

Simulations à l'aide du modèle ADOM (Acid Deposition and Oxidant Model) de scénarios d'émissions pour des réductions possibles de la teneur en soufre des mazouts lourds et légers

Contrat n° KM155-01-0225

préparé pour le

Service météorologique du Canada
2121, autoroute Transcanadienne
Dorval (Québec) H9P 1J3

Responsables scientifiques :

M. Michael D. Moran
Direction de la recherche sur la
qualité de l'air
Service météorologique du
Canada
Environnement Canada
4905, rue Dufferin
Toronto (Ontario) M3H 5T4

M. Michel Jean
Direction des opérations
Service météorologique du
Canada
Environnement Canada
2121, autoroute Transcanadienne
Dorval (Québec) H9P 1J3

M^{me} Lyne Monastesse
Ingénieure principale de
programmes
Direction du pétrole, du gaz et
de l'énergie
Environnement Canada
Place Vincent Massey
351, boul. St-Joseph
Hull (Québec) K1A 0H3

Préparé par:

M. Jacek W. Kaminski
ARM Consultants
2161, rue Yonge, suite 808
Toronto (Ontario) M4S 3A6

31 janvier 2002

Table des matières

1. INTRODUCTION	4
2. DESCRIPTIONS DES SCÉNARIOS	6
3. APPLICATION DES SCÉNARIOS	11
4. SIMULATION ADOM	15
5. REGROUPEMENT D'ÉPISODES ET POST-TRAITEMENT ADOM	16
6. RÉSULTATS	19
7. DISCUSSION ET ANALYSE.....	28
8. CONCLUSIONS.....	29
9. REMERCIEMENTS.....	29
10. RÉFÉRENCES	31
ANNEXE A -- FACTEURS D'AJUSTEMENT DES SCÉNARIOS.....	34
ANNEXE B -- SOURCES PONCTUELLES - VALEURS SPÉCIFIQUES DES ÉMISSIONS.....	35
ANNEXE C -- TENEURS EN SO₂ DES ÉMISSIONS PRODUITES PAR LES ML ET LES MI.....	36
ANNEXE D -- ÉTUDE DOCUMENTAIRE ET GUIDE POUR LE MODÈLE ADOM	38

Liste des tableaux

Tableau 1. Émissions totales de SO ₂ dans le domaine ADOM pour le scénario de référence (BASE) de 1989 et pour les seize scénarios d'émissions pour les années futures.....	9
Tableau 2. Pour l'est du Canada, superficies présentant un dépassement de la charge critique humide de SO ₄ pour les scénarios d'émissions de SO ₂ ADOM CCUSA2 et HLFO.	28
Tableau 3. Pour l'est du Canada, superficie (en milliers de km ²) présentant un dépassement de la charge critique humide de SO ₄ pour différentes concentrations seuils, selon les scénarios d'émissions de SO ₂ ADOM CCUSA2 et HLFO.....	29
Tableau A1. Facteurs d'ajustement des scénarios utilisés pour l'exécution du scénario HLFO. ...	34
Tableau B1. Changements apportés à certaines des principales sources ponctuelles canadiennes.	35
Tableau C1. Teneurs en SO ₂ des émissions, d'après la production des ML et des MI, par région.	36
Tableau C2. Teneurs en SO ₂ des émissions d'après la consommation de ML et de MI par région.	37

Liste des figures

Figure 1. Représentation graphique du masque tenant compte des différentes instances utilisé pour l'ajustement des émissions.....	13
Figure 2. Représentation graphique des champs d'émissions de SO ₂ , en kt an ⁻¹	14
Figure 3. Représentation graphique de la différence entre le scénario 2010 (CCUSA2) et le scénario HLFO pour les champs d'émissions de SO ₂ (kt SO ₂ an ⁻¹).	15
Figure 4. Représentation graphique du champ de la charge critique de dépôt humide de sulfate au Canada pour un niveau de sacrifice des lacs de 5 %, en kg de SO ₄ ha ⁻¹ an ⁻¹ (tiré d'Environnement Canada [1997] et basé sur le rapport du CCRS de 1990).....	19
Figure 5. Représentations graphiques des profils annuels étalonnés du dépôt humide de SO ₄ en kg SO ₄ ha ⁻¹ an ⁻¹ , pour les scénarios d'émissions de SO ₂ ADOM a) HLFO et b) CCUSA2.	20
Figure 6. Représentations graphiques des différences entre les champs de dépôt humide annuel de SO ₄ (en kg SO ₄ ha ⁻¹ an ⁻¹) pour les scénarios d'émissions de SO ₂ CCUSA2 et HLFO.....	21
Figure 7. Comme à la figure 6, mais les différences sont en pourcentage (%).	22
Figure 8. Représentations graphiques des champs de dépassement de la charge critique de dépôt humide de SO ₄ (en kg SO ₄ ha ⁻¹ an ⁻¹) pour les scénarios d'émissions de SO ₂ ADOM a) HLFO et b) CCUSA2.	23
Figure 9. Représentation graphique des différences entre les champs de dépassement de la charge critique de dépôt humide de SO ₄ (en kg SO ₄ ha ⁻¹ an ⁻¹) pour les scénarios d'émissions de SO ₂ CCUSA2 et HLFO.	24
Figure 10. Représentations graphiques des profils des concentrations atmosphériques ambiantes de SO ₄ près de la surface, en µg SO ₄ m ⁻³ , pour les scénarios d'émissions de SO ₂ ADOM a) HLFO et b) CCUSA2.	25
Figure 11. Représentation graphique des différences entre les champs annuels de SO ₄ ambiant (en µg m ⁻³) pour les scénarios d'émissions de SO ₂ CCUSA2 et HLFO.	26
Figure 12. Représentation graphique des différences en pourcentage (%) entre les champs annuels de SO ₄ ambiant pour les scénarios d'émissions de SO ₂ CCUSA2 et HLFO. On a agrandi la carte de la région touchée.....	27

1. Introduction

Malgré les réductions significatives des émissions de gaz acidifiants réalisées au Canada et aux États-Unis ces dernières années dans le cadre des programmes de limitation des émissions des deux pays, on n'a réussi ni à éliminer les impacts du dépôt acide dans l'est du Canada, ni à les ramener à des niveaux acceptables. Environnement Canada est d'avis qu'il faut effectuer de nouvelles simulations de scénarios d'émissions avec le modèle ADOM (Acid Deposition and Oxidant Model) afin de déterminer l'impact d'une réduction de la teneur en soufre des mazouts lourds et légers dans tout l'est du Canada.

Objectif du projet

Le principal objectif de ce projet était d'étudier l'impact de l'application des limites européennes visant le soufre dans les mazouts lourds (ML) et légers (MI). Au cours de projets de modélisation antérieurs, on a exécuté seize simulations de scénarios d'émissions avec le modèle ADOM. Les résultats de ces simulations, combinés avec ceux d'essais ADOM antérieurs (voir les rapports d'Environnement Canada [1997], du GTEA [1997] et d'ARM [2000]), devraient permettre de mieux comprendre dans quelle mesure des limitations de la teneur en soufre des ML et des MI au Canada pourraient contribuer à l'atteinte des objectifs de charge critique pour les réseaux aquatiques de l'est du Canada, ainsi qu'à la réduction de la charge ambiante de particules fines. On doit déterminer notamment les changements dans le dépôt humide annuel de SO_4 , dans les concentrations atmosphériques annuelles de SO_2 et de SO_4 près de la surface, ainsi que les dépassements de la charge critique. Dans cette étude, on utilise la concentration de sulfate comme substitut du paramètre $\text{PM}_{2.5}$ pour l'est du Canada.

Exécution du projet

Ce projet comportait trois grandes étapes : a) la préparation des scénarios; b) l'exécution des essais de simulation et c) le regroupement et l'analyse des résultats.

Préparation des scénarios d'émissions

Cette tâche était coordonnée par les responsables scientifiques (RS), avec la participation initiale d'employés de la Direction du pétrole, du gaz et de l'énergie d'Environnement Canada pour garantir la disponibilité sur place de tous les logiciels et protocoles de contrôle de la qualité (CQ) requis, ainsi que des descriptions des scénarios d'émission. Afin d'appliquer dans ADOM les options requises de réduction des émissions (scénarios), on a introduit des modifications du code FORTRAN dans les sous-programmes d'entrée/sortie des émissions GETEMS (afin

d'appliquer les masques d'ajustement propres aux diverses législations pour le scénario de référence et les autres scénarios) et RATEMS (afin d'appliquer les changements apportés à certains taux d'émission de sources ponctuelles). On présente une description plus détaillée de ces changements dans la section 3, et de l'ensemble du programme ADOM dans Section 4.

Les responsables scientifiques ont vérifié l'impact de ces changements. On a réalisé le contrôle de la qualité en inspectant les sous-programmes modifiés et en examinant les différences entre les valeurs des émissions totales de SO₂ des fichiers de sortie de bilan massique du domaine d'ADOM, obtenues pour le nouveau scénario, et les valeurs du scénario de référence CCUSA2 (voir la définition à la section 2), obtenues lors d'études effectuées antérieurement par Environnement Canada.

Simulations ADOM

Comme on le souligne dans les sections 4 et 5, afin d'évaluer les champs annuels, on a effectué des intégrations temporelles ADOM pour chacun des 33 regroupements d'épisodes de trois jours du nouveau scénario d'émissions. On a extrait des fichiers de sortie du modèle principal les valeurs prévues des flux, des concentrations et des bilans massiques du domaine, et on les a archivées sur le serveur de fichiers central (SFC) du Service météorologique du Canada (SMC) à Montréal de la même façon que lors des essais précédents de scénarios ADOM pour les émissions de SO₂ d'années futures (voir le rapport d'Environnement Canada de 1997). Afin d'assurer l'uniformité et la comparabilité entre les essais du nouveau scénario et ceux des scénarios antérieurs de limitation des émissions, le domaine ADOM, la résolution spatiale et temporelle et l'ensemble des regroupements d'épisodes utilisés pour ce projet étaient identiques à ceux des précédents essais de scénarios. De plus, le code source du modèle était identique, sauf dans le cas des modifications requises dans les sous-programmes GETEMS et RATEMS pour l'application du nouveau scénario.

Regroupement des résultats ADOM et d'autres post-traitements et analyses ADOM

On a effectué cette tâche avec la participation initiale des RS afin de garantir la disponibilité sur place des logiciels et des protocoles de QC requis. On a également effectué des post-traitements des sorties horaires ADOM des flux et des champs de concentrations de surface afin de produire des totaux quotidiens, puis des totaux pour les épisodes de trois jours et, enfin, des champs annuels, à l'aide d'un système de pondération tenant compte des épisodes et des regroupements (pour plus de précisions, voir la section 5 et le rapport d'Environnement Canada de 1997).

Les mesures environnementales utilisées pour évaluer l'impact du scénario d'émissions étaient les champs de dépôt de sulfate prévus par ADOM pour les années futures et les concentrations

atmosphériques annuelles de sulfate. On a comparé le champ de dépôt humide de sulfate (SO_4) prévu par ADOM pour les scénarios actuels d'émissions de SO_2 avec le champ de la charge critique de dépôt de sulfate dans l'est du Canada, et on a supposé que les régions où l'on observait des dépassements de charge critique, c'est-à-dire les régions dans lesquelles le dépôt était supérieur à la charge critique, dépassaient elles-mêmes la capacité environnementale. On a comparé le champ des concentrations ambiantes de sulfate du scénario actuel aux résultats du scénario CCUSA2, choisi comme scénario de référence pour cette étude.

Structure du rapport

Dans la section 2, on décrit le nouveau scénario pour les émissions de SO_2 des années futures dans l'est de l'Amérique du Nord, étudié à l'aide d'ADOM, et, dans la section 3, son exécution dans ADOM. Dans la section 4, on présente d'autres précisions sur le modèle et les simulations ADOM et, dans la section 5, on décrit le post-traitement des sorties des simulations ADOM, notamment l'utilisation du regroupement des épisodes pour évaluer les champs annuels à partir d'un ensemble de résultats obtenus pour des essais de simulation à court terme, ainsi que les calculs de dépassement de la charge critique. Dans la section 6, on présente les sorties ADOM du nouveau scénario d'émissions de SO_2 , et on les examine et analyse de façon plus détaillée dans la section 7. Enfin, on présente certaines conclusions dans la section 8.

2. Descriptions des scénarios

Pour ce qui est de l'ajustement des domaines et de la répartition des émissions de SO_2 dans le domaine ADOM, on a choisi le scénario CCUSA2 comme scénario de référence pour cette étude. Le scénario CCUSA2 correspond aux teneurs actuelles de la réglementation prévues pour 2010, avec l'acceptation volontaire de limites supérieures par les responsables des principales sources ponctuelles (pour plus d'information, voir la section 3.4.1.1 du rapport d'Environnement Canada de 1997).

Comme point de départ de l'essai du scénario CCUSA2 pour les émissions canadiennes de SO_2 avec ADOM, on a utilisé les limites provinciales des émissions de SO_2 et l'acceptation volontaire de limites plus strictes dans le cadre du Programme de lutte contre les pluies acides dans l'est du Canada (voir p. ex. les tableaux 1 et 2 du rapport d'Environnement Canada de 1998). Dans le scénario CCUSA2, on a utilisé, comme point de départ pour les émissions de SO_2 des États-Unis, les limites de la phase 2 et les limites des Clean Air Act Amendments de 1990 (Title IV), en supposant que la redistribution géographique par échange d'émissions était nulle.

On a ensuite modifié les champs d'émissions utilisés dans le scénario CCUSA2 en fonction du nouveau scénario (appelé HLFO) afin d'obtenir les réductions requises de 180 kilotonnes an⁻¹ de SO₂ des sources de l'est du Canada, ce qui représente une réduction d'environ 9 % de la portion canadienne dans le domaine du modèle ADOM, par rapport au scénario CCUSA2. Toutefois, il s'agit d'une réduction relativement faible dans l'ensemble, qui représente environ 1 % des émissions totales pour le domaine du modèle, par rapport au scénario CCUSA2 (voir le tableau 1).

On présente au tableau 1 les totaux des émissions de SO₂ du Canada et des États-Unis dans le domaine ADOM (voir la figure 1) pour le nouveau scénario HLFO, ainsi que ceux de tous les autres scénarios de réduction des émissions obtenus à l'aide d'ADOM. Les scénarios ADOM précédents sont décrits dans les rapports d'Environnement Canada (1997), du GTEA (1997) et d'ARM (2000).

On résume à l'annexe C les teneurs des émissions de SO₂ dues à la combustion des ML et des MI, qu'on a utilisées pour définir le scénario actuel. Selon le tableau C2, on a des réductions estimées à 108, 21, 29 et 0 kt an⁻¹, respectivement, pour les émissions de SO₂ associées aux concentrations limites de S pour les ML dans les Maritimes, au Québec, en Ontario et dans les provinces des Prairies. Dans le cas des réductions correspondantes estimatives des émissions de SO₂ associées aux concentrations limites de S pour les MI, ces valeurs sont de 3, 7, 5 et 0 kt an⁻¹, respectivement. Dans l'ensemble, les émissions devraient baisser de 174 kt an⁻¹ dans l'est du Canada, soit de 64 % dans les Maritimes, de 17 % au Québec, de 19 % en Ontario et d'une fraction négligeable dans les Prairies.

Pour estimer les réductions des émissions de SO₂ présentées au tableau C2, on a effectué des analyses basées sur des données de consommation régionale de Statistique Canada. Afin d'ajuster ces réductions à l'échelle provinciale, il a fallu obtenir des informations supplémentaires sur l'utilisation des ML et des MI par province au Canada.

L'un des RS (M. Moran) a effectué une analyse de l'usage des ML et des MI au Canada, par province et par catégorie de source, à l'aide de l'Inventaire national des émissions des principaux contaminants atmosphériques de 1990 (PCA) (voir Deslauriers, 1996). Il a constaté que l'inventaire contenait des statistiques sur les émissions dues à la combustion des ML (13 catégories de sources ponctuelles et trois catégories de sources régionales), ainsi que sur les émissions dues à la combustion des MI (15 catégories de sources ponctuelles et trois catégories de sources régionales). En 1990, les émissions de Terre-Neuve et du Labrador contribuaient pour 22 % aux émissions de SO₂ de 184 kt an⁻¹ associées à la combustion des ML et des MI dans les Maritimes, celles de l'Île-du-Prince-Édouard pour 2 %, celles de la Nouvelle-Écosse pour 20 % et celles du Nouveau-Brunswick pour 56 %. On a utilisé cette distribution géographique pour répartir entre ces provinces la réduction des émissions de SO₂ prévue pour les Maritimes au tableau C2.

Selon le tableau C2 et cette répartition entre les provinces des Maritimes, on supposait, pour le scénario ADOM HFO/HLO, qu'il fallait réduire les émissions de SO₂ de 24,5 kt an⁻¹ à Terre-Neuve et au Labrador, de 24,5 kt an⁻¹ en Nouvelle-Écosse et dans l'Île-du-Prince-Édouard, de 62,3 kt an⁻¹ au Nouveau-Brunswick, de 28,8 kt an⁻¹ au Québec, de 33,6 kt an⁻¹ en Ontario et de 0 kt an⁻¹ au Manitoba et en Saskatchewan, soit, au total, de 173,7 kt an⁻¹ pour tout le domaine ADOM (voir la figure 1). Dans la prochaine section, on examinera l'application de ces changements des émissions dans ADOM.

Tableau 1. Émissions totales de SO₂ dans le domaine ADOM pour le scénario de référence (BASE) de 1989 et pour les seize scénarios d'émissions pour les années futures.

Nom du scénario	Année nominale	Émissions de SO ₂ (kt an ⁻¹)			Fraction de BASE	Stratégie	Commentaires
		Canada	É.-U.	Total			
BASE	1989	2 688	17 511	20 199	1,00	Actuel	Scénario de référence, moyennes de 1988-90.
CCONLY	1994	1 939	17 862	19 801	0,98	Par secteur	Mesures de limitations can. (CC) + limites plus strictes, nouvelles sources des É.-U.
CCUSA1	1997	1 939	14 865	16 804	0,83	Par secteur	Coupages de la phase 1 du CAAA aux É.-U.; au Canada, comme en 1994.
CCUSA2	2010	1 939	12 446	14 385	0,71	Par secteur	Coupages de la phase 2 du CAAA aux É.-U.; au Canada, comme en 1994.
5CONLY	2030	1 320	12 446	13 766	0,68	Réduction régionale	Réduction pour la ZGOS de 50 % (CAN) par rapport aux limites; aux É.-U., comme en 2010.
25FCAP	2030	1 738	9 335	11 072	0,55	Réduction uniforme	Réduction de 25 % (CAN) par rapport aux limites; aux É.-U., comme en 2010.
T5CUS2	2030	1 277	8 794	10 071	0,50	Réduction régionale	Comme 5CCUS2 sauf pour la Saskatchewan, le Manitoba, T.-N. et le S.-E., le S.-O. et l'ouest des É.-U., qui restent aux limites de 2010.
5CCUS2	2030	969	6 223	7 192	0,36	Réduction uniforme	Coupages de 50 % par rapport au scénario CCUSA2 pour 2010.
75FCAP	2030	579	3 112	3 691	0,18	Réduction uniforme	Réduction de 75 % par rapport aux limites 75 % (CAN), réduction de 75 % par rapport aux limites de 2010 (É.-U.).
PST2010A	2030	1 636	5 578	7 214	0,36	Réduction régionale	Ont. 50 %, Qué. 45 %, N.-B. et N.-É. 25 % par rapport aux limites, É.-U. 55 % par rapport aux limites de 2010.
PST2010B	2030	1 636	4 967	6 603	0,33	Réduction régionale	Ont. 50 %, Qué. 45 %, N.-B. et N.-É. 25 % par rapport aux limites, É.-U. 60 % par rapport aux limites de 2010.
PST2010C	2030	1 610	6 204	7 814	0,39	Réduction par secteur/régionale	Ont. 50 % mais principales sources ciblées, Qué. 50 % mais la Noranda (Rouyn) est ciblée, N.-B. et N.-É. 25 % par rapport aux limites, É.-U. 50 % par rapport aux limites de 2010.

PST2010D	2030	1 601	8 116	9 717	0,48	Réduction par secteur/régionale	par Même chose que PST2010C, sauf la redistribution de 30 % pour le N.-B. et la SENB, la redistribution de 25 % pour la N.-É. et la NSPC, et la réduction de 60 % pour 20 États du N.-E. des É.-U. (les autres restent aux limites de 2010).
PST2010E	2030	1 601	4 984	6 585	0,33	Réduction par secteur/régionale	par Même chose que PST2010D, sauf une réduction de 60 % pour tous les É.-U. par rapport aux limites de 2010.
PST2010a	2030	1 690	5 578	7 268	0,36	Réduction régionale	Ont. 50 %, Qué. 34 %, N.-B. et N.-É. 25 % par rapport aux limites, É.-U. 55 % par rapport aux limites de 2010.
PST2010b	2030	1 690	4 967	6 657	0,33	Réduction régionale	Ont. 50 %, Qué. 34 %, N.-B. et N.-É. 25 % par rapport aux limites, É.-U. 60 % par rapport aux limites de 2010.
HLFO	2010	1 759	12 446	14 205	0,70	Réduction par secteur	Réductions de la teneur en soufre des mazouts lourds et légers canadiens

3. Application des scénarios

Pour appliquer les scénarios d'émissions de SO₂ décrits dans la section précédente, on a pris, comme point de départ de la modélisation, les enregistrements des émissions des principales sources ponctuelles et les champs d'émissions des sources régionales répartis en cellules utilisés pour le scénario CCUSA2 d'ADOM 2010, décrit dans les rapports d'Environnement Canada (1997) et du GTEA (1997).

ADOM répartit les sources d'émissions en deux grande catégories : les sources ponctuelles principales et les sources régionales (voir aussi la section 4). Les sources ponctuelles principales sont notamment les centrales électriques et les fonderies de métaux non ferreux, dont les émissions de SO₂ sont habituellement des fumées rejetées par de grandes cheminées. ADOM traite ces sources individuellement, notamment en calculant l'altitude du panache. Par ailleurs, les sources régionales sont associées aux cellules de la grille ADOM; il s'agit en fait de regroupements de toutes les petites sources situées à l'intérieur d'une cellule, et on suppose que ces émissions se font à la surface.

Deux centrales électriques du Nouveau-Brunswick (Courtenay Bay et Coleson Cove) brûlent du mazout lourd bunker C et une autre (Dalhousie), de l'Orimulsion, un bitume naturel émulsifié dans l'eau à l'aide d'un surfactant (Robert Hughes, ministère de l'Environnement du Nouveau-Brunswick, communication personnelle à Michael Moran, 11 octobre 2001). Une centrale électrique du Nouvelle-Écosse (Tufts Cove), de type bicarburant, brûle du ML et du charbon (Michael Hingston, ministère de l'Environnement et du Travail de la Nouvelle-Écosse, communication personnelle à Michael Moran, 11 octobre 2001).

Comme ces quatre centrales électriques sont classées parmi les sources ponctuelles principales dans les fichiers d'émissions d'ADOM, on a pu examiner individuellement les réductions possibles de leurs émissions de SO₂. Par ailleurs, aucune source significative de l'Ontario ou du Québec brûlant du ML ou du MI ne figure sur la liste des sources ponctuelles principales des fichiers d'ADOM.

Le tableau 2.5 de Tushingham et Bellamy (2001) donne une valeur de 2,2 % à la concentration moyenne de S des ML dans les Maritimes, et on prévoit une teneur moyenne de 0,8 % avec le scénario de la limite de 1% pour les années futures. On a utilisé ce rapport de 8:22 pour évaluer la réduction des émissions de SO₂ des quatre centrales électriques des Maritimes, par rapport aux teneurs des émissions d'il y a quelques années (1985), obtenues grâce à la substitution des ML à faible teneur en S. Dans tous les cas sauf un (centrale électrique de Dalhousie), la réduction estimée était supérieure au niveau estimé des émissions de SO₂ pour ces sources selon le scénario de référence CCUSA2 d'ADOM). C'est pourquoi on a réduit les valeurs des émissions de ces quatre sources, dans la mesure du possible, en manipulant les enregistrements ADOM sur les émissions des sources ponctuelles principales en fonction des

apports de sources choisies désignées par les codes d'identification des enregistrements. Dans le scénario prévu pour les HLFO, on remplaçait les valeurs des émissions actuelles de SO₂ par d'autres propres au scénario. On présente à l'annexe B la liste des sources ponctuelles et des facteurs d'ajustement. On a évalué les autres réductions des émissions pour chaque province en ajustant les émissions de SO₂ des sources régionales pour chacune des province.

On présente au tableau A1 les facteurs d'ajustement des sources régionales utilisés pour chaque province. Les réductions souhaitées étaient de 24,5 kt an⁻¹ pour Terre-Neuve et le Labrador, de 24,5 kt an⁻¹ pour la Nouvelle-Écosse et l'Île-du-Prince-Édouard, de 32,3 kt an⁻¹ pour le Nouveau-Brunswick, de 28,8 kt an⁻¹ pour le Québec, de 33,6 kt an⁻¹ pour l'Ontario et de 0 kt an⁻¹ pour le Manitoba et la Saskatchewan. Le Nouveau-Brunswick est un cas particulier du fait que les émissions totales de SO₂ de ses sources régionales n'étaient que de 22 kt an⁻¹ avec le scénario CCUSA2 d'ADOM. On a tenu compte de ce décalage en mettant à zéro les émissions de SO₂ des sources régionales du Nouveau-Brunswick et, à cause de sa conversion au ML à faible teneur en S, en haussant de 10,3 kt an⁻¹ la valeur des émissions de SO₂ de la centrale électrique de Dalhousie (une source ponctuelle), par rapport à la valeur prévue pour cette source (voir le tableau B1).

Tous les facteurs d'ajustement utilisés figurent dans la liste de l'annexe A. À la figure 1 ci-dessous, on présente, superposé à la grille de modélisation ADOM, le masque tenant compte des différentes instances, qui utilise une grille ADOM à cellules de 127 x 127 km.

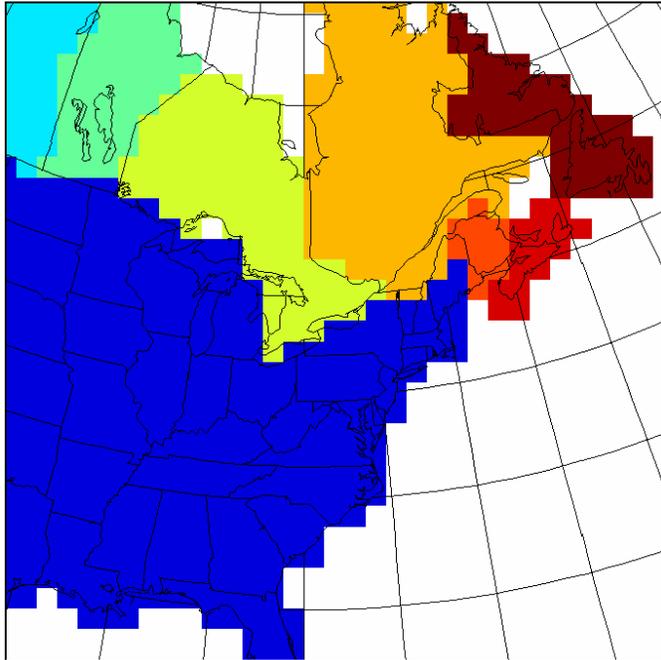


Figure 1. Représentation graphique du masque tenant compte des différentes instances utilisé pour l'ajustement des émissions

On présente aux figures 2a et 2b la répartition des émissions de SO₂ sur la grille ADOM de l'est de l'Amérique du Nord pour les scénarios HLFO et CCUSA2, respectivement.

On présente à la figure 3 la différence entre les émissions de SO₂ du scénario HLFO et du scénario ADOM 2010 (CCUSA2), décrit dans les rapports d'Environnement Canada (1997) et du GTEA (1997). Ce dernier scénario est le scénario de référence choisi pour la présente étude.

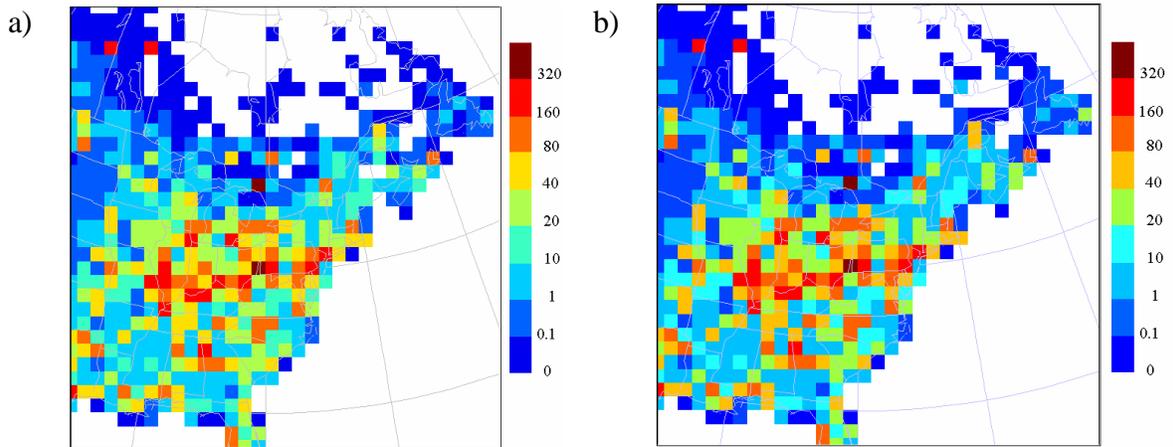


Figure 2. Représentation graphique des champs d'émissions de SO₂, en kt an⁻¹:
a) scénario HLFO; b) scénario CCUSA2.

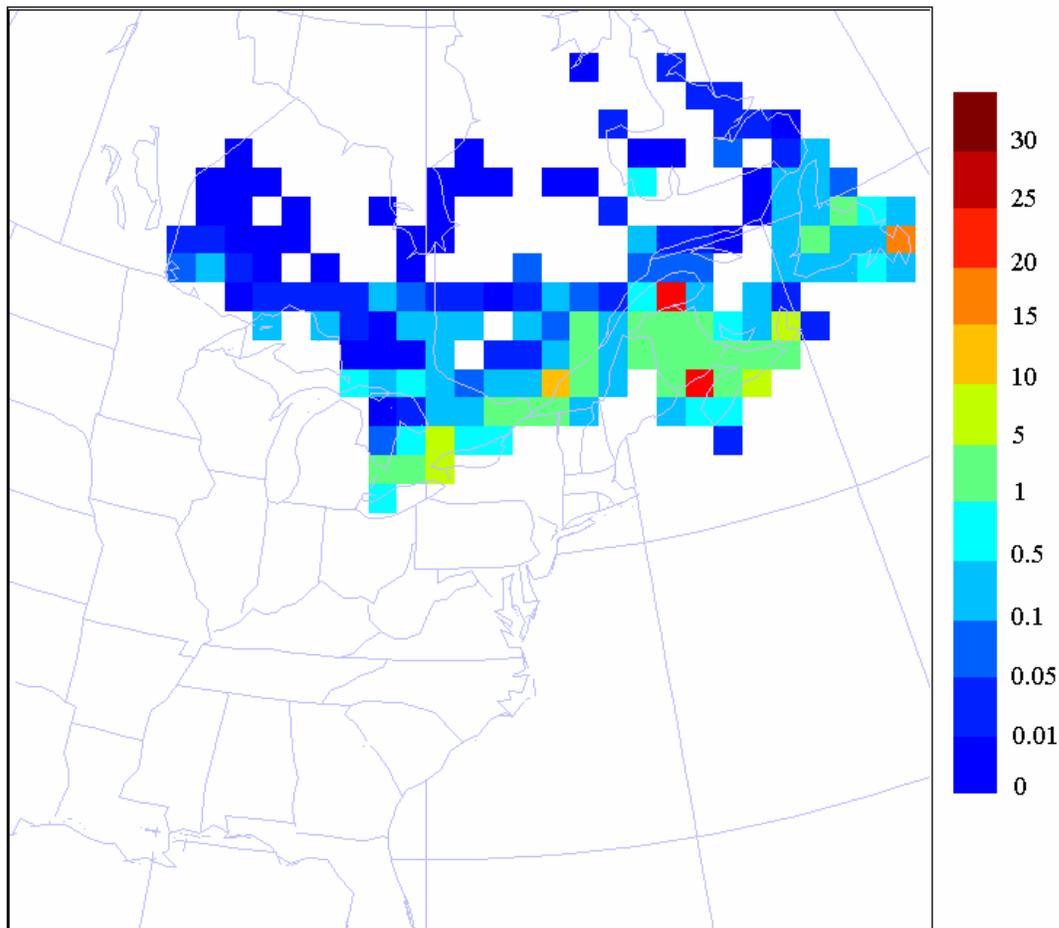


Figure 3. Représentation graphique de la différence entre le scénario 2010 (CCUSA2) et le scénario HLFO pour les champs d'émissions de SO₂ (kt SO₂ an⁻¹).

4. Simulation ADOM

On a effectué une simulation de scénario d'émissions pour ce projet avec le modèle eulérien ADOM de transport chimique épisodique (voir p. ex. Venkatram *et al.*, 1988; Misra *et al.*, 1989; Fung *et al.*, 1991; Padro *et al.*, 1991; le rapport d'Environnement Canada de 1997). On a utilisé la version 2 du mécanisme chimique d'ADOM pour ce projet. Les différences significatives observées entre la version 2 du mécanisme ADOM (ADOM-II) et le mécanisme original de Lurmann *et al.* (1986) sont notamment un traitement explicite de l'oxygène atomique, O(³P) et O(¹D), ainsi que le traitement de l'isoprène comme une espèce distincte. Le mécanisme ADOM-II utilise 47 espèces, 98 réactions chimiques et 16 réactions de photolyse.

On a obtenu les émissions anthropiques de 18 espèces chimiques ADOM, notamment le SO₂ et le SO₄, d'un ensemble de fichiers de modélisation d'émissions déjà traités, élaboré d'abord pour la communauté canadienne de modélisation de la qualité de l'air par ORTECH Inc., MEP Co. et Sophos Inc., vers la fin des années 1980 et le début des années 1990. On sépare les fichiers des émissions en deux ensembles, les fichiers des émissions des principales sources ponctuelles, qui contiennent des enregistrements pour environ 3 000 grandes sources individuelles, et ceux des autres sources. Les fichiers des émissions ADOM sont basés sur l'inventaire des émissions NAPAP pour l'année 1985 (EPA, 1989), sauf pour les grandes sources ponctuelles de SO₂ du Canada et des États-Unis, qui sont visées par la législation relative aux émissions de SO₂. Dans les fichiers des émissions des principales sources ponctuelles, on a supposé que ces sources étaient égales à leurs limites au Canada, ou à leurs limites admissibles établies par l'EPA dans le cas des centrales thermiques des États-Unis (voir le rapport d'Environnement Canada de 1997). À noter que les 11 espèces groupées de VOC d'ADOM proviennent d'un regroupement en fonction de la réactivité pondérée des 32 espèces groupées de VOC de NAPAP.

ADOM est un modèle de qualité de l'air régional épisodique qui prévoit les valeurs horaires de concentration et les champs de dépôt. Étant donné qu'ADOM n'est ni conçu pour les simulations à long terme, ni destiné à être ainsi utilisé, on a utilisé la technique du regroupement des épisodes décrite dans le rapport d'Environnement Canada de 1997 pour obtenir des estimations des champs annuels à partir d'un ensemble de simulations ADOM couvrant une période de moins d'un an. C'est pourquoi on a effectué des intégrations ADOM pour chacun des scénarios d'émissions d'un ensemble de 33 épisodes de trois jours regroupés. Ces épisodes regroupés provenaient des données sur l'été, l'automne et le début de l'hiver de 1988, ainsi que sur la fin de l'hiver et sur le printemps de 1990. On extrayait pour chaque jour d'un épisode les fichiers des valeurs prévues de flux, de concentration en surface et de bilan massique des domaines, et ceux-ci étaient archivés au Centre météorologique du Canada, à Montréal.

Dans l'ensemble, on a exécuté le modèle pour 116 jours du modèle, dont seulement 82 étaient considérés comme des « jours d'épisode ». Les autres jours étaient des « jours de démarrage » placés au début d'un épisode pour permettre au modèle d'atteindre un équilibre entre les émissions et les processus d'élimination; ainsi, chaque épisode regroupé comporte deux jours de démarrage suivis de trois jours d'épisode. Bien que l'utilisation de 33 regroupements d'épisodes semble indiquer qu'il faudrait simuler un total de 165 jours, 116 jours suffisent, parce qu'il y a chevauchement de certains épisodes.

Pour 91 de ces 116 jours, on a effectué les simulations en deux pas de 12 heures et, pour 25 autres jours, en quatre pas de 6 heures, soit, au total, $91*2+25*4 = 282$ essais de simulation. On a retenu cette configuration de passe, conçue pour un ancien modèle de supercalculateur multiprocesseur vectoriel NEC SX-3, pour ce projet qui tourne sur un NEC SX-4. Pour chaque jour-modèle, il fallait environ 1 400 secondes de temps de processeur, soit un temps total d'exécution d'environ 50 heures de processeur pour le NEC. Dans un environnement de temps partagé comme celui du NEC, cela représente de 7 à 14 jours de durée chronométrée, selon la charge du système et les redémarrages.

On a archivé les fichiers de sorties du modèle principal pour chacun des scénarios. La taille totale des fichiers archivés atteignait 400 Mo par scénario (82 fichiers de flux, 82 fichiers de concentrations et 202 fichiers de diagnostic massique, soit un total de 366 fichiers), auxquels il faut ajouter environ 60 Mo de fichiers intermédiaires produits par le regroupement (voir la section suivante).

5. Regroupement d'épisodes et post-traitement ADOM

Concept et but du regroupement d'épisodes

Le regroupement d'épisodes est une approche semi-empirique qui utilise un ensemble de simulations ADOM à court terme pour estimer les champs de concentration et de dépôt pour des périodes d'un an et plus. On a développé cette approche afin de pouvoir utiliser le modèle du dépôt acide régional de l'EPA pour tenir compte des questions de politiques et appuyer la recherche sur les effets (Brook *et al.*, 1995a,b). Cette approche est basée sur deux principes fondamentaux : a) à tout endroit donné de l'est de l'Amérique du Nord, le dépôt humide est déterminé par un certain nombre d'événements de dépôt appartenant à un ensemble de régimes météorologiques récurrents; et b) si on peut identifier une série d'événements de dépôt représentatifs de ces différents régimes, ceux-ci peuvent être combinés ou rassemblés de façon à obtenir une évaluation réaliste du dépôt annuel total. En outre, on peut utiliser des observations de la fréquence des occurrences de ces régimes météorologiques récurrents, ainsi que du volume moyen des précipitations et des concentrations de polluants qui leur sont associées,

pour concevoir un système de pondération améliorant les évaluations du modèle de regroupement à long terme.

En pratique, les deux principaux éléments de cette méthode sont la sélection d'un ensemble représentatif d'événements météorologiques de trois jours pour la simulation modélisée et pour le regroupement pondéré des dépôts totaux prévus par le modèle qui sont associés à ces événements, ce qui permet d'estimer les totaux annuels. Voir le rapport d'Environnement Canada de 1997 pour plus de précisions sur la sélection des 33 regroupements d'épisodes ADOM et pour l'estimation des champs du facteur de pondération applicable au regroupement des épisodes ADOM.

Limitation en étendue des champs regroupés

L'approche du regroupement d'épisodes est semi-empirique (c.-à-d. qu'elle dépend en partie des données) parce que les champs du facteur de pondération nécessaires pour combiner les prévisions d'épisodes ADOM sont déterminés à partir des mesures des données météorologiques et de qualité de l'air des stations. Afin de créer des champs de facteur de pondération maillés à partir des mesures de stations dispersées, on a utilisé une technique d'interpolation horizontale appelée « krigeage » (voir p. ex. Finkelstein, 1984; Federov, 1989; Schaug *et al.*, 1993). La seule limitation de cette approche est que le krigeage ne peut estimer les valeurs que dans les limites de l'enveloppe convexe (surface définie en reliant par des lignes chacune des paires de stations et en supprimant ensuite toutes les lignes intérieures) déterminées par la répartition géographique des stations de mesure à la périphérie du réseau formé par celles-ci. Donc, la couverture spatiale des champs annuels regroupés d'ADOM est limitée par la couverture spatiale des champs de facteurs historiques déterminés à partir des mesures des stations traitées par krigeage, même si les champs « bruts » prévus par ADOM couvrent la totalité du domaine ADOM (comparer, p. exemple, la figure 2a à la figure 5a).

Traitements horaires, quotidiens et annuels, ou par épisode

ADOM produit des champs de concentrations et des valeurs de dépôt horaires. On utilise ensuite un ensemble de scripts pour produire d'abord un ensemble de champs quotidiens à partir des champs des sorties horaires d'ADOM, puis un ensemble de champs d'épisodes de 3 jours à partir de trois ensembles de champs quotidiens et, enfin, à l'aide des champs des facteurs de pondération maillés décrits ci-dessus, on produit un ensemble de valeurs annuelles de concentrations et des champs de dépôt en établissant des moyennes pondérées. Les équations de regroupement utilisées pour cette dernière étape sont décrites dans le rapport d'Environnement Canada de 1997.

Performance du modèle et étalonnage du dépôt humide

On a évalué à fond la performance d'ADOM, du point de vue tant opérationnel que diagnostique, et on l'a discutée dans un certain nombre de publications, notamment Macdonald *et al.* (1993), Li *et al.* (1994), Moran (1998) et le document d'Environnement Canada de 1997. Comme l'indique ce dernier document (pp. 2-180), afin de comparer les prévisions ADOM du dépôt annuel humide de SO_4 dans l'est de l'Amérique du Nord aux mesures des stations pour la période de 1986 à 1990, la ligne de régression linéaire a une pente de 1,00, un intercept de $0,3 \text{ kg ha}^{-1}$ sur l'axe des y (c.-à-d. que le modèle présente un léger biais positif) et un coefficient de corrélation R^2 de 0,73. Seulement deux points sont situés à l'extérieur des limites du facteur de 2. Le résultat obtenu est donc excellent par rapport à celui des autres modèles régionaux du dépôt acide.

De plus, selon le document d'Environnement Canada de 1997, afin de représenter toute la gamme des conditions météorologiques contribuant au transport et à la climatologie chimique à long terme de l'est de l'Amérique du Nord, on a effectué un ajustement destiné à réduire au minimum l'impact des fluctuations statistiques dues au nombre relativement petit d'épisodes échantillonnés. On a multiplié le champ de dépôt humide annuel de SO_4^- d'ADOM, estimé par regroupement pour chaque scénario d'année future, par le rapport entre cette dernière valeur pour la période de 1986 à 1990 et celle de la simulation d'ADOM de scénario de référence pour 1989 (cette procédure équivaut à multiplier le champ observé par le rapport entre la valeur du champ obtenue pour les années futures et celle prévue par le scénario de référence). Cette procédure présente l'avantage d'utiliser les observations disponibles pour renforcer les prévisions du modèle; de plus, elle met l'accent sur les capacités de prévision des changements relatifs par ADOM, par opposition à des changements absolus, pour différents scénarios. Il convient de noter que les recommandations de l'EPA relatives à la modélisation de l'ozone et des particules préconisent cette même approche (relative reduction factor fields approach), qui utilise le rapport entre les valeurs d'un scénario prévues par le modèle et celles du scénario de référence.

Calcul du dépassement de la charge critique

Comme on l'a noté à la section 1, pour évaluer les valeurs de champs de dépôt tolérables par l'environnement prévues par ADOM pour les années futures, on a utilisé, comme mesure environnementale, le champ de la charge critique de dépôt de sulfate pour les écosystèmes aquatiques de l'est du Canada, déterminée pendant l'évaluation scientifique du dépôt acide de 1990 (CCRS, 1990). On présente à la figure 4 ce champ de la charge critique reproduit sur une grille de $42,3 \times 42,3 \text{ km}$ (voir la figure 3.1 du volume 2 du Rapport d'évaluation des pluies acides du Canada de 1997 [Environnement Canada, 1997]).

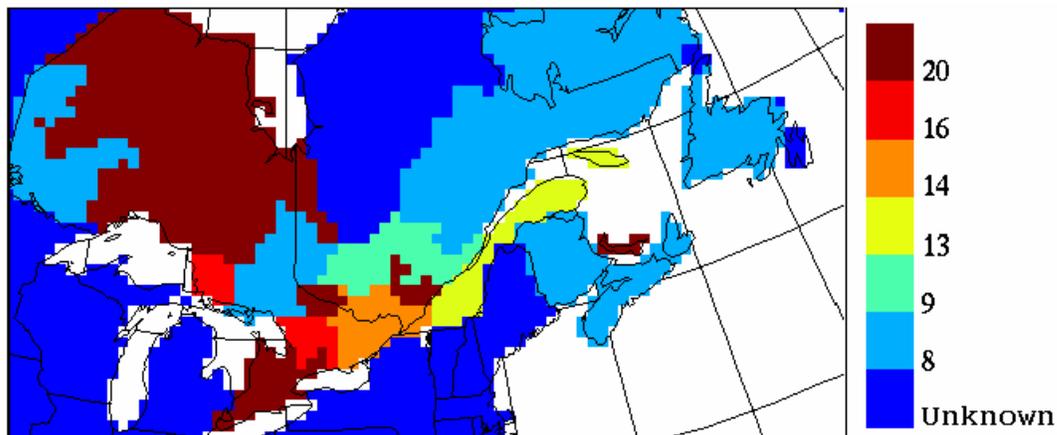


Figure 4. Représentation graphique du champ de la charge critique de dépôt humide de sulfate au Canada pour un niveau de sacrifice des lacs de 5 %, en $\text{kg de SO}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ (tiré d'Environnement Canada [1997] et basé sur le rapport du CCRS de 1990).

Afin d'identifier les régions à dépassement de la charge critique de dépôt humide de SO_4 , c.-à-d. les valeurs de dépôt supérieures à la charge critique, on interpolait d'abord horizontalement le scénario prévu de champ du dépôt humide annuel de SO_4 (en $\text{kg de SO}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) sur une grille ADOM de $127 \times 127 \text{ km}$, de façon à obtenir, par interpolation bilinéaire, une grille de charge critique à plus haute résolution de $42,3 \times 42,3 \text{ km}$. On soustrayait ensuite le champ de la charge critique de la valeur du champ de dépôt humide de SO_4 pour chacun des scénarios. Toute valeur positive désigne les régions où le dépôt humide de SO_4 devrait rester supérieur à la charge critique dans une même région.

À noter que l'impact du dépôt acide dépend du dépôt total, c'est-à-dire de la somme des dépôts humide et sec. Le dépôt sec est encore beaucoup plus difficile à mesurer que le dépôt humide. Lors de la définition du champ de la charge critique il y a dix ans, on tenait compte du dépôt sec d'une façon assez sommaire en divisant par 1,15 la valeur de dépôt total de SO_4 de la charge critique, selon l'hypothèse que le dépôt sec de SO_4 est égal à 15 % du dépôt humide de SO_4 (voir p. ex. Jeffries *et al.*, 2000). De plus, il convient de noter qu'on supposait également un niveau de sacrifice des lacs de 5 % pour les calculs de ces valeurs de charge critique basées sur les écosystèmes aquatiques, c'est-à-dire que la valeur de charge critique correspond au dépôt total de SO_4 qui peut être maintenu ou toléré pour 95 % des lacs de la région.

6. Résultats

On présente à la figure 5A un graphique des profils annuels étalonnés du dépôt humide de SO_4 . La première vue montre les profils prévus correspondant au scénario HLFO actuel et la deuxième vue, le profil annuel du dépôt humide de SO_4 pour le scénario ADOM 2010 (CCUSA2, voir le tableau 1). On utilise ici le scénario CCUSA2 comme scénario de référence

nominal, étant donné que le nouveau scénario tient compte des nouvelles réductions des émissions, par rapport aux teneurs des émissions de 2010.

La figure 6 montre les différences entre le profil annuel étalonné du dépôt humide de SO_4 pour le scénario ADOM 2010 (ou CCUSA2) et celui pour le scénario HLFO actuel.

La figure 7 indique la différence en pourcentage entre le profil annuel étalonné du dépôt humide de SO_4 pour les scénarios ADOM 2010 (CCUSA2) et pour le scénario HLFO actuel.

La figure 8 montre les champs de dépassement de la charge critique du dépôt humide de SO_4 ou les «écarts» de la charge critique pour l'est du Canada, en $\text{kg SO}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Dans ces régions de l'est Canada pour lesquelles le nouveau scénario d'émissions prévoit des dépassements, les dépôts totaux de SO_4 sont supérieurs aux quantités qui peuvent être neutralisées (comme on l'a noté dans la section 5, on a également pris en compte le dépôt sec d'une façon assez sommaire lors de la préparation de la figure 4). Les valeurs négatives indiquent des valeurs de dépôt inférieures à la charge critique illustrée à la figure 4, c'est-à-dire des niveaux de dépôt acide tolérables par l'environnement.

On présente à la figure 9 les différences entre les champs de dépassement de la charge critique du dépôt humide de SO_4 (en $\text{kg SO}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) pour les scénarios d'émissions de SO_2 CCUSA2 et HLFO.

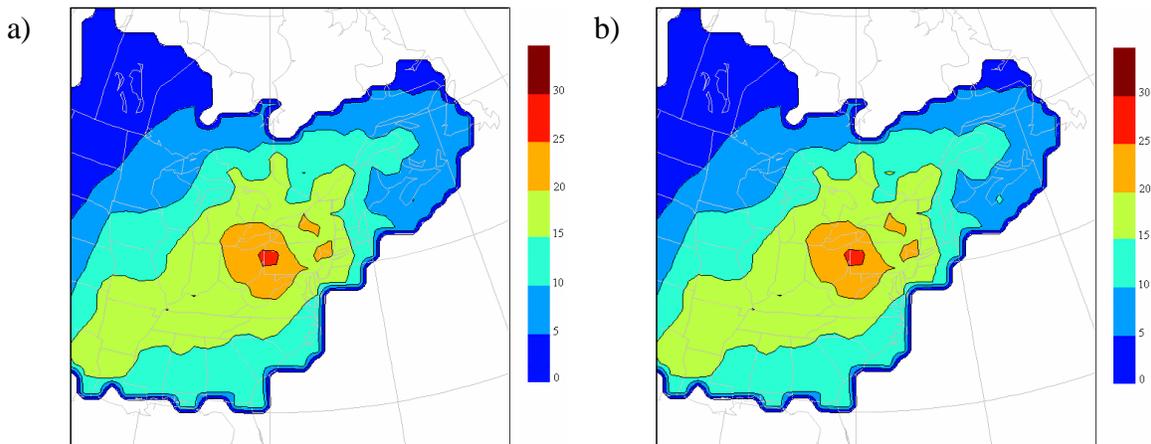


Figure 5. Représentations graphiques des profils annuels étalonnés du dépôt humide de SO_4 en $\text{kg SO}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$, pour les scénarios d'émissions de SO_2 ADOM a) HLFO et b) CCUSA2.

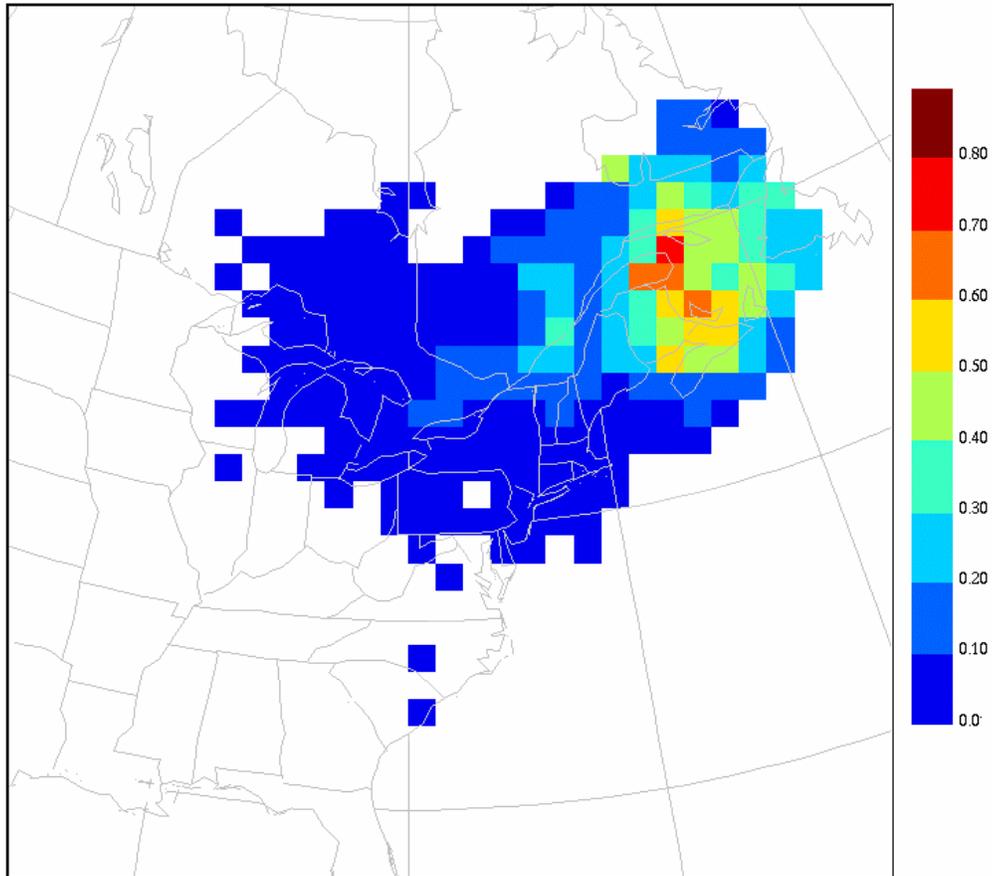


Figure 6. Représentations graphiques des différences entre les champs de dépôt humide annuel de SO₄ (en kg SO₄ ha⁻¹ an⁻¹) pour les scénarios d'émissions de SO₂ CCUSA2 et HLFO.

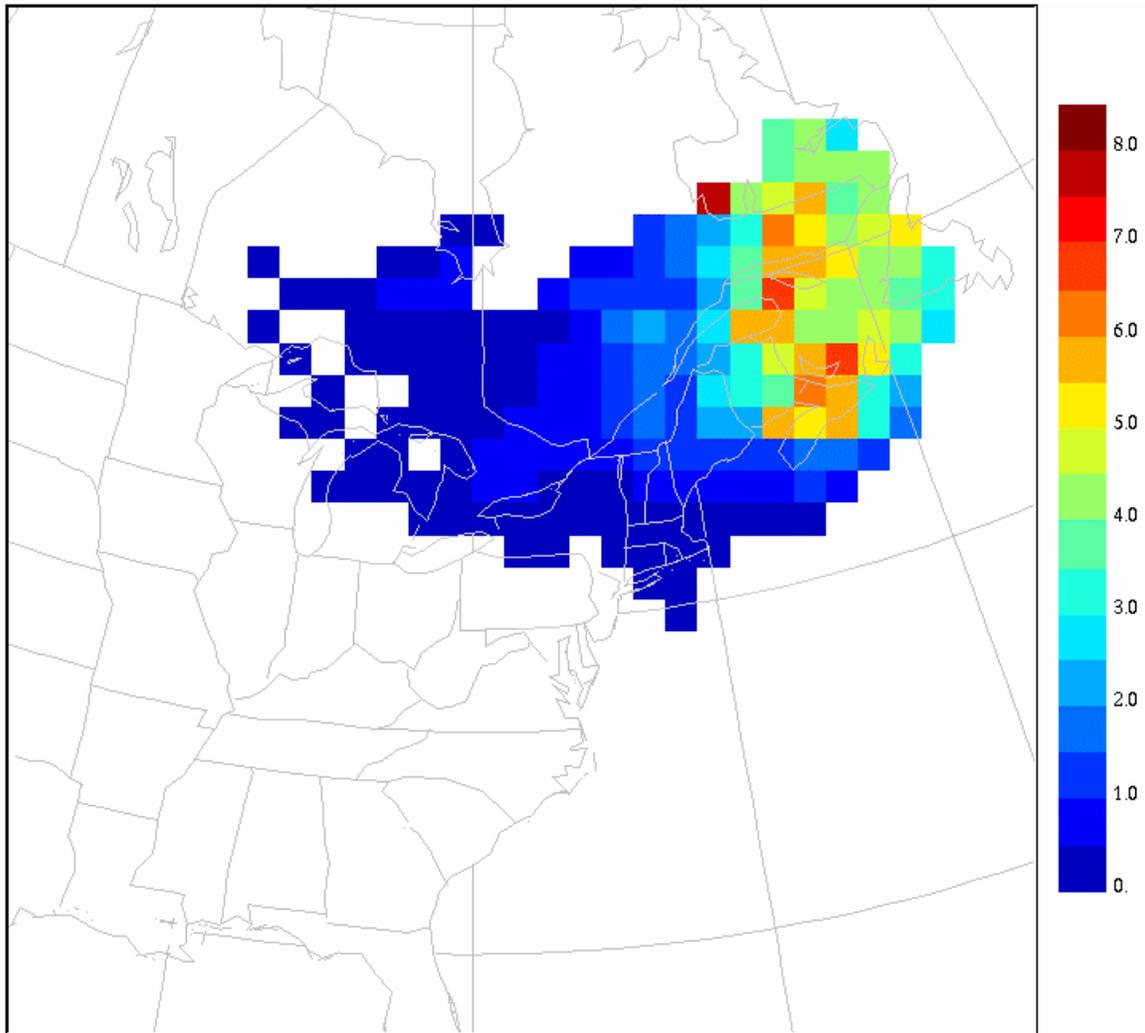


Figure 7. Comme à la figure 6, mais les différences sont en pourcentage (%).

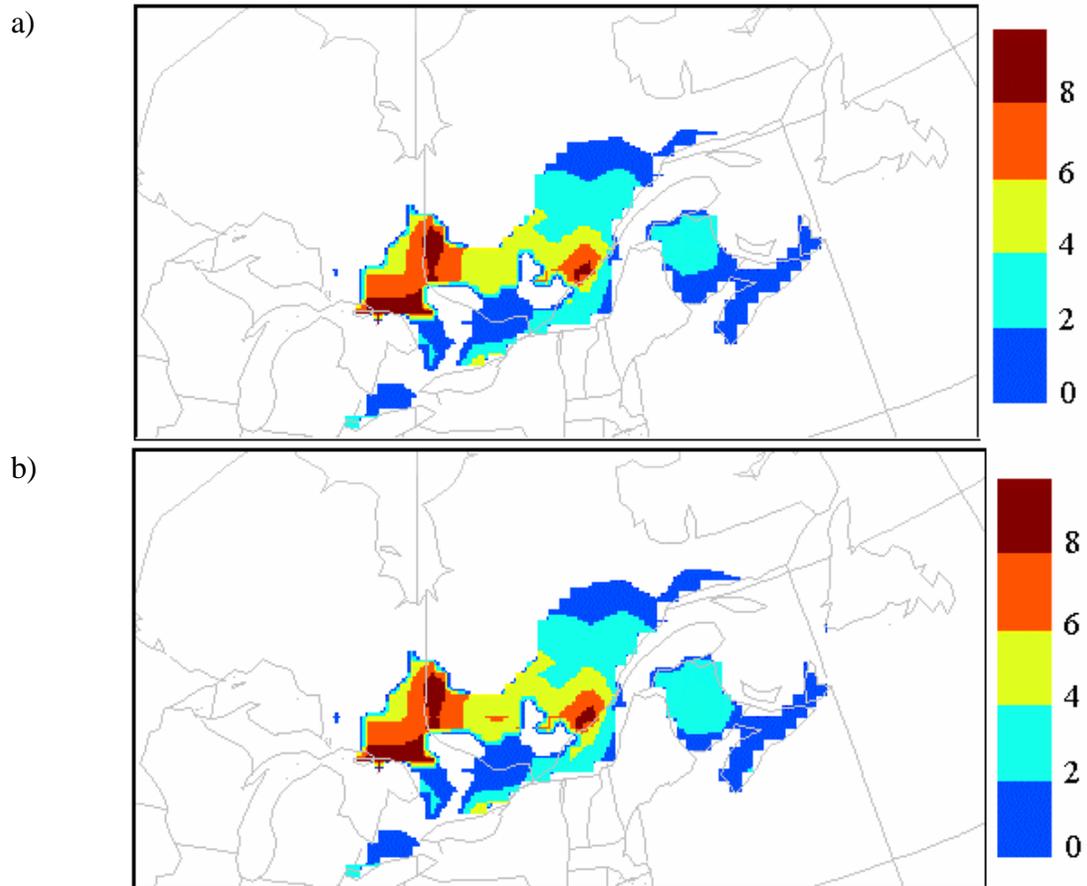


Figure 8. Représentations graphiques des champs de dépassement de la charge critique de dépôt humide de SO₄ (en kg SO₄ ha⁻¹ an⁻¹) pour les scénarios d'émissions de SO₂ ADOM a) HLFO et b) CCUSA2.

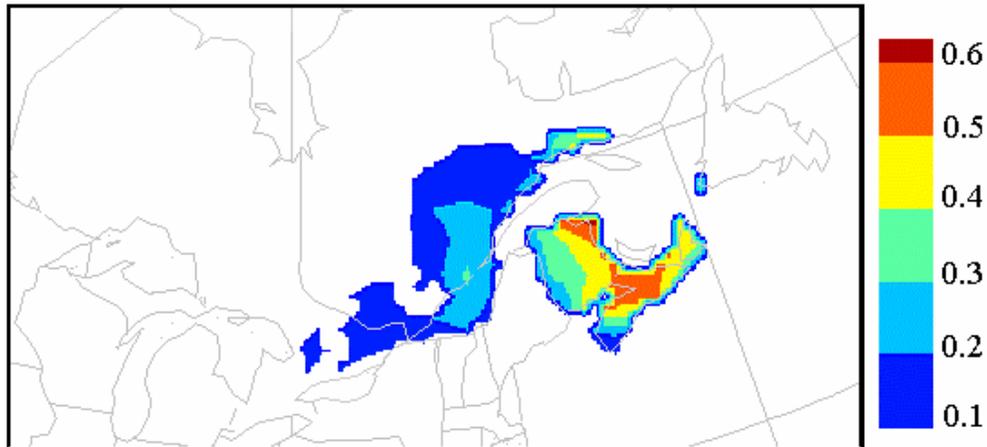


Figure 9. Représentation graphique des différences entre les champs de dépassement de la charge critique de dépôt humide de SO₄ (en kg SO₄ ha⁻¹ an⁻¹) pour les scénarios d'émissions de SO₂ CCUSA2 et HLFO.

On présente à la figure 10A les profils des concentrations atmosphériques ambiantes de SO₄ près de la surface. La première vue montre les profils prévus correspondant au scénario HLFO actuel, et la deuxième, le profil des concentrations ambiantes de SO₄ pour le scénario ADOM 2010 (CCUSA2, voir le tableau 1). Dans ce cas aussi, on utilise le scénario CCUSA2 comme scénario de référence nominal, étant donné que le nouveau scénario tient compte des nouvelles réductions des émissions par rapport aux teneurs des émissions prévues pour 2010.

La figure 11 présente les différences entre les profils des concentrations atmosphériques ambiantes de SO₄ près de la surface pour le scénario ADOM 2010 (ou CCUSA2) et pour le scénario HLFO actuel.

La figure 12 montre la différence en pourcentage entre les profils du SO₄ ambiant pour le scénario ADOM 2010 (CCUSA2) et pour le scénario HLFO actuel.

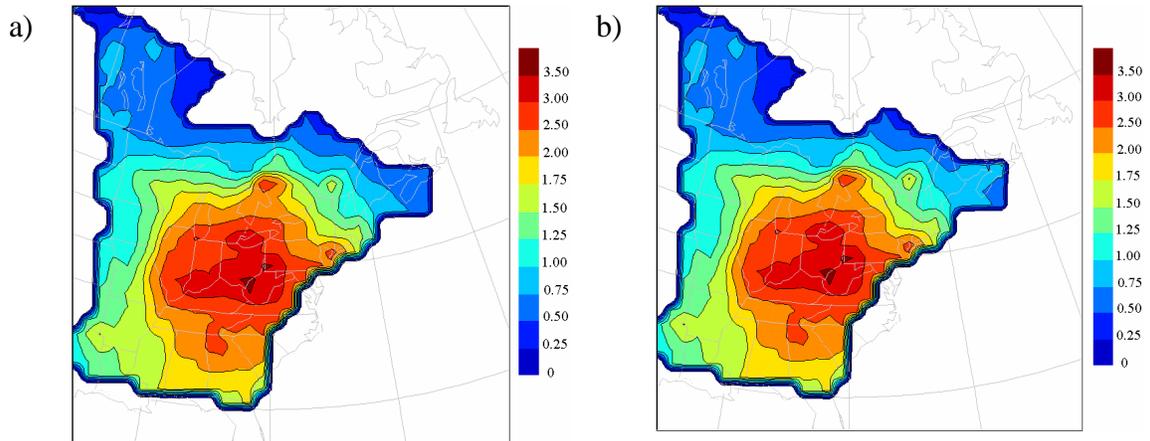


Figure 10. Représentations graphiques des profils des concentrations atmosphériques ambiantes de SO₄ près de la surface, en $\mu\text{g SO}_4 \text{ m}^{-3}$, pour les scénarios d'émissions de SO₂ ADOM a) HLFO et b) CCUSA2.

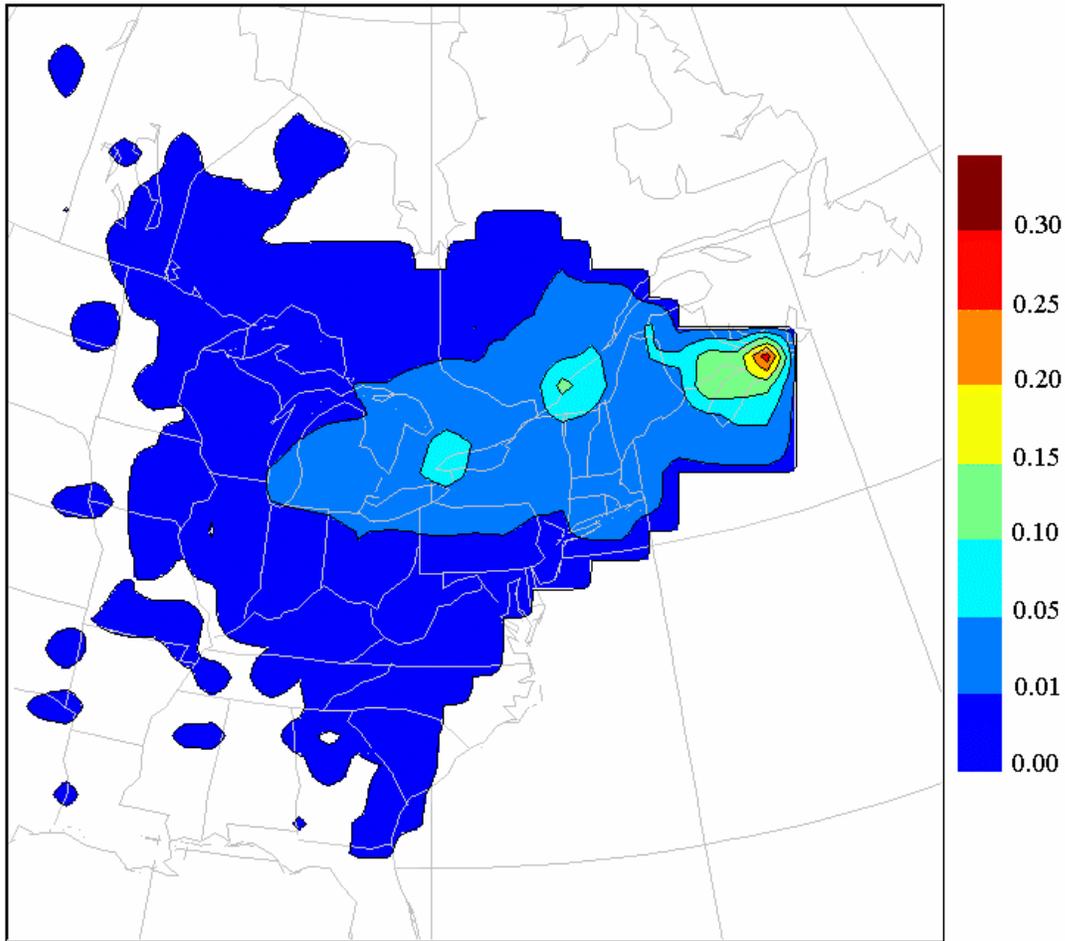


Figure 11. Représentation graphique des différences entre les champs annuels de SO_4 ambiant (en $\mu\text{g m}^{-3}$) pour les scénarios d'émissions de SO_2 CCUSA2 et HLFO.

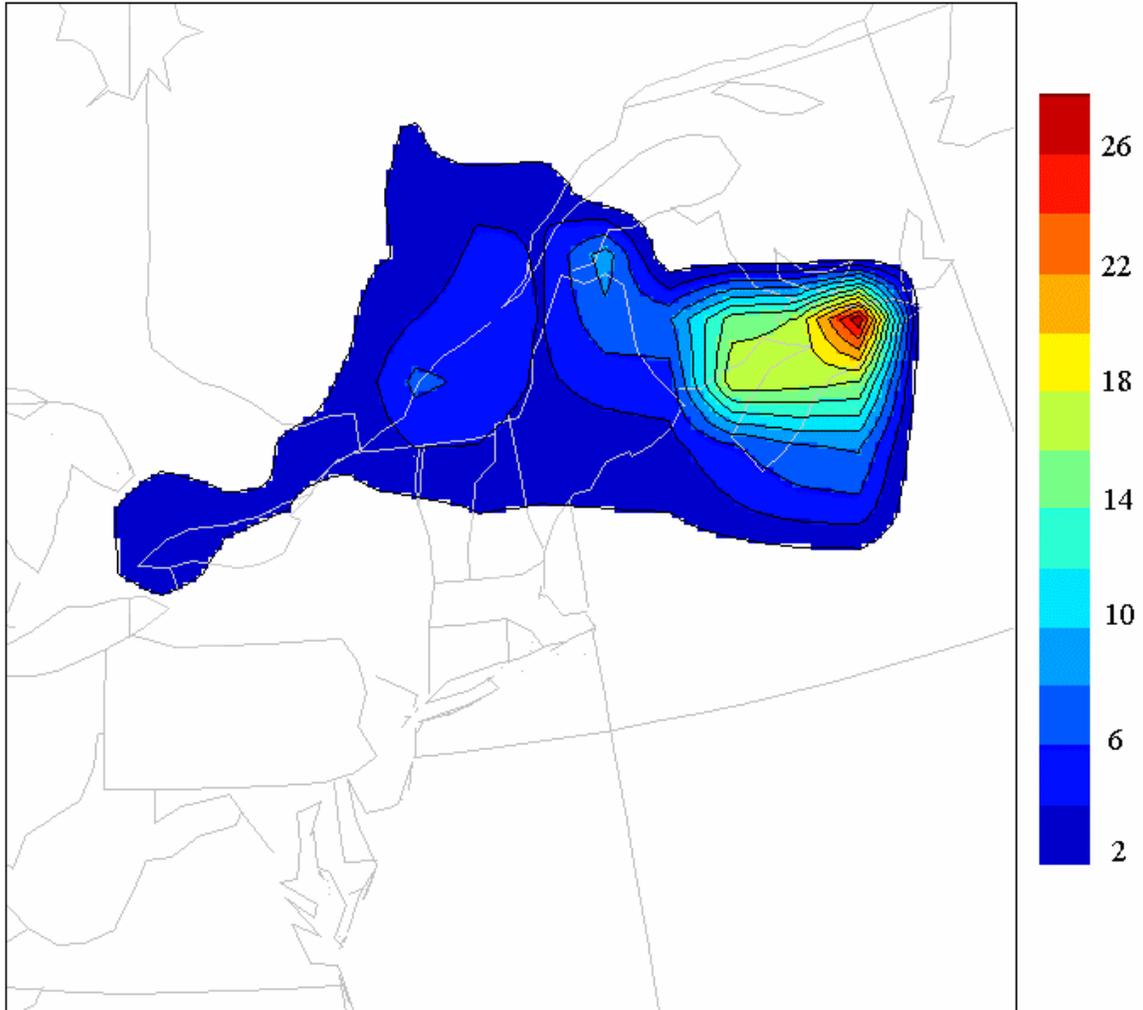


Figure 12. Représentation graphique des différences en pourcentage (%) entre les champs annuels de SO₄ ambiant pour les scénarios d'émissions de SO₂ CCUSA2 et HLFO. On a agrandi la carte de la région touchée.

7. Discussion et analyse

Les réductions appliquées représentent environ 9 % des émissions totales de SO₂ pour l'ensemble du Canada (soit 180 des 1 939 kt an⁻¹). Par ailleurs, les réductions des émissions de SO₂ sont relativement faibles sur l'ensemble du domaine (soit 180 des 14 385 kt an⁻¹, ce qui représente environ 1 %). Toutefois, les impacts des réductions des émissions sont localisés et importants, parce que ces réductions sont concentrées dans les Maritimes. La diminution de 4 à 8 % du dépôt humide de SO₄ (figure 7), qui correspond à 0,25-0,75 kg ha⁻¹ (figure 6), est suffisante pour avoir des répercussions sur les écarts à la charge critique dans les Maritimes. On résume au tableau 2 les données sur les superficies, dans l'est du Canada où on note un dépassement de la charge critique avec les scénarios d'émissions de SO₂ ADOM (scénario de référence CCUSA2 et scénario HLFO actuel). Comme l'a expliqué le document d'Environnement Canada de 1997, cette quantité est une mesure possible pour établir des comparaisons quantitatives entre différents scénarios. Les différences entre les figures 8a et 8b semblent indiquer les effets de la réduction des émissions sur le dépôt humide de SO₄ en Ontario, au Québec et dans les Maritimes. On note une petite diminution (environ 1,4 %) de la superficie des régions présentant un dépassement au Québec, ainsi qu'à Terre-Neuve et au Labrador.

Tableau 2. Pour l'est du Canada, superficies présentant un dépassement de la charge critique humide de SO₄ pour les scénarios d'émissions de SO₂ ADOM CCUSA2 et HLFO.

Nom du scénario	Année nominale	Superficie (x 1,000 km ²)					Ensemble de l'est du Canada
		Ontario	Québec	Nouveau-Brunswick	Nouvelle-Écosse	Terre-Neuve et Labrador	
CCUSA2	2010	204	406	95	82	4	791
HLFO	2010	204	399	95	82	0	780

On résume au tableau 3 les données sur les superficies, dans l'est du Canada, où on note un dépassement pour différentes concentrations seuils (les mêmes que sur les figures 8 et 9) de la charge critique pour les scénarios d'émissions de SO₂ ADOM (scénario de référence CCUSA2 et scénario HLFO actuel). De plus, on a obtenu une valeur de 37 634 km² pour la superficie totale de l'est du Canada où l'on notait un dépassement de la charge critique de dépôt humide de SO₄ à moins de 1 kg de SO₄ ha⁻¹ an⁻¹ pour le scénario d'émissions de SO₂ HLFO, par rapport au scénario CCUSA2.

Tableau 3. Pour l'est du Canada, superficie (en milliers de km²) présentant un dépassement de la charge critique humide de SO₄ pour différentes concentrations seuils, selon les scénarios d'émissions de SO₂ ADOM CCUSA2 et HLFO.

Nom du scénario	Année nominale	Dépassement du seuil (kg SO ₄ ha ⁻¹ an ⁻¹)				
		0-2	2-4	4-6	6-8	>8
CCUSA2	2010	290	246	125	81	50
HLFO	2010	308	229	122	73	48

Selon les réductions des émissions simulées, on obtenait une réduction de 8 à 28 % des concentrations ambiantes de SO₄ dans les Maritimes et une réduction de 2 à 6 % pour la région s'étendant de Toronto à Montréal, comme le montre la figure 12. La diminution des concentrations ambiantes de SO₄ pourrait aussi entraîner une diminution des matières particulaires (PM_{2.5}), dont les particules de sulfate représentent une fraction significative dans l'est du Canada (jusqu'à 40 %; voir le rapport d'Environnement Canada de 2001), et ainsi améliorer les conditions sanitaires (voir p. ex. le rapport d'Environnement Canada de 2001).

8. Conclusions

L'impact de la réduction proposée de la teneur en soufre des ML et des MI a causé une réduction des émissions de SO₂ de 180 kt an⁻¹ dans l'est du Canada, mais cette réduction était concentrée dans les Maritimes.

Les changements résultants dans le dépôt humide de SO₄ et dans les concentrations ambiantes de SO₄ étaient plus élevés dans les Maritimes. La réduction des concentrations ambiantes de sulfate était de l'ordre de 2 % dans le sud de l'Ontario, de 6 % dans la région de Montréal, et d'environ 28 % dans les Maritimes, où jusqu'à 40 % des particules fines sont composées de sulfates. Ces changements sont surtout dus aux réductions des émissions locales et à une petite diminution du transport à grande distance à partir de l'Ontario et du Québec.

9. Remerciements

L'équipe du projet souhaite remercier les responsables scientifiques pour leurs conseils et leurs commentaires précieux, ainsi que pour leurs nombreuses suggestions, pendant la rédaction des précédentes versions de ce rapport. Nous tenons aussi à remercier les employés de la Direction du pétrole, du gaz et de l'énergie d'Environnement Canada pour leurs descriptions des scénarios

d'émissions et pour leurs commentaires très utiles pour la rédaction de la version préliminaire de ce rapport. Nous tenons aussi à remercier le Service météorologique du Canada, qui nous a permis d'utiliser le système informatique du SMC, notamment les supercalculateurs NEC SX-4. Le scénario ADOM CCUSA2 dont il est question dans ce rapport a été produit par le Service météorologique du Canada.

10. Références

GTEA, *Vers une stratégie nationale sur les pluies acides : document*. Rapport présenté au Comité national de coordination des questions atmosphériques par le Groupe de travail sur les émissions acidifiantes, Environnement Canada, 98 p., oct. 1997.

ARM Consultants, Emissions-scenario simulations using the Acid Deposition and Oxidant Model, Report prepared for the Canadian Council of Ministers of the Environment Inc., 53 pp., October 2000.

Brook, J.R., P.J. Samson, and S. Sillman, Aggregation of selected three-day periods to estimate annual and seasonal wet deposition totals for sulfate, nitrate, and acidity. Part I. A synoptic and chemical climatology for eastern North America. *J. Appl. Meteor.*, 34, 297-325, 1995a.

Brook, J.R., P.J. Samson, and S. Sillman, Aggregation of selected three-day periods to estimate annual and seasonal wet deposition totals for sulfate, nitrate, and acidity. Part II. Selection of events, deposition totals, and source-receptor relationships. *J. Appl. Meteor.*, 34, 326-339, 1995b.

Deslauriers, M. Inventaire canadien des émissions des principaux contaminants atmosphériques (1990). Service de la protection de l'environnement. Rapport SPE 5/AP/7E, Service de la protection de l'environnement, Environnement Canada. Ottawa, 79 p., 1996.

Environnement Canada, *Rapport annuel sur les ententes fédérales-provinciales concernant le Programme de lutte contre les pluies acides dans l'est du Canada, 1994* Environnement Canada. 1995. 19 p. Cat. EN40-11/29-1994E, ISBN: 0-662-80444-9.

[Voir aussi le site Web à http://www.ec.gc.ca/pdb/pdb_er.html]

Environnement Canada, *1997 Canadian Acid Rain Assessment, Volume 2, Atmospheric Science Assessment Report*, Travaux publics et Services gouvernementaux Canada, 302 p., 1997. En anglais seulement.

Environnement Canada. *Rapport annuel sur les ententes fédérales-provinciales concernant le Programme de lutte contre les pluies acides dans l'est du Canada, 1997* Cat. EN40-11/29-1997, ISBN: 0-662-63700-3, ISSN: 0846-3964, Environnement Canada, 5 p., 1998.

[Voir aussi le site Web à http://www.ec.gc.ca/pdb/pdb_er.html]

Environnement Canada, Contributions des précurseurs aux matières particulaires dans l'air ambiant au Canada, Cat. EN56-167/2001E, ISBN:0-662-30650-3, 237 p., 2001.

[Voir aussi le site Web à <http://www.msc-smc.ec.gc.ca/saib>]

Federov, V.V., Kriging and other estimators of spatial field characteristics (with special reference to environmental studies). *Atmos. Environ.*, 23, 175-184, 1989.

Finkelstein, P.L., The spatial analysis of acid precipitation data. *J. Clim. Appl. Meteor.*, 23, 52-62, 1984.

Fung, C. S., P.K. Misra, R. Bloxam, and S. Wong, A numerical experiment on the relative importance of H₂O₂ and O₃ in aqueous conversion of SO₂ to SO₄²⁻. *Atmos. Environ.*, 25A, 411-423, 1991.

Jeffries, D.S., D.C.L. Lam, I. Wong and M.D. Moran, Assessment of changes in lake pH in southeastern Canada arising from present levels and expected reductions in acidic deposition. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 2000 (In press).

Li, S-M., K.G. Anlauf, H.A. Wiebe, J.W. Bottenheim, and K.J. Puckett, Evaluation of a comprehensive Eulerian air quality model with multiple chemical species measurements using principal component analysis. *Atmos. Environ.*, 28, 3449-3461, 1994.

Lurmann, F. W., A. C. Lloyd and R. Atkinson, A chemical mechanism for use in long-range transport/acid deposition computer modeling, *J. Geophys. Res.*, 91, 10905-10936, 1986.

Macdonald, A.M., C.M. Banic, W.R. Leitch, and K.J. Puckett, Evaluation of the Eulerian Acid Deposition and Oxidant Model (ADOM) with summer 1988 aircraft data. *Atmos. Environ.*, 27A, 1019-1034, 1993.

Misra, P.K., R. Bloxam, C. Fung, and S. Wong, Non-linear response of wet deposition to emissions reduction: a model study, *Atmos. Environ.*, 23, 671-687, 1989.

Moran, M.D., Operational evaluation of ADOM seasonal performance with surface data from the Eulerian Model Evaluation Field Study. *Proc. 10th AMS/AWMA Joint Conf. on Applications of Air Pollution Meteorology*, Jan. 11-16, Phoenix, Arizona, American Meteorological Society, Boston, pp. 404-408, 1998.

Padro, J., G. Den Hartog and H. H. Neumann, An investigation of the ADOM dry deposition module using summertime O₃ measurements above a deciduous forest, *Atmos. Environ.*, 25, 1689-1704, 1991.

CCRS (Comité fédéral-provincial de coordination de la recherche et de la surveillance), *Rapport canadien d'évaluation de 1990 sur le transport à distance des polluants atmosphériques et sur les dépôts acides. Partie 4. Effets sur les milieux aquatiques.* 183 p.

Comité fédéral-provincial de coordination de la recherche et de la surveillance, Environnement Canada, Ottawa, 1990.

Schaug, J., T. Iversen, and U. Pedersen, Comparison of measurements and model results for airborne sulphur and nitrogen compounds with kriging. *Atmos. Environ.*, 27A, 831-844, 1993.

Tushingam, M., and J. Bellamy, Potential to reduce emissions of sulphur dioxide through reducing sulphur levels in heavy and light fuel oils. Discussion paper, 30 pp., Direction du pétrole, du gaz et de l'énergie, Environnement Canada, 2001.

U.S. EPA, *The 1985 NAPAP emission inventory (version 2). Development of the annual data and modelers' tapes*, Rep. EPA-600/7-89-012a, United States Environmental Protection Agency, 692 pp., Tech. Info. Serv., Springfield, Va., 1989.

U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency), *Aerometric Information Retrieval System (AIRS) User's Guide*, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, N.C., Dec. 1989b.

Venkatram, A., P. K. Karamchandani and P. K. Misra, Testing a comprehensive acid deposition model, *Atmos. Environ.*, 22, 737-747, 1988.

Annexe A -- Facteurs d'ajustement des scénarios

Tableau A1. Facteurs d'ajustement des scénarios utilisés pour l'exécution du scénario HLFO.

Province	Code ID	Facteurs d'ajustement
Saskatchewan	1	1,0000
Manitoba	2	1,0000
Ontario	3	0,7832
Québec (*)	4	0,8041
Nouveau-Brunswick (*)	5	0,0000
Nouvelle-Écosse et Île-du-Prince-Édouard	6	0,4896
Terre-Neuve	7	0,3875
États-Unis.	-1	1,0000

(*)Pour la cellule (24,23) de la grille ADOM, on a remplacé l'instance initiale (Québec) par le Nouveau-Brunswick, de manière à établir une juste proportion pour la centrale électrique de Dalhousie de la Société d'Énergie du Nouveau-Brunswick, située près de l'extrémité sud de cette cellule.

À noter que les facteurs d'ajustement du scénario ont des valeurs complémentaires par rapport à celles des facteurs de réduction; par exemple, pour une réduction de 21,68 % des émissions de SO₂ de l'Ontario, on utilise un facteur d'ajustement de 78,32 %.

Annexe B -- Sources ponctuelles - Valeurs spécifiques des émissions

Les émissions de SO₂ utilisées dans le scénario de référence (CCUSA2) pour les trois centrales électriques du Nouveau-Brunswick brûlant du ML (Courtenay Bay, Coleson Cove et Dalhousie) étaient de 3,6, 21,3 et 434 kt an⁻¹, respectivement. Comme le montre le tableau B1, les émissions de ces trois sources étaient réduites de 3,6, 21,3 et 28,0 kt an⁻¹, respectivement, avec le nouveau scénario ADOM HFO/HLO. Parce qu'on avait déjà mis à zéro les émissions de SO₂ de la centrale électrique de Tufts Cove (Nouvelle-Écosse) dans le scénario de référence, on n'a pas changé ces valeurs dans le nouveau scénario. À noter qu'on prend en compte les deux cheminées de la centrale électrique de Dalhousie.

Tableau B1. Changements apportés à certaines des principales sources ponctuelles canadiennes.

Code ID de l'enregistrement ADOM	Nom de la source	Facteur d'ajustement
3425	CT de Courtenay Bay, N.-B.	Émissions mises à zéro
3428	CT de Coleson Cove, N.-B.	Émissions mises à zéro
3426	CT de Dalhousie, N.-B.	$E_{\text{nouv}} = E_{\text{ancien}} * 0,6452$
3427	CT de Dalhousie, N.-B.	$E_{\text{nouv}} = E_{\text{ancien}} * 0,6452$

Annexe C -- Teneurs en SO₂ des émissions produites par les ML et les MI

On a compilé le tableau C1 à partir des données des tableaux 2.5 et 3.6 du document de travail de Tushingham et Bellamy (2001). Il présente aussi les valeurs des contributions nettes de chaque région aux quantités exportées à l'extérieur du Canada, mais non les contributions des transferts interrégionaux.

Tableau C1. Teneurs en SO₂ des émissions, d'après la production des ML et des MI, par région.

RÉGION	Émissions actuelles de SO ₂ (tonnes an ⁻¹)			Scénario 1 % ML/1 000ppm MI (tonnes an ⁻¹)			Différence (tonnes an ⁻¹)		
	ML	MI	ML+MI	ML	MI	ML+MI	ML	MI	ML+MI
Atlantique	146 346	3 140	149 486	53 227	1 784	55 011	93 119	1 356	94 475
Québec	54 174	6 944	61 118	34 696	2 067	36 763	19 478	4 877	24 355
Ontario	60 180	4 864	65 044	25 082	1 636	26 718	35 098	3 228	38 326
Prairies	13 926	0	13 926	8 415	0	8 415	5 511	0	5 511
C.-B.	2 686	124	2 810	1 245	124	1 369	1 441	0	1 441
CANAD A	277 312	15 072	292 384	122 665	5 611	128 276	154 647	9 461	164 108

On a construit le tableau C2 à partir des données des tableaux 2.1 et 3.1 de Tushingham et Bellamy (2001), en remplaçant la consommation par la somme des ventes totales et de la consommation des raffineries au cours du processus de production. Étant donné que ces valeurs tiennent compte de la production et des importations nettes à l'intérieur de chaque région, notamment du transport interrégional et international, elles reflètent mieux les émissions régionales de SO₂ dues à la combustion des ML et des MI dans chaque région.

Tableau C2. Teneurs en SO₂ des émissions d'après la consommation de ML et de MI par région.

RÉGION	Émissions actuelles de SO ₂ (tonnes an ⁻¹)			Scénario 1 % ML/1 000ppm MI (tonnes an ⁻¹)			Différence (tonnes an ⁻¹)		
	ML	MI	ML+MI	ML	MI	ML+MI	ML	MI	ML+MI
Atlantique	170 309	4 097	174 406	61 931	1 164	63 094	108 379	2 933	111 311
Québec	59 435	8 689	68 124	38 069	1 293	39 362	21 366	7 396	28 762
Ontario	49 455	5 696	55 152	20 617	958	21 575	28 838	4 739	33 577
Prairies	1 446	123	1 569	874	26	900	572	97	669
C.-B.	28 100	2	28 102	13 024	0	13 025	15 076	1	15 077
CANADA	308 746	18 606	327 352	134 515	3 441	137 956	174 231	15 165	189 396

Annexe D -- Étude documentaire et guide pour le modèle ADOM

ADOM -- Développement

Le modèle ADOM (Acid Deposition and Oxidant Model) a été développé par ERT (Environmental Research and Technology), une société de consultants des États-Unis, dans le cadre d'un contrat passé avec plusieurs organisations gouvernementales : le ministère de l'Environnement de l'Ontario (OME), l'UmweltBundesamt de l'Allemagne, et Environnement Canada (EC).

On a diffusé la première version de ce modèle en février 1986, avec un guide de l'utilisateur (**Scire et al., 1986**).

Scire, J.S., F.W. Lurmann, P. Karamchandani, A. Venkatram, R. Yamartino, J. Young, and J. Pleim, ADOM/TADAP user's guide, ADOM/TADAP Model development program, Volume 9, ERT, 1986.

Le mécanisme chimique du modèle original était fondé sur des travaux publiés par **Lurmann et al. (1986)**.

Lurmann, F. W., A. C. Lloyd and R. Atkinson, A chemical mechanism for use in long-range transport/acid deposition computer modeling, *J. Geophys. Res.*, 91, 10905-10936, 1986.

Des chercheurs de l'équipe originale de développement du modèle ont effectué les essais et l'évaluation initiaux du modèle, dont les résultats sont résumés par **Venkatram et al. (1988)**.

Venkatram, A., P. K. Karamchandani and P. K. Misra, Testing a comprehensive acid deposition model, *Atmos. Environ.*, 22, 737-747, 1988.

Ensuite, plusieurs groupes de chercheurs d'Environnement Canada et du ministère de l'Environnement de l'Ontario ont amélioré le modèle.

Des recherches sur la paramétrisation du dépôt sec, effectuées par **Padro et al. (1991, 1993)** à EC, ont permis d'apporter plusieurs modifications au module du dépôt sec d'ADOM.

Padro, J., G. Den Hartog and H. H. Neumann, An investigation of the ADOM dry deposition module using summertime O_3 measurements above a deciduous forest, *Atmos. Environ.*, 25, 1689-1704, 1991.

Padro, J., K.J. Puckett, and D.N. Woolridge, The sensitivity of regionally averaged O_3 and SO_2 concentrations to ADOM dry deposition velocity parameterizations. *Atmos. Environ.*, 27A, 2239—2242, 1993.

Au MEO, on a effectué des recherches sur la chimie du sulfate et sur le dépôt humide (**Misra et al., 1989; Fung et al., 1991, 1992**).

Misra, P.K., R. Bloxam, C. Fung, and S. Wong, Non-linear response of wet deposition to emissions reduction: a model study. *Atmos. Environ.*, 23, 671-687, 1989.

Fung, C. S., P.K. Misra, R. Bloxam, and S. Wong, A numerical experiment on the relative importance of H₂O₂ and O₃ in aqueous conversion of SO₂ to SO₄²⁻. *Atmos. Environ.*, 25A, 411-423, 1991.

Fung, C., R. Bloxam, P.K. Misra, S. Wong, and D. Yap, Evaluating the comprehensive model ADOM with data from three seasons. OME Report PIBS-2064, Ontario Ministry of the Environment, Toronto, Ontario, 64 pp., 1992.

Karamchandani et Venkatram (1992) ont effectué des recherches supplémentaires sur la production de sulfate et sur la chimie des particules dans les nuages.

Karamchandani, P.K. and A. Venkatram, The role of non-precipitating clouds in producing ambient sulfate during summer: results from simulations with the Acid Deposition and Oxidant Model (ADOM). *Atmos. Environ.*, 26A, 1041-1052, 1992.

On trouvera un aperçu général du modèle dans le rapport d'**Environnement Canada de 1997**. Environnement Canada, *1997 Canadian Acid Rain Assessment, Volume 2, Atmospheric Science Assessment Report*, Travaux publics et Services gouvernementaux Canada, 302 p., 1997. En anglais seulement.

ADOM -- Évaluation de la performance

Plusieurs groupes du MEO et d'EC ont effectué des évaluations de la performance du modèle et des comparaisons avec un autre modèle général de dépôt acide, le modèle RADM (Regional Acid Deposition Model) (**Chang et al., 1987**).

Chang J. S., R. A. Brost, I. S. A. Isaksen, S. Madronich, P. Middleton, W. R. Stockwell and C. J. Walcek, A three-dimensional Eulerian acid deposition model: Physical concepts and formulation, *J. Geophys. Res.*, 92, 14681-14700, 1987.

ERP, Eulerian Model Evaluation Field Study (EMEFS): Report of the Fourth Meeting of the External Review Panel. Draft report, May 25-27, Niagara-on-the-Lake, Ontario, Canada, July, 18 pp. [Disponible à la Division de la recherche sur les processus du Service de l'environnement atmosphérique, Downsview (Ontario)], 1994.

De plus, grâce à l'EMEFS (Eulerian Model Evaluation Field Study), **Sirois et al. (1995)** et **Moran (1998)** ont pu évaluer différents éléments d'ADOM à l'aide des données de surface.

Sirois, A., M.P. Olson, and B. Pabla. The use of spectral analysis to examine model and observed O₃ data. *Atmos. Environ.*, 29, 411-422, 1995.

Moran, M.D., Operational evaluation of ADOM seasonal performance with surface data from the Eulerian Model Evaluation Field Study. *Proc. 10th AMS/AWMA Joint Conf. on Applications*

of Air Pollution Meteorology, Jan. 11-16, Phoenix, Arizona, American Meteorological Society, Boston, pp. 404-408, 1998.

Macdonald et al. (1993) et **Hoff et al. (1995)** ont évalué le modèle à l'aide de mesures verticales.

Macdonald, A.M., C.M. Banic, W.R. Leitch, and K.J. Puckett, Evaluation of the Eulerian Acid Deposition and Oxidant Model (ADOM) with summer 1988 aircraft data *Atmos. Environ.*, 27A, 1019-1034, 1993.

Hoff, R.M., R.E. Mickle, and C. Fung, Vertical profiles of ozone during the EMEFS-I experiment in southern Ontario. *Atmos. Environ.*, 29, 1735-1747, 1995.

Li et al. (1994) ont évalué le modèle pour plusieurs espèces par l'analyse de ses principaux éléments.

Li, S.-M., K.G. Anlauf, H.A. Wiebe, J.W. Bottenheim, and K.J. Puckett, Evaluation of a comprehensive Eulerian air quality model with multiple chemical species measurements using principal component analysis. *Atmos. Environ.*, 28, 3449-3461, 1994.

ADOM - Regroupement des épisodes

Brook et al. (1995a, b) ont étudié le regroupement des épisodes. Il s'agit d'une approche semi-empirique utilisant un ensemble de simulations ADOM à court terme pour estimer les concentrations et les champs de dépôt de périodes annuelles et plus longues. On a utilisé cette approche pour générer des scénarios ADOM de réduction des émissions. Le rapport d'Environnement Canada de 1997 décrit l'application de cette approche dans ADOM.

Brook, J.R., P.J. Samson, and S. Sillman, Aggregation of selected three-day periods to estimate annual and seasonal wet deposition totals for sulfate, nitrate, and acidity. Part I. A synoptic and chemical climatology for eastern North America. *J. Appl. Meteor.*, 34, 297-325, 1995a.

Brook, J.R., P.J. Samson, and S. Sillman, Aggregation of selected three-day periods to estimate annual and seasonal wet deposition totals for sulfate, nitrate, and acidity. Part II. Selection of events, deposition totals, and source-receptor relationships. *J. Appl. Meteor.*, 34, 326-339, 1995b.

Environnement Canada, *1997 Canadian Acid Rain Assessment, Volume 2, Atmospheric Science Assessment Report*, Travaux publics et Services gouvernementaux Canada, 302 p., 1997. En anglais seulement.

ADOM - Applications et évaluations

Au fil des ans, on a appliqué ADOM à différents scénarios de réduction des émissions. Le tableau 1 présente une liste de dix-sept scénarios ADOM. Plusieurs rapports décrivent les résultats de simulations de scénarios ADOM. De plus, on a utilisé ces résultats dans plusieurs des rapports d'évaluation ci-dessous.

GTEA, *Vers une stratégie nationale sur les pluies acides : document*. Rapport présenté au Comité national de coordination des questions atmosphériques par le Groupe de travail sur les émissions acidifiantes, Environnement Canada, 98 p., oct. 1997.

ARM Consultants, Emissions-scenario simulations using the Acid Deposition and Oxidant Model, Report prepared for the Canadian Council of Ministers of the Environment Inc., 53 pp., October 2000.

Environnement Canada, *Rapport annuel sur les ententes fédérales-provinciales concernant le Programme de lutte contre les pluies acides dans l'est du Canada, 1994* Environnement Canada. 1995. 19 p. Cat. EN40-11/29-1994E, ISBN: 0-662-80444-9.

[Voir aussi le site Web à http://www.ec.gc.ca/pdb/pdb_er.html]

Environnement Canada, *1997 Canadian Acid Rain Assessment, Volume 2, Atmospheric Science Assessment Report*, Travaux publics et Services gouvernementaux Canada, 302 p., 1997. En anglais seulement.

Environnement Canada. *Rapport annuel sur les ententes fédérales-provinciales concernant le Programme de lutte contre les pluies acides dans l'est du Canada, 1997* Cat. EN40-11/29-1997, ISBN: 0-662-63700-3, ISSN: 0846-3964, Environnement Canada, 5 p., 1998.

[Voir aussi le site Web à http://www.ec.gc.ca/pdb/pdb_er.html]

Environnement Canada, Contributions des précurseurs aux matières particulaires dans l'air ambiant au Canada, Cat. EN56-167/2001E, ISBN:0-662-30650-3, 237 p., 2001.

[Voir aussi le site Web à <http://www.msc-smc.ec.gc.ca/saib>]

CCRS (Comité fédéral-provincial de coordination de la recherche et de la surveillance), *Rapport canadien d'évaluation de 1990 sur le transport à distance des polluants atmosphériques et sur les dépôts acides Partie 4. Effets sur les milieux aquatiques*. 183 p. Comité fédéral-provincial de coordination de la recherche et de la surveillance, Environnement Canada, Ottawa, 1990.

ADOM - Émissions

ORTECH (2000) a décrit la production de fichiers de modélisation des émissions à partir de données extraites des inventaires des émissions du Canada et des États-Unis. De plus, **Deslauriers (1996)** décrit l'inventaire des émissions canadiennes. Cependant, certains rapports internes de MEP et d'ORTECH ont documenté les fichiers de modélisation des émissions produits pour ADOM (1985 et 1988), et deux **rapports de l'EPA (1989a,b)** ont décrit les inventaires correspondants.

Deslauriers, M. Inventaire canadien des émissions des principaux contaminants atmosphériques (1990). Service de la protection de l'environnement. Rapport SPE 5/AP/7E, Service de la protection de l'environnement, Environnement Canada. Ottawa, 79 p., 1996.

ORTECH, Preparation of 1990 North American emissions inventory modeling files for AES regional air quality models, Report 10193 (final) by Canadian ORTECH Environmental, 298 pp + 6 appendices, 2000.

U.S. EPA, *The 1985 NAPAP emission inventory (version 2). Development of the annual data and modelers' tapes*, Rep. EPA-600/7-89-012a, United States Environmental Protection Agency, 692 pp., Tech. Info. Serv., Springfield, Va., 1989a.

U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency), *Aerometric Information Retrieval System (AIRS) User's Guide*, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, N.C., Dec. 1989b.