâches, l'évaluer les effets de la pollution atmosphérique sur l'environnement, d'estimer l'efficacité technique et le coût de la lutte contre les émissions polluantes, ainsi que d'analyser les coûts et avantages de différents programmes de lutte contre ces émissions.

Lorsque la Convention a été signée en 1979, on a reconnu que si la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance était due à différentes substances qui pouvaient avoir des effets nuisibles, il n'en fallait pas moins se préoccuper en priorité des composés sulfureux provenant de l'activité de l'homme et considérés comme étant les principaux responsables de l'acidification récente de l'environnement d'une bonne partie de la région de la CEE.

C'est pourquoi, en 1980, l'Organe exécutif intérimaire de la Convention a pris l'initiative de charger un groupe de travail d'examiner les effets des composés sulfureux sur l'environnement. L'établissement de documents sur l'efficacité technique et le coût des techniques de lutte contre les émissions sulfureuses a été confié au Groupe de travail des problèmes de la pollution de l'air et une réunion spéciale sur l'analyse des coûts et avantages de la lutte contre les émissions sulfureuses a été convoquée pour examiner ces travaux.

Ces activités se sont achevées en 1982 et les rapports techniques qui en sont issus ont été présentés en juin 1983 à la première session de l'Organe exécutif de la Convention, lequel a décidé de prendre acte des conclusions et recommandations et de faire distribuer les rapports techniques sous forme de publication, d'où le présent document. Le secrétariat de la CEE a procédé aux travaux d'édition nécessaires, tout en prenant soin de ne pas apporter de modifications majeures au texte des rapports techniques, dont il assume l'entière responsabilité.

L'entreprise de travaux de cette nature sous-entend qu'au fur et à mesure que s'accumulent les connaissances et que progressent les techniques, on puisse développer les conclusions qui en sont tirées. Pour tenir compte de ces données nouvelles, l'Organe exécutif de la Convention a prévu dans son plan de travail une mise à jour des connaissances sur les effets de la pollution, l'évaluation des techniques de lutte anti-pollution et une analyse des coûts et avantages de la lutte contre les émissions sulfureuses. C'est dans cette perspective que la présente publication fait le point des connaissances en 1983.

RESUME

Les parties contractantes et les signataires de la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance ont tous le souci de rechercher des politiques de prévention de la pollution due aux émissions sulfureuses. C'est ainsi que l'étude des effets de la pollution, l'évaluation des techniques de lutte et les méthodes d'analyse économique sont devenues les principaux éléments d'un programme d'activités communes. Les informations sur les effets (relations dose-réponse) et les données sur l'efficacité technique et économique des techniques de désulfuration ou autres mesures de lutte anti-pollution sont indispensables au calcul des coûts et avantages des différentes options permettant de rationaliser les choix et les prises de décisions. Dans la présente publication, sont reproduits les études et les rapports sur les travaux effectués dans le cadre de la Convention.

EFFETS DES COMPOSES SULFUREUX

Les chapitres de la première partie qui traite des effets des composés sulfureux et autres polluants sur l'habitat naturel et sur certains éléments et certaines qualités de l'environnement illustrent les risques qu'entraînent les taux actuels de pollution atmosphérique due à l'activité de l'homme - et qui s'élèveront peut-être encore. On sait maintenant que les dommages ne s'expliquent pas seulement par une exposition épisodique directe à de fortes concentrations de polluants, mais aussi par des interactions synergiques ou par un contact avec des concentrations même très faibles. Il est d'autant plus urgent d'agir que se multiplient les indications montrant que les effets secondaires insidieux contribuent par ricochet pour beaucoup à des phénomènes écologiques comme la disparition de poissons en un lieu donné et le dépérissement des forêts.

Ecosystèmes aquatiques

Pour ce qui est des effets sur les écosystèmes aquatiques, on s'est aperçu que dans les zones sensibles d'Europe et d'Amérique du Nord, les retombées atmosphériques actuelles d'agents d'acidification atteignent un taux auquel ils exerçaient des effets nuisibles sur la chimie de l'eau et par conséquent sur la vie aquatique. Il est reconnu que les composés sulfureux jouent un rôle décisif dans l'acidité de l'eau douce dans les régions vulnérables et, sur de grandes étendues de l'hémisphère nord, plus de 90 pour cent des composés sulfureux de l'air peuvent être attribués à des émissions dues à l'activité de l'homme. Il a été prouvé toutefois que les composés azotés pouvaient aussi jouer un rôle important dans les événements de courte durée et, si les émissions continuent d'augmenter, l'acide nitrique qui n'est pas absorbé dans l'écosystème intensifiera à long terme l'acidification des eaux superficielles. Des enquêtes scientifiques ont montré que le lessivage des acides organiques provenant de la végétation et du sol ne peut expliquer à lui seul l'acidification récente.

En réalité, les effets des retombées acides sur la chimie de l'eau sont liés aux interactions géochimiques, biologiques et hydrologiques des bassins versants récepteurs. Des observations faites en Suède, en Norvège et au Canada, par exemple, montrent que, dans les régions sensibles recevant une quantité de soufre inférieure à 5 kg par hectare et par an - avec une alcalinité des lacs inférieure à 50 $\mu\text{c}q/l$ - les lacs ne subissent pas d'acidification durable. On a constaté une corrélation entre les changements observés dans la vie aquatique et les changements de l'acidité des lacs et des cours d'eau, un faible pH contribuant à diminuer considérablement la diversité des organismes. C'est pourquoi la baisse du taux de reproduction des amphibiens dans les étangs d'eau de fusion acide et ses conséquences possibles sur leurs populations ont retenu très tôt l'attention.

On trouvera citée toute une série de rapports sur les dommages effectifs. Ainsi, dans le sud de la Norvège, des études régionales portant sur 5.000 lacs d'un territoire de 28.000 km² ont montré que 1.750 d'entre eux avaient perdu tous leurs poissons et que 900 autres étaient gravement atteints. La diminution des populations de poissons s'est poursuivie avec un taux de retombées constant tout au long des années 1970. En se fondant sur la chimie des lacs, on estime que les pêcheries de 18.000 lacs dont le pH est inférieur à 5,5 sont maintenant atteintes. Dans l'Ontario (Canada), quelque 50.000 lacs situés sur des terrains granitiques reçoivent plus de 7 kg de soufre par hectare et par an et, sur 2.500 lacs étudiés dans cette région, 20 pour cent avaient une alcalinité inférieure à 40 µc/l. Au Québec, la région sensible est encore plus étendue. Compte tenu de l'évolution observée dans les pays scandinaves, on pense que ces lacs subiront une acidification au cours des prochaines décennies. La disparition du saumon est signalée dans plusieurs cours d'eau de l'est du Canada; et dans le nord-est des Etats-Unis, on signale la disparition de certaines espèces de poissons dans une centaine de lacs.

La mobilisation de l'aluminium est une conséquence importante des retombées d'acide sur la chimie de l'eau et les conditions de vie aquatiques. Il ressort clairement des observations faites que l'association de pointes de concentration d'aluminium avec des épisodes acides dans les cours d'eau et les lacs est l'un des principaux facteurs qui contribuent au déclin des populations de poissons.

En l'état actuel des connaissances, tout le monde s'accorde à penser que toute diminution des retombées de substances acidifiantes entraînerait une amélioration sensible des écosystèmes aquatiques vulnérables. C'est pourquoi la réduction des retombées de soufre devrait être un objectif prioritaire. Une diminution des retombées de composés azotés aurait aussi un effet bénéfique pour les eaux superficielles.

Sols, eaux souterraines et végétation

Les effets des composés sulfureux sur les écosystèmes terrestres ont aussi fait l'objet de recherches approfondies. On a constaté que les émissions sulfureuses, essentiellement sous forme de SO₂ gazeux et de SO₂⁻ pulvérulent pouvaient endommager la végétation, directement - en affectant le feuillage et les tiges - et indirectement - en influençant l'environnement racinaire. Par le passé, on se préoccupait essentiellement des concentrations de soufre qui provoquaient des lésions visibles, mais l'expérience a montré qu'une exposition prolongée à de faibles concentrations pouvait avoir pour effets de limiter la croissance et de réduire la résistance de communautés végétales, comme le montrent les exemples suivants. Ainsi, les dommages aux forêts de pins observés au Canada ont été associés à des concentrations de SO₂ de l'ordre de 45 µg/m³ pendant la période de croissance. On a signalé des effets analogues en Tchécoslovaquie, ainsi que des diminutions de croissance sans lésions visibles chez certaines espèces de pins en URSS, dans des localités où la concentration de SO₂ était voisine de 20 µg/m³.

Il est fait observer que l'Union internationale des instituts de recherche forestières (IUFRO) était d'avis que, pour assurer leur protection complète, les forêts de sapins et d'épicéas en haute montagne et dans les zones boréales ne devaient pas être exposées à des concentrations annuelles moyennes de SO₂ dépassant 25 µg/m³.

L'attention des lecteurs est appelée sur la constatation faite que l'interaction dans l'atmosphère, ainsi que sur la plante même, entre le soufre et d'autres polluants - tels que les oxydes d'azote, l'ozone, les fluorures et quelques métaux lourds - et le "stress" de l'environnement, réduisent souvent

les concentrations minimales de SO₂ nécessaires pour déclencher des lésions chez les plantes. Selon certaines indications, il semblerait que la croissance des arbres peut être ralentie avec des concentrations moyennes annuelles de SO₂ ne dépassant pas 25-50 µg/m³, (mais avec parfois des pointes de 100-200 µg/m³). De telles conditions existent dans une grande partie de l'Europe. Certaines expériences ont montré que les rendements en grain et paille des cultures d'orge ont régulièrement baissé de plus de 25 pour cent dans des atmosphères contenant environ 60 µg de SO₂ par m³. On s'est aperçu - constatation sur laquelle on insiste - que les pointes de brève durée de concentrations élevées de SO₂ pouvaient causer des dommages disproportionnés lorsqu'elles coïncidaient avec les périodes sensibles du développement des plantes.

Si les retombées acides augmentent l'acidité produite dans les sols par les processus naturels, on a aussi relevé que, lorsque les précipitations traversaient une couverture végétale de conifères, leur acidité pouvait s'accroître considérablement. Il existe de vastes régions de forêts et de végétation naturelle sur des sols acides (par exemple, les podzols) qui recouvrent des roches soumises à une altération lente. Il est peu probable que le pH de ces sols soit sensiblement modifié par les retombées acides, mais ces sols peuvent être le siège d'une mobilisation d'aluminium et de métaux lourds et subir un lessivage de réserves importantes de cations. En République fédérale d'Allemagne, dans des sols à fortes concentrations d'aluminium et de métaux lourds sous forme mobilisée, le dépérissement de l'épicéa a été associé à la détérioration des racines servant à son alimentation. Comme de vastes régions de sylviculture du Canada et du nord de l'Europe sont situées sur des sols relativement pauvres, la perte accrue de quantités même faibles de cations par le sol pourrait affecter d'une façon appréciable sa fertilité à long terme, ce qui constitue un sujet de grande préoccupation. En de nombreux points de l'Europe centrale, il apparaît déjà que la carence en magnésium s'est aggravée.

L'acidification des eaux souterraines est une autre conséquence néfaste signalée par de nombreux pays. Dans certaines régions soumises aux retombées acides, le pH des eaux souterraines est inférieur à 4,5 et les concentrations d'aluminium, de cuivre, de zinc et de cadmium sont souvent 10 à 100 fois plus élevées que dans les eaux souterraines neutres. Des études au lysimètre indiquent que ces concentrations augmentent rapidement lorsque le pH descend en dessous de 4,5. Les eaux acides (eaux souterraines, eaux superficielles, pluie et neige) peuvent lessiver le cuivre, le plomb et le cadmium des citernes et des conduites d'eau et les concentrations de ces éléments dépassent parfois les normes de l'Organisation mondiale de la santé applicables à l'eau de boisson.

Matériaux, y compris les monuments historiques et culturels

On a étudié les effets corrosifs et érosifs des composés sulfureux, surtout sur les matériaux ayant une certaine importance économique et technique. En ce qui concerne la corrosion à l'air libre, ces matériaux comprennent l'acier au carbone, l'acier galvanisé (acier zingué), l'acier peint, le nickel, le cuivre, le grès calcaire, le calcaire et le marbre. En ce qui concerne la corrosion à l'intérieur des bâtiments, les effets corrosifs les plus importants ont été relevés sur les matériaux des contacts électriques. On a reconnu par ailleurs que les composés sulfureux présents dans l'atmosphère contribuaient aussi à causer de graves dommages aux monuments et bâtiments historiques en grès, en calcaire et en marbre, ainsi qu'à d'autres objets altérables du patrimoine culturel qui avaient souvent une grande valeur culturelle et historique.

BIBLIOTHEQUE DU CERIST

Selon le matériau, les effets corrosifs sont plus ou moins bien connus. Des relations dose-réponse entre la vitesse de corrosion et la concentration de composés sulfureux sont maintenant établies pour certains des matériaux le plus couramment utilisés, comme l'acier au carbone et le zinc. La corrosion atmosphérique des matériaux est un processus complexe qui dépend de l'interaction du niveau de pollution et de facteurs météorologiques. Il est très difficile de formuler des relations dose-réponse valables pour tous les microclimats, mais, pour des raisons pratiques, certaines relations simplifiées sont acceptables. Malgré les incertitudes qui les entachent, ces données ont été d'un grand intérêt et d'une grande utilité pour l'analyse coûts-avantages, comme base pour la prise de décisions visant à diminuer les émissions de soufre. Un certain nombre d'études nationales et internationales ont montré que les pertes économiques dues à la corrosion atmosphérique causée par les composés sulfureux étaient considérables. Dans certaines études effectuées pendant les années 1970, on a estimé que ces pertes étaient de l'ordre de 2 à 10 dollars des Etats-Unis par habitant et par an, soit de 0,10 à 0,23 pour cent du produit national brut. On a noté par ailleurs que l'acidification du sol et des eaux souterraines et superficielles pouvait également accélérer la corrosion de certaines constructions. C'est le cas notamment des canalisations d'eau en cuivre et en métal galvanisé.

Santé

Une étude effectuée par l'Organisation mondiale de la santé donne un aperçu des recherches effectuées pour évaluer le coût des effets à long terme de la pollution atmosphérique sur la santé. Plusieurs types de données concernant la santé pouvant servir à évaluer le coût des effets des polluants sont examinés. Dans l'analyse des méthodes d'évaluation possibles et de leurs limites, l'accent est mis tout particulièrement sur la nécessité, dans le cadre de l'évaluation des effets des composés sulfureux sur la santé, de bien saisir ce qui se passe à de faibles concentrations et de souligner les conséquences à long terme plutôt que tel ou tel phénomène grave, mais ponctuel. Il a été suggéré de décourager l'utilisation des résultats épidémiologiques à des fins autres que celles pour lesquelles les études épidémiologiques avaient été conçues. Il faudrait réunir des données appropriées au calcul du coût de la santé parallèlement aux données aérométriques pertinentes en respectant des protocoles rigoureux élaborés en collaboration par des économistes et des épidémiologistes.

Visibilité

Un rapport établi par l'Organisation météorologique mondiale appelle l'attention sur le fait que, d'après les études réalisées, il existe un lien certain entre les sulfates et la dégradation de la visibilité. On estime qu'en raison de la fréquence des baisses de visibilité dues aux aérosols sulfatés, il faut envisager une stratégie internationale de lutte contre la pollution, axée sur la réduction des sulfates, pour éviter une nouvelle détérioration de la visibilité ou essayer d'améliorer la visibilité actuelle.

TECHNIQUES DE LUTTE

Les techniques de désulfuration font depuis longtemps l'objet d'un vaste échange d'informations à l'échelon international; la Commission économique pour l'Europe a organisé sur la question trois séminaires qui ont été le point de départ d'activités menées dans le cadre de la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance. Les documents présentés dans

la deuxième partie de la présente publication décrivent et analysent plusieurs méthodes de lutte contre les émissions sulfureuses. L'attention des lecteurs est appelée tout particulièrement sur les méthodes permettant de réduire la teneur en soufre des combustibles et des gaz de combustion et de modifier les procédés de combustion. Il est aussi fait état de l'utilisation éventuelle des matières récupérées et de l'évacuation sous contrôle des déchets produits par les procédés de désulfuration.

Il ressort de cette analyse qu'il existe des techniques permettant de réduire les émissions de soufre, le problème crucial étant celui de leur rapport coût/efficacité. Les informations disponibles sur l'efficacité technique et les coûts des techniques de lutte contre les émissions sulfureuses sont passés brièvement en revue. Il y a lieu d'appeler l'attention sur la conclusion qui en est tirée, à savoir que si les données sur le rapport coût/efficacité des différentes techniques de désulfuration sont nécessaires, elles ne sont malgré tout pas suffisantes pour déterminer la combinaison de techniques de désulfuration la moins chère en fonction du niveau de réduction des émissions de soufre recherché. Ce travail pourrait se faire pays par pays de façon à pouvoir tenir compte des différences dans la demande totale d'énergie, la composition de l'approvisionnement énergétique, la qualité des combustibles fossiles, etc.

Les résultats des recherches indiquent qu'une application généralisée améliorerait le rapport coût/efficacité des techniques de désulfuration disponibles. Il semblerait, en outre que, du fait de l'évolution des structures de l'industrie du raffinage du pétrole sous l'effet des conditions du marché, la désulfuration en viendra à faire partie intégrante de la transformation des huiles résiduelles en combustibles légers. Les résidus à forte teneur en soufre provenant du raffinage pourraient alors être brûlés dans des centrales équipées pour la désulfuration des gaz de combustion ou par combustion en lit fluidisé. La désulfuration du fuel oil résiduel serait une stratégie complémentaire possible. L'utilisation différenciée des combustibles à faible et à forte teneur en soufre (affectation des combustibles à forte teneur en soufre aux installations équipées pour la désulfuration des gaz de combustion) pourrait jouer un rôle important dans la recherche des combinaisons optimales de techniques de désulfuration.

L'attention des lecteurs est appelée sur le fait que vu l'excellent rendement thermique et la forte capacité d'élimination du soufre de la combustion en lit fluidisé, l'adaptation de cette technique à des installations de plus grande puissance aurait probablement des répercussions très importantes sur le choix de la combinaison des procédés de désulfuration.

ANALYSE ECONOMIQUE

Les documents repris dans la dernière partie de la présente publication portent sur les méthodes d'analyse coûts-avantages de différents programmes possibles en matière de lutte contre les émissions sulfureuses dans la région de la CEE. Compte tenu de la nature des phénomènes à évaluer et de la zone géopolitique de son application, la méthode proposée a été conçue spécialement pour tenir compte de l'incertitude des faits scientifiques et de la subjectivité des évaluations sociales. C'est pourquoi cette méthode est axée sur la prise en compte d'avis scientifiques différents par le biais d'une analyse de probabilités conçue dans un cadre structuré. Par ailleurs, une analyse de sensibilité permet de déceler les incertitudes qui ont le plus d'importance pour les dirigeants.

Les grands principes et la structure du modèle utilisé pour l'analyse sont examinés dans leurs grandes lignes et la présentation est accompagnée d'une série de notes techniques décrivant en détail les principaux problèmes et les techniques à suivre pour les résoudre.

La méthodologie proposée est liée aux activités suivantes :

- évaluation des émissions d'oxyde de soufre dans chaque pays membre de la CEE;
- mise au point d'un nombre limité de scénarios pour la lutte contre les émissions de SO_x dans la région de la CEE;
- évaluation, à partir des projections d'émissions de SO_x , des concentrations de SO_x dans l'atmosphère, ainsi que des taux x de retombées de composés x sulfureux par un modèle de dispersion;
- estimation, à partir du calcul des concentrations de SO_x et des taux de retombées de composés sulfureux, des dommages physiques causés à la santé, aux matériaux, aux écosystèmes aquatiques, à la végétation et à l'esthétique;
- évaluation du coût financier pour la société des dommages physiques provoqués par les émissions de soufre.

Il est fait observer qu'en évaluant les avantages, il faudrait tenir compte du fait que certains effets ne sauraient être quantifiés en termes monétaires. Ces effets ne devraient toutefois pas être oubliés et devraient être pris en compte dans l'analyse coûts/avantages en tant qu'éléments intangibles selon la procédure habituelle. L'approche probabiliste de l'analyse des coûts/avantages retenue dans la méthodologie proposée présente des avantages lorsqu'il s'agit d'évaluer l'incertitude. Elle dépasse le cadre de la méthodologie généralement suivie jusqu'ici dans ce genre d'analyse et si la méthodologie proposée est respectée, elle servira d'élément d'évaluation économique des réductions des émissions de soufre.