



Environnement Canada Environnement Canada

Changements atmosphériques au Canada : perspective intégrée

par

Don MacIver

Conseiller scientifique, Environnement Canada

Natty Urquizo

Directrice, Rainmakers Environmental Group



Canada

Changements atmosphériques au Canada : perspective intégrée

Don MacIver

Conseiller scientifique

Environnement Canada

4905 Dufferin St., Downsview, Ontario M3H 5T4

Natty Urquizo

Directrice

Rainmakers Environmental Group

P.O. Box 218, Niagara on the Lake, Ontario L0S 1J0

Avec des contributions ou révisions de :

Heather Auld, Patti Beaulieu, Elizabeth Bush, Quentin Chiotti,
Angus Fergusson, Henry Hengeveld, Abdel Maarouf, Ann McMillan,
Joan Masterton, Carmelita Olivotto, Marjorie Shepherd

1999

CHANGEMENTS ATMOSPHÉRIQUES AU CANADA : PERSPECTIVE INTÉGRÉE

RÉSUMÉ

Une nouvelle initiative

Pour bien comprendre l'intégration, il est recommandé de développer les modèles de l'Atmosphère de 2010. Les mesures d'atténuation sont déjà un pas vers les objectifs de réduction, généralement fixés pour cette échéance. À l'heure actuelle, aucune mesure d'adaptation n'a été mise en place pour préparer socialement et économiquement les Canadiens à cette Atmosphère de 2010. La discussion intégrée du présent document fournit une perspective des problèmes atmosphériques actuels, de leurs nombreuses interactions et de leurs orientations futures.

Les défis

L'intégration des problèmes atmosphériques n'est pas une tâche simple dans le contexte des degrés différents de connaissances, d'expertise, d'information et de réalisations passées. Les défis sont nombreux, mais nous devons accepter les points de vue actuels et les objectifs futurs des réductions d'émissions. De même, nous devons être conscients que la science intégrée et la surveillance sont des éléments essentiels de l'évaluation continue des problèmes atmosphériques. Le manque d'intégration dans les recherches, la surveillance, les modèles, les ressources et les infrastructures de politiques, sur le plan national comme sur le plan international, pose des défis non négligeables mais, en retour, aiderait à stabiliser de nombreuses activités.

Une évaluation intégrée de l'Atmosphère de 2010, prenant en compte les mesures d'adaptation progressives, aiderait aussi à définir collec-

tivement les conséquences positives et négatives de nouvelles mesures d'atténuation, comme le Protocole de Kyoto sur les changements climatiques.

Les problèmes des changements atmosphériques

L'atmosphère n'est pas un milieu statique; au contraire, elle se caractérise par sa dynamique, son évolution et ses extrêmes. L'énergie, l'humidité et la pollution sont transportées dans le « champ de bataille » qui existe entre les masses d'air d'été et d'hiver en Amérique du Nord. Les interactions des masses d'air, les éruptions volcaniques, les événements El Niño, les changements du rayonnement solaire, les extrêmes climatiques et les épisodes de pollution, tous ces éléments jouent un rôle intégré dans les régimes atmosphériques régionaux au Canada.

Au Canada, comme le révèlent les enregistrements substitutifs tels que les cernes de croissance des arbres, les carottes de glace et de sédiments océaniques, il se produit des changements atmosphériques naturels depuis des millénaires. Le changement induit par l'homme est maintenant devenu significatif. Le rejet anthropique de gaz à effet de serre et d'autres substances chimiques dans l'atmosphère joue un rôle croissant dans ce changement. Parmi les problèmes liés aux changements atmosphériques figurent la variabilité et les extrêmes du climat, le changement climatique, l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique, le dépôt acide, les épisodes d'ozone troposphérique, les matières particulaires en suspension, et les polluants atmosphériques dangereux.

enne sur la protection de l'environnement (LCPE), les industries sont tenues de signaler tout rejet dépassant une certaine limite à l'Inventaire national des rejets de polluants.

Il est évident que, pour examiner l'ensemble des problèmes atmosphériques interreliés, comme le dépôt acide, le changement climatique, l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique, les épisodes d'ozone troposphérique, les polluants atmosphériques dangereux et les matières particulaires en suspension, il faut adopter une approche intégrée globale, et pas seulement étendre l'évaluation ou le modèle d'un problème particulier. Persister à tenter de régler les problèmes individuellement peut déboucher sur des politiques et mesures réglementaires qui se contredisent. Par exemple, les aérosols de sulfates causent du dépôt acide, mais aussi absorbent et diffusent le rayonnement solaire, et donc masquent le plein impact du réchauffement par effet de serre. Les évaluations intégrées et cumulatives des problèmes atmosphériques dépassent les limites d'une discipline unique et prennent en compte plusieurs secteurs ou aspects du problème. Qu'ils soient qualitatifs ou quantitatifs, les modèles et évaluations de prévision environnementale doivent reposer sur un cadre intégré, fournissant une perspective à long terme dans laquelle les facteurs externes peuvent changer. Ce cadre prendrait en compte les modifications de la population, des frontières écologiques et politiques et du paysage.

Les orientations futures de la science devront continuer à bâtir sur les réalisations, modèles, évaluations et ententes de politiques visant un problème unique. En même temps, il est recommandé de développer les modèles atmo-

sphériques et évaluations intégrées selon cinq grands axes :

- ❖ Utilisation d'un cadre intégré d'évaluation multi-problèmes qui combine les technologies de type SIG, les modèles et/ou les méthodes de mise à l'échelle pour appuyer le développement de stratégies de prévision environnementale.
- ❖ Ciblage des moments de survenue cumulatifs des changements atmosphériques, sur la base des objectifs individuels science-politiques. Par exemple, pour nombre de problèmes atmosphériques, les échéances se situent aux alentours de 2010. Si ces objectifs sont atteints, quels seraient alors la structure et le fonctionnement de l'atmosphère et quels éléments entreraient en conflit?
- ❖ Développement d'un cadre d'évaluation intégrée et d'un modèle qui prédise de manière fonctionnelle les impacts accessoires de la réduction d'un problème atmosphérique, comme les gaz à effet de serre, sur tous les autres, ainsi que les conséquences nettes en matière de sciences et de politiques.
- ❖ Établissement d'un lien fonctionnel entre la **totalité** de l'atmosphère et d'autres problèmes entièrement intégrés, comme la santé humaine et la biodiversité, afin d'évaluer complètement les avantages nets et les effets de rétroaction sur l'atmosphère.
- ❖ Développement de stratégies d'atténuation et d'adaptation dans le contexte de l'atmosphère **totale** et de son évolution.

CHANGEMENTS ATMOSPHÉRIQUES AU CANADA : PERSPECTIVE INTÉGRÉE

1. L'atmosphère

L'atmosphère est une mince couche de gaz et de particules qui enveloppe la Terre jusqu'à une hauteur de 100 km. Cette zone peut être divisée en quatre couches distinctes : la troposphère (0-10 km), la stratosphère (10-15 km), la mésosphère (50-80 km) et la thermosphère/ionosphère (>80 km). Les gaz qui composent l'atmosphère, surtout de l'azote et de l'oxygène, sont plus denses près de la surface de la Terre. C'est dans cette couche dense, qu'on appelle la troposphère, que surviennent le plus grand nombre de problèmes de pollution. Cette couche représente également 80 % de la masse et contient essentiellement la totalité de la vapeur d'eau, des nuages et des précipitations (Battan, 1966).

L'atmosphère n'est pas statique. La taille des courants ou des masses d'air s'élevant sous l'effet de la température peut varier, allant de petits volumes à de larges zones qui s'étendent sur des milles et des milles de distance et qui peuvent pénétrer dans la stratosphère sous la forme d'orages gigantesques. La troposphère, en particulier, est caractérisée par un fort mélange vertical. L'air pollué proche du sol remonte en altitude de cette façon. Les vents, en revanche, sont le résultat de changements de pression dans l'atmosphère et ils se déplacent autour des centres dépressionnaires dans le sens contraire des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Nord et dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Sud (figure 1). Les vents à 10 km d'altitude aux latitudes moyennes, qu'on appelle les courants d'ouest, soufflent plus fort dans le sud en hiver avant de faiblir et de souffler plus au nord en été.

Circulation atmosphérique générale

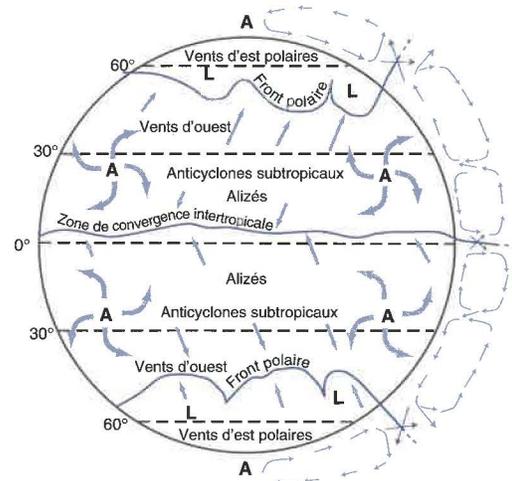


Figure 1. Source : Critchfield (1983) adapté par Hengeveld (1995).

La masse d'air s'étend à mesure que la température et la pression diminuent avec l'altitude et que l'humidité relative augmente. En s'élevant, l'air absorbe de l'humidité et forme des nuages. Lorsque l'humidité relative a presque atteint le niveau de saturation, les molécules d'eau se condensent sur des particules pour former des nuages. Ainsi, les nuages piègent les polluants atmosphériques de deux façons : d'abord, en les utilisant comme noyaux de condensation et, ensuite, en les entraînant hors de l'atmosphère avec les gouttelettes de pluie. Les aérosols, cependant, réagissent également à la gravité, et tombent directement au sol, c'est ce qu'on appelle le « dépôt sec ». Le temps de séjour moyen des aérosols troposphériques est relativement court (Battan, 1996; Wallace and Hobbs, 1977).

Les premiers kilomètres au-dessus de la troposphère se caractérisent par une baisse abrupte de la vapeur d'eau et une augmentation des concentrations d'ozone. Il y a peu de mélange entre la troposphère relativement humide et la stratosphère sèche et riche en ozone. On trouve dans la stratosphère plus de résidus d'explosions nucléaires et d'éruptions volcaniques passées que dans la troposphère ce qui confirme le peu de mélange avec les couches inférieures. De plus, les aérosols ont une longue durée de séjour dans la stratosphère, avec un temps de renouvellement de 3 à 5 ans (Fergusson, 1998). Cette couche agit comme un réservoir pour certains types de polluants atmosphériques.

Au Canada, comme le révèlent les enregistrements substitutifs tels que les cernes de croissance des arbres, les carottes de glace et de sédiments océaniques, il se produit des changements atmosphériques naturels depuis des millénaires. Le changement induit par l'homme est maintenant devenu significatif. Le rejet anthropique de gaz à effet de serre et d'autres substances chimiques dans l'atmosphère joue un rôle croissant dans ce changement. Parmi les problèmes liés aux changements atmosphériques figurent :

- ❖ le changement climatique (réchauffement planétaire);
- ❖ l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique (entraînant l'accroissement des rayons UV-B);
- ❖ le dépôt acide;
- ❖ les épisodes d'ozone troposphérique (associés aux SO_x, NO_x et COV);
- ❖ les matières particulaires en suspension (PM) (sulfates, nitrates, particules de poussières, etc.);
- ❖ les polluants atmosphériques dangereux (PAD) (métaux lourds, pesticides, radionucléides, etc.)

Le présent document a été conçu pour offrir une vue d'ensemble en appui à la recherche scientifique sur l'intégration des problèmes atmosphériques. L'approche adoptée par le passé qui consistait à résoudre chaque problème au moyen d'une réglementation individuelle (comme dans le cas des pluies acides) doit devenir plus holistique. Il est nécessaire d'utiliser une approche intégrée pour éviter que les mesures scientifiques et les mesures réglementaires n'entrent en conflit. Tout en reconnaissant la complexité des interactions entre les problèmes atmosphériques, le présent document ne traitera que des problèmes atmosphériques de base, mis en évidence à la figure 2.

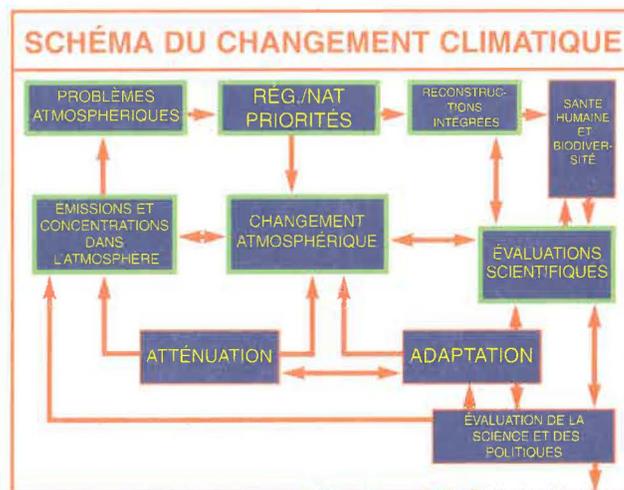


Figure 2.

2. Variabilité atmosphérique

Pour comprendre les variations atmosphériques régionales, il est important de déterminer quelles sont les variations naturelles du climat. La majeure partie du Canada se situe dans la zone des vents d'ouest. Les régimes météorologiques tendent à se déplacer d'ouest en est, entraînant avec eux de vastes systèmes de pression chargés, dans le nord, d'air arctique et, dans le sud, d'air chaud et humide. La figure 3 montre la dynamique des « champs de bataille » entre les masses d'air et la circulation atmosphérique en hiver et en été (Phillips, 1990).

La variabilité et les extrêmes climatiques sont associés à de nombreux facteurs différents (Francis et Hengeveld, 1998) :

1. Des éruptions volcaniques comme celle du Mont Pinatubo aux Philippines, qui est survenue à l'été de 1991, la plus importante du XX^e siècle, ont entraîné une baisse des températures sur la majeure partie du globe au cours des deux années suivantes. On a attribué ce refroidissement au rejet de particules de soufre dans la stratosphère, ce qui a eu pour effet de bloquer le rayonnement incident pendant les années suivantes.
2. Le phénomène El Niño (réchauffement périodique des eaux de surface dans la moitié est du Pacifique équatorial) est probablement le plus influent. Ce phénomène est dû à un affaiblissement des alizés d'est, qui entraîne vers l'est les eaux

Circulation des masses d'air en hiver et en été

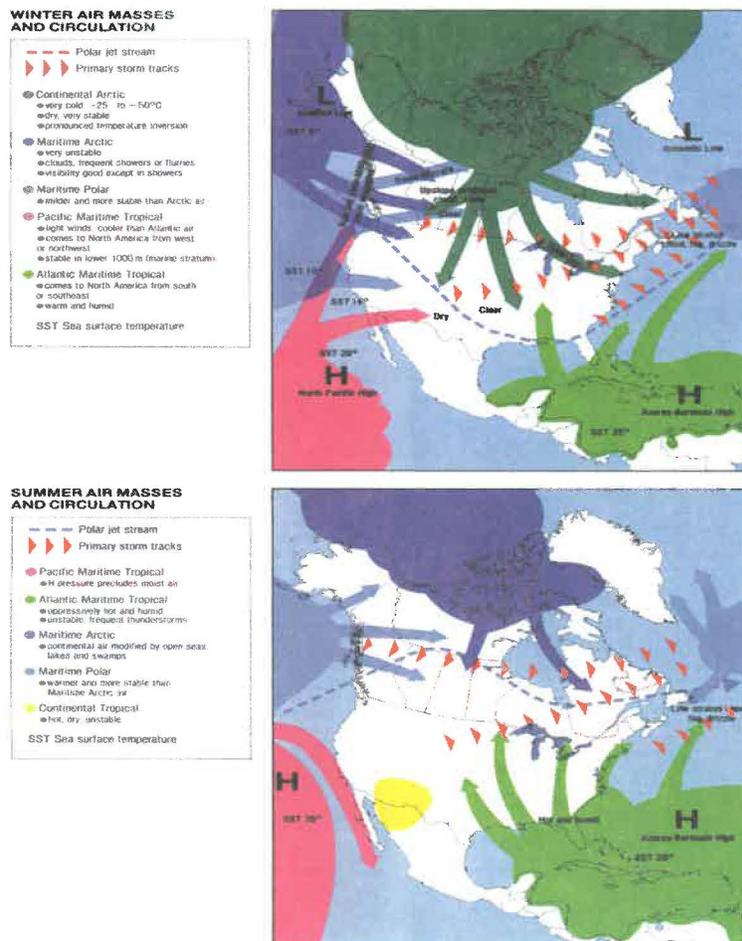


Figure 3. Source: Phillips (1990).

chaudes du Pacifique ouest, ce qui empêche la remontée en surface des eaux froides de l'Amérique du Sud. La configuration des masses d'air ascendantes et descendantes change donc au-dessus du Pacifique équatorial, ce qui a d'importantes conséquences pour la circulation atmosphérique sur une grande partie du globe. Les événements El Niño semblent avoir contribué à l'occurrence d'intenses tempêtes de verglas au Canada, de sécheresses en Australie et en Afrique, d'inondations au Brésil et au Paraguay, de tempêtes anormales au Moyen-Orient, ainsi que de faibles pluies de mousson en Inde et en Indonésie. Ces événements influent également sur le régime des ouragans, entravant leur formation dans l'Atlantique et l'accroissant dans le Pacifique sud-est. La persistance et la fréquence de ce phénomène a augmenté depuis le milieu des années 70 (figure 4). Certains chercheurs affirment même que le phénomène est sans précédent dans les 1 000 dernières années. Pourquoi survient-il donc maintenant? Est-ce un processus naturel ou une réponse à l'activité humaine?

3. Les changements dans l'intensité des rayons solaires qui sont associés au cycle des taches solaires pourraient influencer sur la variabilité du climat à court terme. Le nombre de taches sur la surface du Soleil augmente et diminue selon un cycle qui varie de 7,5 à 16 ans. Les sommets de l'activité solaire sont liés au réchauffement de la stratosphère, ce qui, croit-on, influe sur la circulation dans le reste de l'atmosphère. On associe, par exemple, le petit âge glaciaire (1645 à 1715) à une activité minimale des taches solaires. On estime que les quantités d'énergie solaire libérées étaient inférieures d'environ 0,1 % à 0,7 % aux valeurs actuelles. L'activité solaire n'a cessé d'augmenter depuis

1850, et on lui attribue le tiers du récent réchauffement.

Fréquence et intensité d'El Niño au XX^e siècle

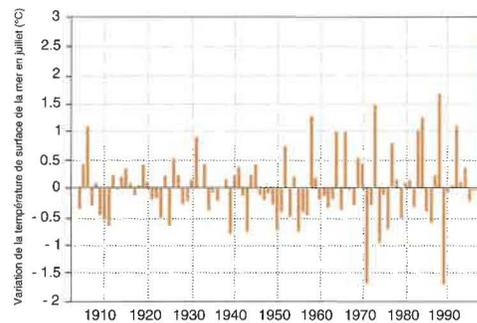


Figure 4. Source: James P. Bruce, cité par Francis et Hengeveld (1998)

4. On peut difficilement expliquer les deux autres tiers du réchauffement planétaire actuel à la seule variabilité naturelle, puisqu'ils sont sans doute également dus aux gaz à effet de serre (voir page 9). Si nous sommes en plein coeur d'un changement climatique à long terme, il est probable que la variation de l'effet de serre soit à l'origine de l'accélération de ce changement.

Les désastres causés par des événements extrêmes comme de graves inondations, des tempêtes, des sécheresses, des tempêtes de verglas et autres catastrophes liées aux conditions météorologiques ont augmenté dans les 30 dernières années (fig. 5 et 6). Il y a de plus en plus d'orages accompagnés de fortes pluies en été aux États-Unis, dans le nord de l'Australie et en France, où les épisodes de grêle sont devenus courants. Dans les régions tropicales, on a également observé un accroissement général de l'activité orageuse. Selon la Munich Re, une des plus grosses compagnies d'assurance de la planète, les pertes économiques imputables aux désastres d'ordre météorologique ont augmenté

Taux d'augmentation des catastrophes naturelles (inondations, tempêtes tropicales, sécheresses et tremblements de terre), 1963-1967 à 1998-1992

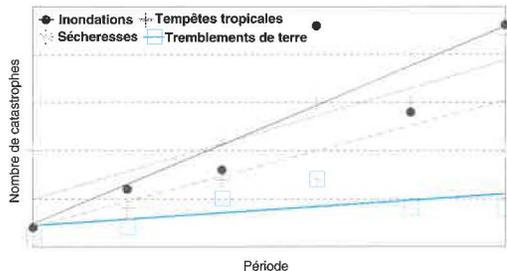


Figure 5. Source : McCulloch et Etkin (1993) adapté par Francis et Hengeveld (1998).

d'un facteur de 43 pendant la même période. Par contraste, la richesse mondiale, mesurée par le PIB, a monté d'un facteur de 2,5 et la population de 25 %. Par conséquent, la croissance économique et la croissance démographique contribuent à l'augmentation de ces pertes pour moins d'un facteur de quatre (Francis et Hengeveld, 1998).

Au Canada, la qualité de l'air est étroitement liée aux paramètres météorologiques. Les concentrations élevées d'ozone (>82 ppb) et de matières particulaires (>80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) au-dessus du sud-ouest de l'Ontario, par exemple, sont associées à des journées de chaleur torride en été, et à des anticyclones situés au sud des Grands Lacs et stationnaires ou se déplaçant lentement. L'effet conjugué de températures élevées et d'un ciel dégagé donne un niveau élevé de rayonnement solaire, ce qui crée des conditions idéales pour la formation d'ozone au sol. Dans le sud de l'Ontario, environ 50 à 60 % des concentrations d'ozone troposphérique total sont dues au transport transfrontalier d'ozone et de précurseurs de l'ozone, en provenance des États-Unis. Les épisodes importants de PM_{10} ont également tendance à être liés aux vents plus forts qui soufflent le long de la bordure extérieure d'un système de haute pression (SENES, 1998).

Fréquence des tempêtes hivernales dans l'hémisphère Nord

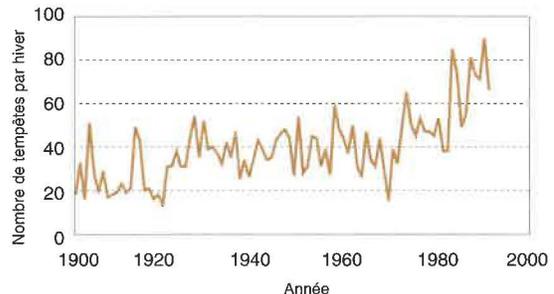


Figure 6. Source : Lambert (1996), adapté par Francis et Hengeveld (1998).

De même, la quantité de rayons UV qui atteignent la surface dépend des concentrations d'ozone de la colonne, des conditions météorologiques et de bien d'autres facteurs qui influent sur la propagation des rayons UV. Il y a des liens étroits entre le flux d'UV vers la surface et la circulation atmosphérique. Les précipitations et le transport des polluants dans la basse troposphère dépendent également des régimes de circulation atmosphérique. Bass et Brook (1997) affirment que les dépressions en altitude/minimums de hauteur ne sont pas uniquement associés à des concentrations élevées d'ozone, mais également à une fréquence accrue des précipitations et de ciel couvert. Ils suggèrent d'avoir recours à des méthodologies de réduction d'échelle (approche semi-empirique utilisée pour dériver et classer les systèmes météorologiques) pour évaluer et prévoir la probabilité d'occurrence de ces épisodes de pollution liés aux conditions météorologiques.

Dans la stratosphère, les chlorofluorocarbures (CFC) entraînent une réaction en chaîne due non seulement à l'augmentation des UV, mais surtout au réchauffement dans la troposphère (SENES, 1998). Ce réchauffement entraînerait un accroissement de la vapeur d'eau, de la couverture nuageuse, des précipitations et des configurations générales de la circulation atmo-

sphérique, ce qui peut également augmenter la fréquence des anticyclones stationnaires. Par ailleurs, une baisse des températures dans la stratosphère entraîne la formation de nuages stratosphériques polaires qui sont un facteur dans les « trous » dans la couche d’ozone au-dessus des pôles. La hausse des températures de l’air en surface et l’accroissement du rayonnement ultraviolet peut entraîner (SENES, 1998) :

- ❖ un accroissement des rejets de composés organiques volatils provenant de la végétation;
- ❖ un accroissement des NO_x biosynthétiques;
- ❖ une augmentation de la production d’ozone;
- ❖ un accroissement des niveaux des aérosols organiques secondaires, des aérosols de sulfate/d’azote;
- ❖ des changements dans la proportion relative de la phase gazeuse par rapport à la phase aqueuse dans l’oxydation de SO₂ à SO₄;

- ❖ des changements dans la distribution géographique du dépôt acide;
- ❖ une hausse de la quantité d’aérosols de sulfate augmenterait la couverture nuageuse, d’où un refroidissement possible de la troposphère.

Des concentrations élevées de sulfate (SO₄) et d’ozone dans l’est de l’Amérique du Nord sont associées à des températures élevées, à une forte humidité absolue, à des vents modérément faibles et à des anticyclones se déplaçant lentement, facteurs qui indiquent tous un fort potentiel d’oxydation (SENES, 1998). Cependant, cela ne veut pas dire que les concentrations de SO₄ ne peuvent pas être élevées aux autres saisons. Des températures basses associées à une inversion près de la surface et à une faible ventilation entraînent des épisodes de pollution par le SO₄. Les conditions météorologiques propices à l’accumulation et au transport de sulfate sont résumées au tableau 1. En revanche, des épisodes de fortes concentrations d’azote

Tableau 1

SYSTÈMES MÉTÉOROLOGIQUES PROPICES À L’ACCUMULATION ET AU TRANSPORT DE SULFATES DANS L’EST DE L’AMÉRIQUE DU NORD

Type	Situation synoptique	Préférence saisonnière	Transport par les vents (300 m)	Hauteur de mélange en après-midi	Conditions thermodynamiques
stationnaire	cellule de haute pression dominante (en surface et en altitude) sur les Appalache	toutes saisons	faible (<5 m/s)	faible (<1000m)	toutes températures, généralement humide
effet de canalisation ou de propagation	anticyclone des Bermudes; système frontal stationnaire ou se déplaçant lentement des Grands Lacs vers l’est jusqu’à la côte de l’Atlantique	été	vents modérés du sud-ouest (7-12 m/s)	élevé (1500 - 2000 m)	temps chaud, humide

Source: SENES (1998)

(NO₃) sont associés à de l'air frais et sec, à de faibles précipitations en moyenne horaire et à de faibles concentrations d'ozone (SENES, 1998).

Les concentrations élevées de particules fines (PM_{2,5}) semblent liées à la variabilité de la fréquence et de la trajectoire des anticyclones et aux paramètres météorologiques associés à ces systèmes. Il est possible que des changements dans les systèmes météorologiques induits par le réchauffement global influent sur les épisodes d'ozone, de PM₁₀, de PM_{2,5} et de SO₄.

Un autre exemple probant de l'influence de la circulation atmosphérique sur la qualité de l'air au Canada est la détection de DDT et de toxaphène à Egbert, site rural de l'Ontario. Ces polluants dangereux, interdits depuis le début des années 70, peuvent être retracés à l'aide des modèles de rétrotrajectoires (figures 7 et 8) aux masses d'air provenant du Mexique et du sud des États-Unis (IADN, 1998).

Il est toujours difficile de prévoir les épisodes de pollution environnementale, faute d'intégration de la variabilité interannuelle ou interdécennale des problèmes de qualité de l'air, et également en raison de l'absence de surveillance et de bien d'autres raisons. Il semble y avoir une relation entre les anticyclones (zones de haute pression) stagnants et la pollution de l'air. Cependant, ce ne sont pas tous les anticyclones stagnants qui entraînent des épisodes de forte pollution atmosphérique. De plus, l'intensité de ces anticyclones baisse avec la fréquence de l'activité anticyclonique, d'où la très grande difficulté d'établir des prévisions exactes sans avoir des évaluations et modèles du climat et de la qualité de l'air (physiques-chimiques), à l'échelle régionale.

Rétrotrajectoires à 850 mb montrant des sources possibles de toxaphène au site d'observation satellitaire du RIDA à Eghert, en Ontario. Les trajectoires correspondent au transport des cinq concentrations les plus élevées.

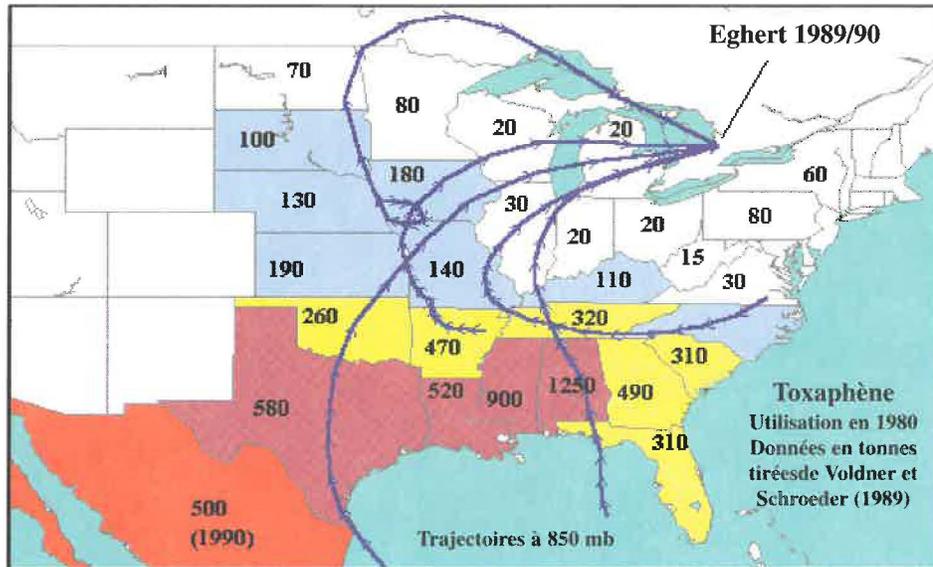


Figure 7. Source: RIDA (1998).

Rétrotrajectoires à 850 mb montrant les sources possibles de p,p'-DDT aux sites de RIDA à Eghert et Pointe Petre, en Ontario. La figure 8 montre les quatre cas de concentrations les plus élevées d'après les données de 1988-89 à Eghert et de 1990 à Pointe Petre.

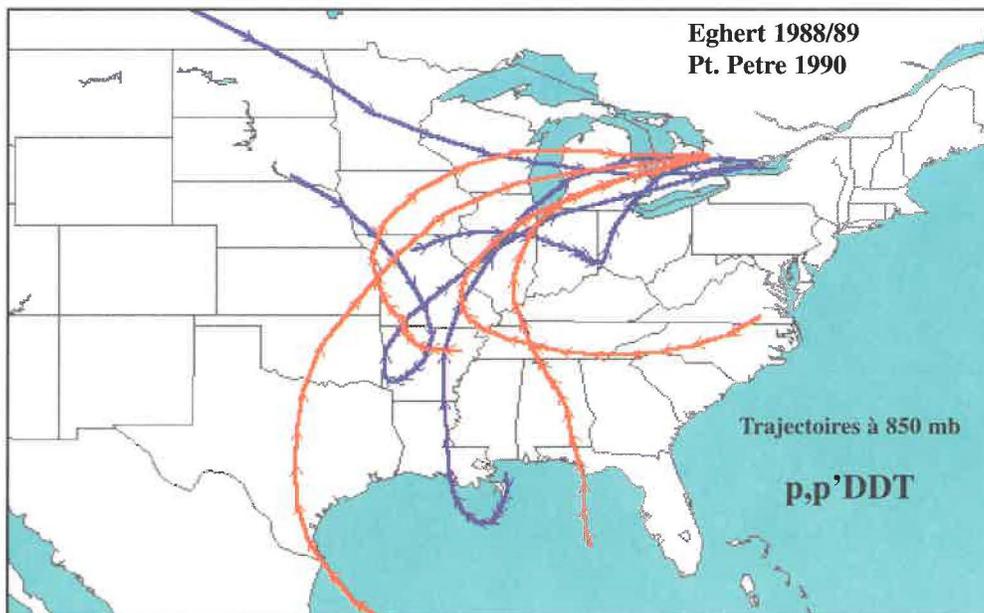


Figure 8. Source: RIDA (1998).

3. L'atmosphère en évolution

3.1 Changement climatique

Depuis les années 40, on a observé un net accroissement de l'irradiance solaire (figure 9). La surface de la Terre et la basse atmosphère renvoient la chaleur provenant du Soleil sous forme de rayonnement infrarouge. Ce rayonnement est intercepté de deux façons : par les nuages et par les gaz absorbants. En plus de réfléchir le rayonnement incident, les nuages absorbent également une grande quantité du rayonnement thermique sortant. La quantité de rayonnement absorbé et renvoyé dépend de l'épaisseur et du type de nuages. Les gaz à effet de serre, par ailleurs, absorbent presque toute l'énergie thermique infrarouge émise par la

Irradiance solaire estimative, 1974-1988

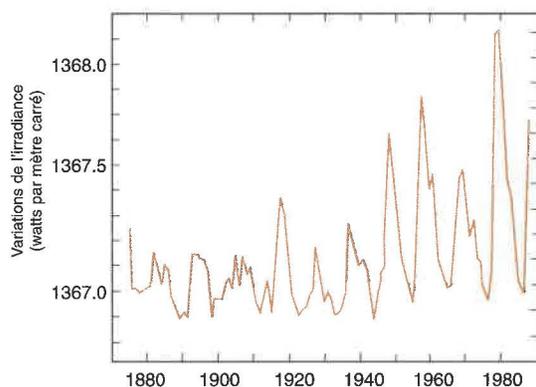


Figure 9. Source : Foukal et Lean (1990), adapté par Francis et Hengeveld (1998).

Terre. Ces gaz renvoient continuellement l'énergie dans toutes les directions jusqu'à ce que seule la couche supérieure renvoie du rayonnement (Hengeveld, 1995). Ce mécanisme entraîne la formation de nuages d'eau plutôt que de nuages de glace, qui sont moins susceptibles de donner des précipitations, perpétuant ainsi le cycle du maintien du rayonnement dans la troposphère (Slingo, 1989).

Les gaz à effet de serre produits naturellement sont la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, le méthane, l'ozone et l'hémioxyde d'azote. Les concentrations de dioxyde de carbone, de méthane et d'hémioxyde d'azote se sont accrues depuis les années 1700 en raison de l'augmentation des émissions due à l'industrialisation et à la déforestation. Les concentrations de méthane dans l'atmosphère, par exemple, ont plus que doublé au cours de cette période (figure 10). Les autres gaz anthropiques à effet de serre incluent l'hémioxyde d'azote, l'ozone et les halo-carbures. On considère toutefois que ces derniers sont les gaz à effet de serre les plus puissants et également ceux qui ont le plus contribué à l'appauvrissement de l'ozone dans la strato-sphère. En fait, les CFC sont 15 000 fois plus puissants que le dioxyde de carbone, le NO₂ 206 fois et le méthane 21 fois (Hengeveld, 1995).

Variations des concentrations atmosphériques de méthane au cours des 1000 dernières années

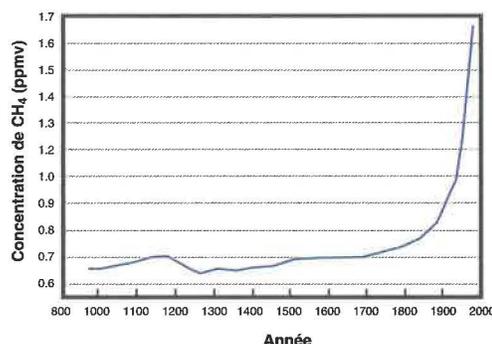


Figure 10. Source : GIEC (1994), adapté par Hengeveld (1995).

Les mesures du dioxyde de carbone faites au Canada et à Hawaii révèlent une hausse de 0,5 % par an (figure 11). Les effets cumulatifs d'une augmentation aussi abrupte sont difficiles à prévoir. Jusqu'à maintenant, la nature s'est montrée bienveillante en absorbant via la biosphère terrestre et les océans près de 50 % des rejets de dioxyde de carbone (Francis et Hengeveld,

1998). On ne peut affirmer avec certitude que cette tendance se maintiendra.

Concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone

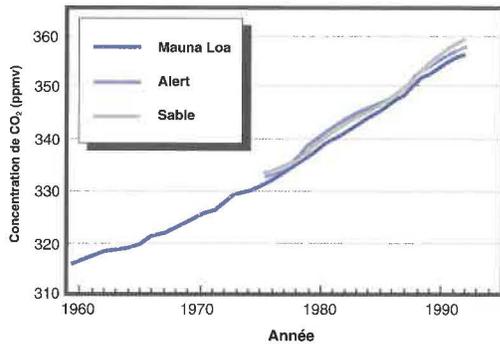


Figure 11. Source: Boden et al. (1994) et Environnement Canada, SEA, cités par Hengeveld (1995).

Des modèles du climat du globe, qu'on appelle les modèles de circulation générale (MCG), sur la base de concentrations atmosphériques élevées de dioxyde de carbone, suggèrent un réchauffement de 1,0 °C à 3,5 °C à l'échelle de la planète d'ici 2100. Les données de surveillance confirment que les dernières années ont été les plus chaudes depuis 1860 (figure 12) (Hengeveld, 1995). Pendant les six derniers mois de 1998, en particulier, des records de chaleur ont été battus sur toute la planète.

Tendances planétaires et canadiennes de la température en surface depuis 1860

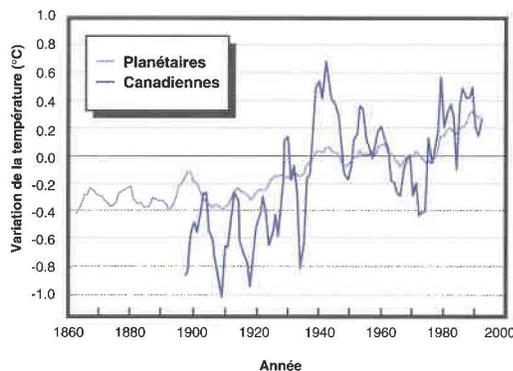


Figure 12. Source: Boden et al. (1994) et Environnement Canada, SEA, cités par Hengeveld (1995).

Le récent Protocole de Kyoto (décembre 1997) inclut les six principaux gaz à effet de serre

dans le calcul des objectifs de réduction des émissions des gaz à effet de serre. Les trois gaz les plus importants, le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et l'hémioxyde d'azote (N₂O), seront évalués par rapport à l'année de référence de 1990, et on prendra 1990 ou 1995 pour les hydrofluorocarbures (HFC), les perfluorocarbures (PFC) et l'hexafluorure de soufre (SF₆).

Le Canada a lancé des études visant à examiner les implications du Protocole de Kyoto, dont les mesures prises pour atteindre l'objectif de ramener les concentrations de gaz à effet de serre à 6 % en dessous des valeurs de 1990. Les mesures seront certes ciblées sur des réductions directes, mais on est conscient que des réductions accessoires significatives surviendront simultanément dans d'autres polluants atmosphériques, aux échelles nationale et régionale.

3.2 Appauvrissement de l'ozone stratosphérique

C'est dans la stratosphère, entre 10 et 50 km au-dessus de la surface de la Terre, que l'ozone est à la fois formé et détruit par des processus naturels. Ces dernières années, la dynamique de cette couche a été perturbée par l'apport de substances chimiques organiques de synthèse, dont les chlorofluorocarbures (CFC), les halons et autres substances chimiques similaires. Les halo-carbures sont très stables; ils peuvent demeurer dans l'atmosphère pendant des décennies, voire même des siècles. Lorsqu'ils atteignent finalement la haute atmosphère, leurs molécules se dissocient sous l'effet du rayonnement solaire intense et libèrent des atomes de chlore et/ou de brome, qui sont à l'origine de l'appauvrissement de l'ozone. Depuis 1975, les pertes périodiques d'ozone au-dessus de l'Antarctique ont été très graves, atteignant plus de 65 % (figure 13). Au-dessus des latitudes moyennes, l'ozone baisse de 5 % par décennie (Wardle et al., 1997). Ce déclin,

craint-on, pourrait être plus important car, selon les rapports de la NASA, la taille et la profondeur du trou au-dessus de l'Antarctique ont atteint des proportions inégalées en 1998. L'épaisseur de l'ozone est tombée à 90 dobsons le 30 septembre 1998; c'est la plus faible valeur enregistrée depuis 1994 (NASA, 1998).

Tendance mondiale de l'appauvrissement de l'ozone

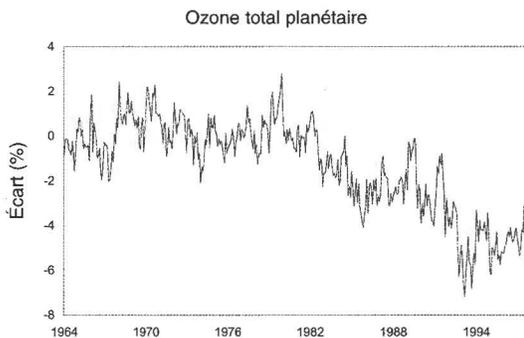


Figure 13. Source : D. Wardle et V. Fioletov, SEA (1998).

L'appauvrissement de la couche d'ozone se traduit par un accroissement du rayonnement UV-B qui a les conséquences suivantes :

- ❖ augmentation du nombre de cancers cutanés;
- ❖ affaiblissement du système immunitaire;
- ❖ dommages causés à la membrane entourant la cellule, aux chloroplastes et à l'ADN des végétaux;
- ❖ cataractes;
- ❖ autres effets biologiques (Wardle et al., 1997)

Le Protocole de Montréal, qui a été signé en 1987, demande une réduction modérée des substances qui appauvrissent l'ozone stratosphérique. Une fois qu'il a été clairement établi grâce à la surveillance et à la recherche que

les produits chlorés étaient à l'origine de l'appauvrissement de l'ozone, il a été plus facile de convaincre le public de la nécessité d'imposer plus de contrôles. D'où le resserrement du Protocole à deux reprises en cinq ans. Le Canada a depuis respecté et dépassé ses engagements aux termes du Protocole et de ses amendements. Si les dispositions du Protocole de Montréal et de ses amendements sont pleinement appliquées, il est possible que l'ozone stratosphérique commence à se régénérer autour de 2005 à 2010 (Wardle et al., 1997). Cependant, le refroidissement de la stratosphère dû à l'accroissement de l'effet de serre pourrait retarder davantage la reconstitution de la couche d'ozone au-dessus des régions polaires (Hengeveld, 1998).

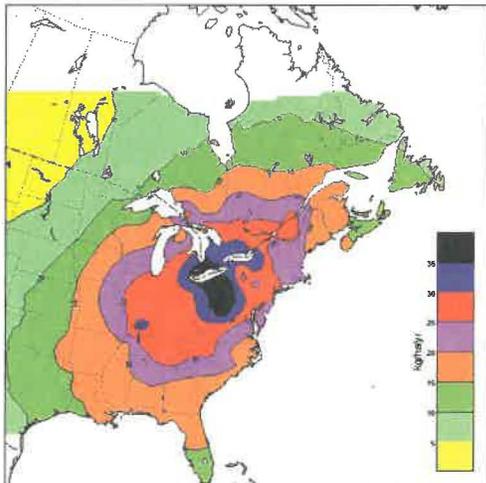
3.3 Dépôt acide

Les oxydes de soufre et d'azote rejetés par les fonderies et les centrales à combustibles fossiles se transforment en particules de sulfates et de nitrates, qui elles-mêmes donnent naissance aux acides sulfurique et nitrique. Ces polluants sont transportés en altitude sur de grandes distances par les masses d'air, avant d'être lessivés par les précipitations ou de se déposer sur les lacs, la végétation, les immeubles, etc. Le dépôt humide de sulfates dans l'est du Canada est encore une source de préoccupations. Pour ce qui est du seul dépôt humide, la région du sud-est de l'Ontario et du sud-ouest du Québec en reçoit entre 20 et 30 kg/ha/an (figure 14).

L'oxydation atmosphérique du dioxyde de soufre (SO₂) par le peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) est nettement plus rapide en présence des catalyseurs ozone, oxygène et fer. La vitesse de conversion du SO₂ en SO₄ sur les aérosols est, pense-t-on, de plusieurs ordres de grandeur supérieure à celle des réactions en phase gazeuse ou en phase aqueuse.

Moyenne sur 5 ans du dépôt humide excédentaire de sulfate pour les périodes 1980-1984 et 1990-1994, en kg/ha/an

a) Dépôt en 1980-1984



b) Dépôt en 1991-1995

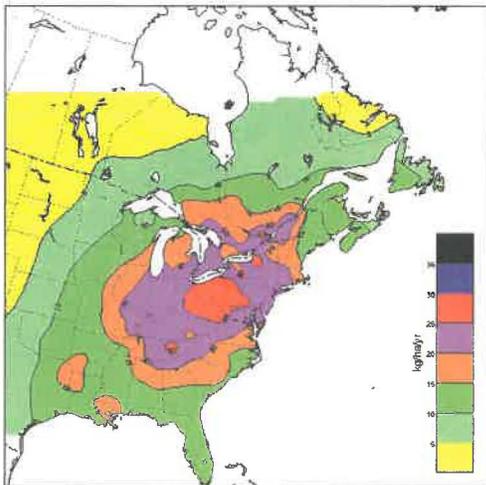


Figure 14. Source: Chul-Un Ro, Environnement Canada (1999).

Cependant, ce processus se poursuit jour après jour. Ainsi, le dépôt sec de soufre et d'azote constitue jusqu'à 50 % du total des substances acidifiantes dans la région des Grands Lacs. La plus grande partie de ce dépôt se fait pendant la journée. À Egbert, en Ontario, le taux du seul dépôt sec est de 6 à 12 kg/ha/an (SENES, 1998). Le taux de dépôt humide à ce même endroit était

en 1997 de 15,92 kg/ha/an (Ro, 1998), ce qui porte le total à plus de 20 kg/ha/an, objectif fixé pour 2010.

Avec les réductions de 40 % des émissions de SO_2 par rapport aux niveaux de 1980 demandées après la signature du premier (1985) et du deuxième (1994) protocoles sur le soufre conclus entre le Canada et les États-Unis, le dépôt acide total a été réduit (figure 14, a et b). Les deux pays respectent jusqu'ici le calendrier de leurs engagements de réduction des émissions aux termes de l'Accord (The Acidifying Emissions Task Group, 1997). Cependant, malgré cet échéancier demandant d'atteindre les objectifs d'émission et de dépôt en 2010, le dépôt de sulfate dépassera encore les charges critiques sur de vastes régions de l'est du Canada (Environnement Canada, 1997).

L'est du Canada sera particulièrement vulnérable à la ré-acidification, si les épisodes El Niño deviennent plus fréquents. Après chaque événement El Niño, on a observé une sécheresse en Ontario (Dillon et al., 1997). On a aussi constaté que la sécheresse peut avoir un effet négatif sur le rétablissement des lacs. Par exemple, en période de sécheresse, le soufre réduit qui avait été stocké pendant les années de fort dépôt de sulfate s'oxyde et est libéré avec les premières pluies, ce qui entraîne une ré-acidification du lac ou retarde son rétablissement (Bayley et al., 1986). D'autres effets tout aussi importants sur la santé humaine, les forêts et les matériaux sont discutés dans *Les pluies acides au Canada : rapport d'évaluation de 1997*, volume sur les effets sur la santé humaine.

¹ C'est le dépôt maximal de composés acidifiants qui ne causera pas de changements chimiques entraînant des effets nocifs à long terme sur la structure globale ou le fonctionnement de l'écosystème.

3.4 Ozone troposphérique

L'ozone troposphérique, effet secondaire de la combustion de combustibles fossiles, est le principal élément du smog dans bien des grandes villes. L'ozone est étroitement associé aux épisodes de forte concentration de matières particulaires fines ($< 2,5$ micromètres, (mm)), de polluants atmosphériques dangereux et de dépôt acide, et donc caractérisés par des réductions de la visibilité.

L'ozone troposphérique (au niveau du sol) est le résultat de transformations photochimiques d'oxydes d'azote (NO_x) et de composés organiques volatils (COV) provenant de sources naturelles et anthropiques. En fait, lorsque la température est élevée, il y a une plus grande vaporisation des solvants et des essences, qui sont les principales sources de COV (Last et al., 1998). Des réactions chimiques sont induites par le rayonnement ultraviolet (UV) en présence de catalyseurs chimiques, comme le radical hydroxyle (OH) et le radical peroxy (H_2O_2). Comme ces réactions sont dépendantes de la température et du rayonnement, les épisodes de forte concentration d'ozone ont tendance à être plus prononcés les journées d'été chaudes et ensoleillées, en situation d'anticyclone stagnant.

Les effets de l'ozone sur les plantes et la santé humaine sont largement reconnus. Il est établi que les plantes réagissent aux expositions cumulatives à long terme à l'ozone, et qu'elles sont plus sensibles que l'homme au stress dû à l'ozone (Heck et al., 1998). Même de basses concentrations d'ozone avec des pointes intermittentes peuvent entraîner des symptômes chroniques. Des changements dans la croissance, la productivité et la qualité peuvent survenir sans qu'aucun symptôme soit visible. Parmi les symptômes aigus figurent la chlorose, un retard de la croissance de début de saison, la sénescence précoce et une nécrose uni- ou bifaciale

(The Federal-Provincial Working Group, 1998). La détoxification n'est pas inhabituelle chez les plantes, mais dépend du délai de récupération entre les expositions. À la lumière de ces particularités, la norme visant à protéger la végétation est basée sur le cumul des valeurs horaires pendant la période de photosynthèse. L'indice SUM60 concerne les expositions cumulatives pendant les heures de jour de moins de 6000 à 7000 ppb (The Federal-Provincial Working Group, 1998).

Des concentrations d'ozone de 40 ppb peuvent causer des problèmes respiratoires chez l'homme (SENES, 1998), entre autres des dommages aux tissus pulmonaires, surtout chez les personnes âgées et les enfants, une réduction de la fonction respiratoire, et une sensibilisation des voies aériennes aux irritants et autres allergènes (Last et al., 1998). Au moment des pointes d'ozone, le nombre des hospitalisations augmente (figure 15). En Ontario, 20 % des hospitalisations pour des raisons de bronchite chronique, bronchiolite et pneumonie chez des enfants de moins d'un an peuvent être attribuées à la pollution estivale par l'ozone et les sulfates (Last et al., 1998).

Concentrations d'ozone et hospitalisations

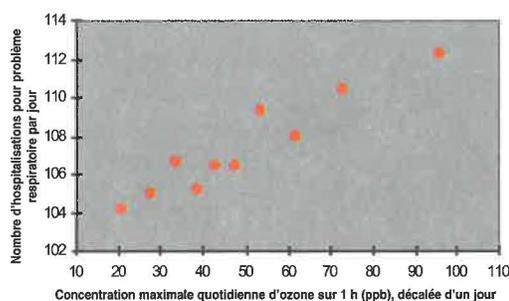


Figure 15. Source: Burnett *et al.* (1997).

Les stratégies de gestion de qualité de l'air, à l'heure actuelle, se concentrent sur les dépassements à court terme de > 82 ppb en moyenne horaire. Les hospitalisations pour problèmes respiratoires, cependant, surviennent à des

concentrations bien inférieures à ces valeurs. Dans 16 villes canadiennes étudiées, excepté une, le niveau d'ozone observé était de 60 ppb. Le risque associé à ce genre d'hospitalisation est une augmentation de 1,04 %/10 ppb du maximum quotidien d'ozone (The Federal-Provincial Working Group, 1998).

La distribution spatiale sur tout l'est de l'Amérique du Nord du nombre moyen composite (1986-1993) de jours où les rapports de mélange de l'ozone ont dépassé 82 ppb est présentée à la figure 16. Au Canada, les régions affectées par un niveau d'ozone élevé sont situées dans le sud de l'Ontario, avec plus de 20 jours par an. C'est dans le corridor Windsor-Québec que l'on observe les fréquences et les durées les plus élevées de dépassements de la moyenne horaire maximale acceptable de 82 ppb. Dans certaines régions isolées autour des Grands Lacs, les heures de dépassement de cette valeur surviennent le jour et la nuit, ce qui est attribuable au transport à grande distance. Ces régions peuvent connaître une moyenne annuelle de plus de 150 heures où le seuil de 82 ppb est dépassé. Bien qu'il y ait des différences considérables dans le moment de la journée où l'on observe le plus souvent des concentrations élevées, pour les régions du sud-ouest de l'Ontario, le pic se situe entre 16 h et 17 h (Data Analysis Working Group, 1996).

Il est difficile de déterminer les tendances de l'ozone, du fait de leur étroite corrélation avec les conditions météorologiques. Celles-ci non seulement ont un impact substantiel sur les concentrations d'ozone, mais aussi masquent probablement toute tendance à long terme de l'ozone qui pourrait être liée aux changements des émissions de NO_x et de COV. Un des travaux de modélisation des tendances de l'ozone en Ontario a cependant conclu que le niveau de l'ozone augmentait de 1,2 %/an (Data Analysis Working Group, 1996).

Rapports de mélange de l'ozone dépassant 82 ppb

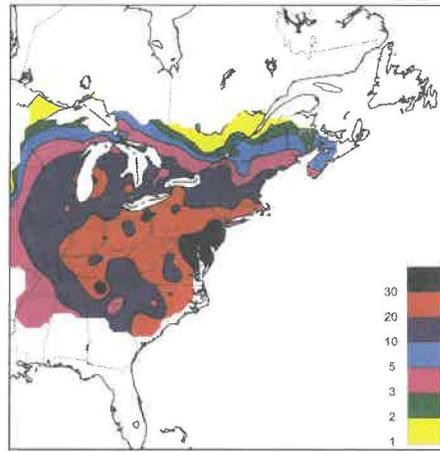


Figure 16. Source : Data Analysis Working Group (1996).

Les concentrations d'ozone ont un comportement unique. Dans les grandes villes, comme Toronto, l'ozone se combine à l'oxyde nitrique (NO , produit de combustion) pour donner du dioxyde d'azote (NO_2) et de l'oxygène, qui tous deux ralentissent l'accumulation d'ozone. Cependant, les niveaux d'ozone augmentent dans des régions suburbaines et rurales, à une quarantaine de kilomètres en aval, où il y a moins de NO .

On remarque aussi des différences régionales significatives. Certains systèmes de modélisation pour la vallée du bas Fraser, dans la région du Pacifique, faisant intervenir des scénarios de réduction des émissions, reconnaissent que les émissions des États-Unis n'ont pas d'effet de transport à grande distance vers la région et, qui plus est, que des réductions significatives seront nécessaires au Canada (figure 17). Pour réduire les épisodes de smog dans les autres régions du Canada, il faudra opérer des réductions significatives tant des NO_x que des COV, aux échelles nationale et internationale. Les épisodes de fortes concentrations d'ozone sont aussi étroitement liés aux épisodes de matières particulaires en suspension.

3.5 Matières particulaires en suspension

On désigne par « matières particulaires en suspension », ou PM, diverses particules solides et liquides (aérosols) de taille microscopique.

Ce sont les PM grossières (de diamètre < 10 µm et > 2,5 µm) et les PM fines (de diamètre < 2,5 µm) qui réduisent la visibilité et suscitent les plus graves inquiétudes pour la santé humaine.

Concentrations maximales sur 1 h (ppb) dues aux réductions des émissions anthropiques de NO_x et de COV dans la vallée du bas Fraser, en Colombie-Britannique

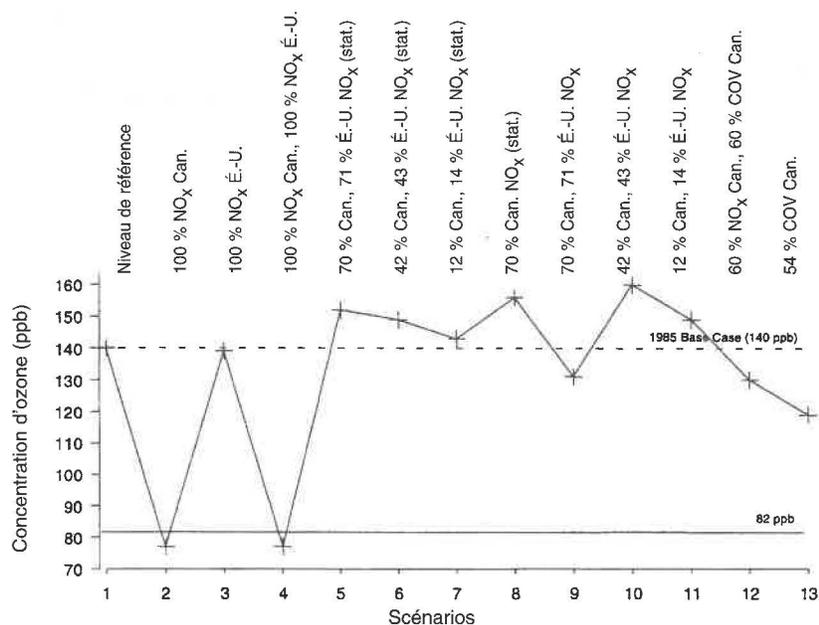


Figure 17. Source: Évaluation scientifique des NO_x et des COV au Canada en 1996 (1997)

Les matières particulaires ont des temps de séjour de quelques jours, surtout dans la basse stratosphère (moins de 2 km d'altitude). Parmi les sources naturelles de particules et d'aérosols figurent le sel de mer, la poussière du sol, les débris des feux de forêt, le pollen, les spores, les bactéries, les émissions biosynthétiques terrestres et marines, et les éruptions volcaniques. Ces dernières peuvent monter jusque dans la stratosphère, où les aérosols peuvent demeurer plusieurs mois. Les aérosols subissent des transformations chimiques et physiques, surtout à l'intérieur des nuages, qui se traduisent généralement par des précipitations.

La plupart des particules naturelles sont de la catégorie grossière (PM₁₀). Les aérosols

anthropiques sont des sulfates, des nitrates, du noir de fumée (suie), des composés organiques, et des poussières soulevées par le vent. La plupart des PM fines (PM_{2,5}) proviennent de la combustion de combustibles fossiles.

Les particules sont classées comme « primaires » si elles sont directement rejetées dans l'atmosphère, comme la fumée, la poussière des routes et la poussière des sols érodés soulevée par le vent. Les particules « secondaires » sont issues des réactions atmosphériques de gaz provenant de diverses sources. C'est à cette dernière catégorie qu'appartiennent la majorité des sulfates et des nitrates. Une certaine partie des aérosols organiques sont également dus à la transformation de gaz organiques volatils. La plus grande

partie des aérosols « secondaires » se situent dans la fraction fine, ou $PM_{2,5}$. Ce sont ces particules qui sont responsables des baisses de visibilité, en raison de leur capacité de diffuser et d'absorber la lumière. De plus, comme elles peuvent être inhalées, elles sont plus susceptibles de se déposer dans le système pulmonaire de l'homme, et sont la cause d'une augmentation de la mortalité et de la morbidité dans les grands centres urbains. Les premières cibles du plan de gestion pour les objectifs de qualité de l'air sont les particules primaires, ainsi que les émissions de certains gaz précurseurs bien identifiés (The Federal-Provincial Working Group, 1999).

Depuis 1974, le Réseau national de surveillance de la pollution atmosphérique (RNSPA) surveille le total des particules en suspension (TPS) à 154 stations. (Furmanczyk, 1998). Tous les gouvernements et administrations, des Municipalités au Fédéral, sont impliqués dans la surveillance des matières particulaires. Au Canada, 129 stations surveillent les PM_{10} et 59 les $PM_{2,5}$. Dans ce contexte, la surveillance distincte des PM_{10} et des $PM_{2,5}$ n'a commencé qu'en 1984.

Les matières particulaires sont nocives même à de très basses concentrations. Il n'y a pas de seuil connu en dessous duquel il n'y aura pas d'effets (The Federal-Provincial Working Group, 1999). Chaque grande ville du Canada a maintenant des concentrations dangereuses pour la santé humaine. À Sudbury, Windsor, Hamilton et Toronto, on a relevé des valeurs élevées des PM_{10} . Windsor, en particulier, dépasse la norme de l'EPA des États-Unis pour les $PM_{2,5}$, probablement en raison de l'intrusion d'émissions de particules fines au Michigan. Des observations effectuées à Windsor, Toronto, Walpole Island et Egbert, en Ontario, ont montré que les niveaux des $PM_{2,5}$ y étaient plus hauts en été qu'en hiver, contrairement à ce qui se passe dans la plupart des autres régions du Canada. Le transport à grande distance de polluants atmosphériques est

probablement à l'origine de cette situation. Une forte proportion de la masse totale des particules en été est composée d'aérosols de sulfate (SO_4). On a remarqué que les concentrations extrêmes de PM_{10} comme de $PM_{2,5}$ étaient plus élevées en été qu'en hiver dans le sud de l'Ontario (SENES, 1998).

Conscients de l'effet négatif des PM_{10} et des $PM_{2,5}$, les membres du Conseil canadien des ministres de l'Environnement (CCME) ont conclu en janvier 1998 un accord d'harmonisation, et l'on établit actuellement des normes pancanadiennes pour les matières particulaires. Le groupe de travail fédéral-provincial chargé de l'évaluation scientifiques des PM recommande les valeurs suivantes (The Federal-Provincial Working Group, 1999) :

Types de particules ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Concentration en $\mu\text{m}/\text{m}^3$ (Moyenne quotidienne)
PM_{10}	25 - 40
$PM_{2,5}$	15 - 25

Comme le SO_2 et les NO_x sont responsables d'une fraction significative des particules fines présentes dans l'atmosphère et qu'ils sont étroitement liés aux pluies acides et à l'ozone troposphérique, les stratégies visant à réduire les deux aideront aussi à réduire les matières particulaires, et inversement. Grâce à la réduction des émissions de SO_2 depuis 1986, les concentrations nationales médianes de PM_{10} et de sulfates ont respectivement baissé de $9 \mu\text{mg}/\text{m}^3$ et de $0,5 \mu\text{mg}/\text{m}^3$ (Dann and Brooks, 1997). Pour la période de 1987 à 1996, les PM_{10} ont baissé de 28 % et les $PM_{2,5}$ de 27 % (Brook, 1998). D'ici 2010, les émissions de NO_x devraient se situer à 10 % en dessous des niveaux de 1990 (Gouvernement du Canada, 1998) et cette baisse s'accompagnera d'une réduction supplémentaire des matières particulaires.

3.6 Polluants atmosphériques dangereux (PAD)

Les polluants atmosphériques dangereux sont des substances chimiques présentes dans l'atmosphère qui, en concentrations suffisantes, ont des effets toxiques sur la santé de l'homme et d'autres espèces animales, et peuvent causer des dommages aux systèmes écologiques et sociaux.

Aux termes de la Loi canadienne sur la protection de l'environnement (LCPE), ce sont les substances qui répondent aux critères suivants qui posent le plus de danger pour l'environnement :

- ❖ les composés persistants (une fois libérés, ils demeurent longtemps dans l'environnement);
- ❖ les composés qui s'accumulent dans les tissus vivants;
- ❖ les composés qui sont issus d'une activité humaine;
- ❖ les composés qui sont définis comme « toxiques ».

Les substances toxiques ne figurent pas toutes sur la liste de la LCPE. Les industries dont les rejets dépassent le niveau critère minimum de l'Inventaire national des rejets de polluants (INRP) sont incluses dans l'inventaire. En Ontario seulement, la quantité rejetée des 23 substances de la liste de la LCPE est de 4 095 tonnes par an, les polychlorobiphényles (PCB) étant considérés comme des marqueurs pour d'autres substances persistantes et dangereuses. Autour du bassin des Grands Lacs, les concentrations de PCB semblent relativement uniformes. Les pesticides et l'utilisation qui en est faite sont à l'origine d'un autre ensemble de polluants dangereux. Ils présentent cependant une fluctuation saisonnière, qui est particulièrement marquée avec des épisodes de conditions climatiques inhabituelles (SENES, 1998).

Des scientifiques du Centre des recherches atmosphériques (CARE), à Egbert (Ontario), ont trouvé que les concentrations de mercure en

phase gazeuse montraient une corrélation directe avec la température et l'humidité ambiantes, et une corrélation inverse avec les concentrations d'ozone atmosphérique. Ces corrélations indiquent que des changements de la circulation atmosphérique et/ou des changements des températures, humidités ou concentrations d'ozone moyennes, consécutifs à des changements du climat, pourraient aussi influencer sur les concentrations de mercure gazeux. Par modélisation, on a constaté que la revolatilisation du mercure des eaux des Grands Lacs était d'une ampleur comparable à celle du dépôt (SENES, 1998).

Aux sites d'observation d'Egbert et de Point Petre, en Ontario, on a noté des niveaux élevés de 11 espèces élémentaires de sources anthropiques : argent, brome, chlore, cuivre, iode, indium, antimoine, sélénium, étain, tungstène et zinc. Les sources possibles de ces éléments étaient la combustion du pétrole et du charbon, le sel de déglacement des routes, l'exploitation minière, l'incinération et les fonderies. Environ 20 % du chrome présent dans l'air ambiant était du chrome hexavalent (Cr(vi)), qui a été identifié comme cancérigène. La majeure partie du Cr(vi) était sous la forme de particules respirables (c.-à-d. PM₁₀). Quelques études ont été menées sur les variations saisonnières de ces éléments (SENES, 1998).

Le benzène, une autre substance cancérigène, est très abondant près des grandes rues et à des sites industriels, tels que les raffineries. La première source de benzène est le gaz d'échappement des automobiles. Entre 1989 et 1994, les niveaux du benzène ont baissé de 38 %. Malheureusement, les études sur le benzène ne concernaient que des régions urbaines (SENES, 1998).

Il persiste beaucoup d'inconnues dans le problème des PAD : estimations des émissions des charges des dépôts humide et sec; volatilisaton à la surface des eaux; fluctuations saisonnières; taux de transfert; etc.

4. Approches intégrées à la compréhension du changement climatique

Tous ces problèmes sont liés par un ensemble complexe de relations entre les émissions, les processus atmosphériques, l'absorption par la biosphère et des processus environnementaux. Déterminer les effets d'un problème particulier est une importante première étape vers la compréhension des effets intégrés et cumulatifs des problèmes atmosphériques. Les quelques études qui tentent de comprendre les échanges, les moments de survenue et les interactions les plus significatifs entre les problèmes atmosphériques multiples ont mis en évidence le besoin de recherches supplémentaires pour comprendre la connectivité et la dynamique qui les relient aux systèmes météorologiques en jeu.

Il est évident que, pour examiner l'ensemble des problèmes atmosphériques interreliés, comme le dépôt acide, le changement climatique, l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique, les épisodes d'ozone troposphérique, les polluants

atmosphériques dangereux et les matières particulaires en suspension, il faut adopter une approche intégrée globale, et pas seulement étendre l'évaluation ou le modèle d'un problème particulier (figure 18). Dans une grande mesure, les scientifiques et les analystes des politiques se sont penchés sur chacun de ces problèmes séparément, à des échelles spatiales et temporelles diverses. Persister à tenter de régler les problèmes individuellement peut déboucher sur des politiques et mesures réglementaires qui se contredisent. Par exemple, les aérosols de sulfates causent du dépôt acide, mais aussi absorbent et diffusent le rayonnement solaire, et donc masquent le plein impact du réchauffement par effet de serre. Dans les régions industrialisées, où les concentrations d'aérosols sulfatés sont particulièrement élevées, le refroidissement qu'ils induisent peut dépasser 25 % du réchauffement causé par le dioxyde de carbone (Rodhe et al., 1995). Les connaissances scientifiques, les modèles et les politiques ne visant que l'un et pas l'autre peuvent exacerber les problèmes environnementaux.

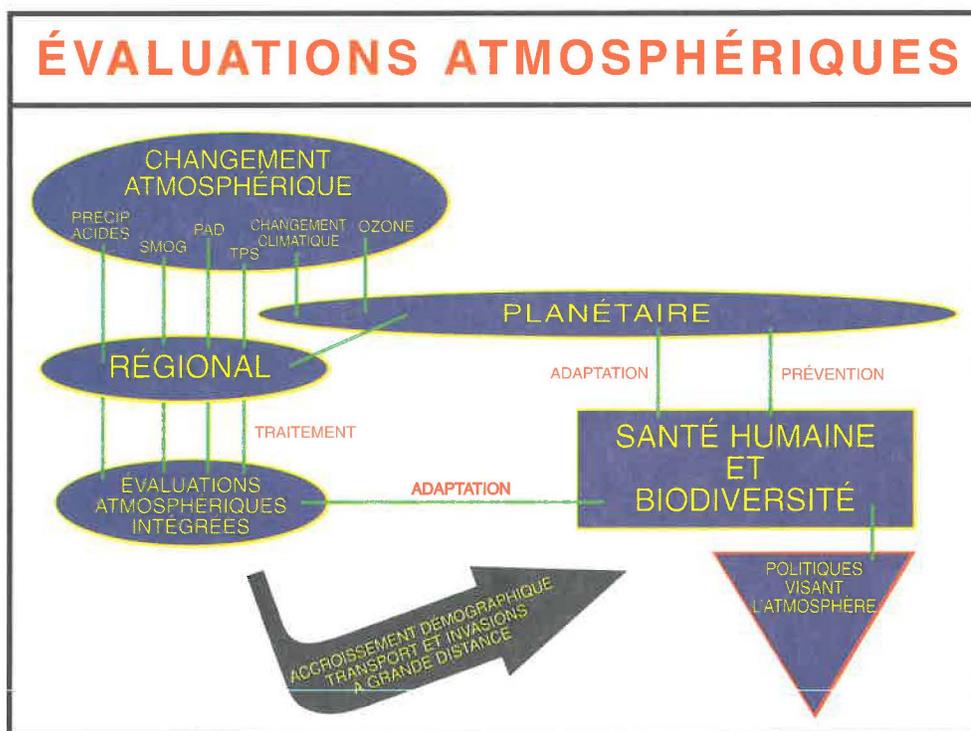


Figure 18. Source: MacIver (1998).

Tableau 2

Résumé qualitatif des liens entre les problèmes atmosphériques. Les effets des problèmes de changement atmosphérique portés dans la rangée supérieure sur les problèmes atmosphériques figurant dans la colonne de gauche sont cotés 0 (aucun effet), 1 (un certain effet), 2 (fort effet) ou I (inconnu). Les PAD ne sont pas inclus du fait de leur grande diversité.

PROBLÈME	Changement climatique	Appauvr. de l'ozone stratosph.	Dépôt acide	SMOG	Matières particulaires en suspension
Changement climatique	-1 mais plusieurs effets compensateurs	-1 mais plusieurs effets compensateurs		+ 1	-1 (éch. glob.) -2 (éch. rég.)
Appauvr. de l'ozone stratosph.	+ 1		0	- 1	+ 1
Dépôt acide	+ 2	+ 1		U	+ 1
SMOG	+ 2	+ 1	+ 1		très relié
Matières particulaires en suspension	+ 1	+ 1	+ 1	très relié	

Les évaluations intégrées et cumulatives des problèmes atmosphériques dépassent les limites d'une discipline unique et prennent en compte plusieurs secteurs ou aspects du problème. Ces évaluations intégrées traitent les diverses disciplines de façon plus équilibrée. On peut les considérer comme un « réseau de connaissances » qui impose un réel processus d'intégration, et cette intégration a une importance particulière pour la compréhension des liens scientifiques entre les problèmes et leurs multiples effets sur la biodiversité et la santé humaine (Rothman and Robinson, 1997).

Une approche cumulative développée par Maarouf et Smith (1997), présentée au tableau 2, souligne les interactions entre les six problèmes atmosphériques. En utilisant des valeurs de 0 (effet nul) à 2 (effet prononcé), on évalue le caractère positif ou négatif de l'effet. Par exemple, le réchauffement planétaire contribuera à la destruction de l'ozone stratosphérique par l'intermédiaire de diverses réactions chimiques mettant en jeu les gaz à effet de serre (+1). Par contre, l'appauvrissement de l'ozone dans la basse stratosphère a un effet refroidissant net sur le climat (-1).

En comparaison, l'approche quantitative renferme nombre de modèles et scénarios de prédiction environnementale, la mieux connue et acceptée de ces approches étant l'approche écosystémique (Munn et al., 1997). Pour Regier (1995), il y a trois définitions de l'approche écosystémique : 1) les systèmes écologiques, 2) l'analyse de systèmes complexes et 3) l'émergence d'un régime culturel. Ici, les structures écologiques, socio-économiques et politiques sont intégrées dans un cadre conceptuel unique. Cette approche s'est révélée fructueuse dans des évaluations scientifiques comme celle des Grands Lacs. Ce cadre, qui fournit une perspective à long terme dans laquelle les facteurs extérieurs peuvent changer, prend en compte les modifications de la population, des frontières politiques et du paysage.

Au sein de cette approche, plusieurs méthodes peuvent être adoptées (Munn *et al.*, 1997) :

- ❖ modèles des cycles biogéochimiques
- ❖ modèles de dose-effets et de stress-effets
- ❖ évaluations du risque
- ❖ principe du sans-regret
- ❖ économie écologique/principe de précaution
- ❖ évaluation environnementale cumulative

Un grand nombre de ces méthodes pourraient être utiles dans les évaluations multi-problèmes, utilisant soit une technologie de type SIG, des classifications et/ou des modèles de mise à l'échelle, mais toutes doivent être développées et testées de façon intégrée dans des cadres précis. On trouvera ci-dessous un bref résumé de quelques-unes de ces méthodes :

4.1 Modèles des cycles biogéochimiques (BGC)

Les modèles BGC représentent le recyclage d'une ou plusieurs substances (souvent un élément, c.-à-d. le sulfate) entre

divers réservoirs du milieu naturel et humain. Ce modèle non seulement fournit des estimations quantitatives des stocks et flux de la substance, mais aussi décrit les processus qui induisent les changements. Il pourrait être utilisé pour relier divers problèmes atmosphériques, s'il incluait plusieurs substances. Par exemple, le méthane, en plus d'être un gaz à effet de serre, intervient dans les processus chimiques menant à l'appauvrissement de l'ozone troposphérique et à l'acidification, via les oxydes de soufre et d'azote.

Cette approche aide à trouver les voies et processus qui sont communs à plusieurs éléments. Par exemple, dans les cycles du soufre et du carbone, la combustion des combustibles fossiles fournit une voie commune d'injection dans l'atmosphère, et les deux éléments jouent chacun un rôle, bien que différent, dans le forçage radiatif du climat. Les particules de soufre renvoient le rayonnement solaire incident vers l'espace; elles constituent aussi des noyaux très efficaces de condensation dans les nuages. Avec un grand nombre de noyaux, il y a davantage de gouttelettes, qui sont aussi plus grosses. Cette situation change à son tour la durée de vie des gouttelettes et leurs propriétés optiques, comme l'albédo du nuage. Les émissions de soufre peuvent masquer partiellement les effets radiatifs des émissions de dioxyde de carbone, et atténuer ainsi les effets du changement climatique. Par ailleurs, l'effet de fertilisation découlant de la charge anthropique en azote et/ou en phosphore encouragerait la croissance du phytoplancton marin, d'où simultanément capture de dioxyde de carbone et augmentation de la production de diméthylsulfide, accroissement du nombre de noyaux de condensation et éclaircissement de l'albé-

do planétaire (degré de réflectivité). Cet effet synergique des trois éléments - carbone, azote et soufre - peut tendre à faire baisser les températures globales. Un autre effet négatif des aérosols de sulfates est leur capacité d'appauvrir la couche d'ozone stratosphériques (Whelpdale and Williams, 1997).

Les limites de cette approche tiennent à la compréhension scientifique détaillée nécessaire pour décrire le comportement d'un élément pris séparément. Elle ne peut pas facilement traiter simultanément deux cycles ou plus, ni expliquer adéquatement les interactions entre les divers cycles (Whelpdale and Williams, 1997). Cependant, ces modèles sont utiles pour évaluer le risque et l'incertitude.

4.2 Modèles de dose-effets et de stress-effets

Ces modèles sont destinés à déterminer la relation quantitative entre la grandeur d'un stress et la réponse du système qui le subit. Parmi les agents agresseurs pourraient figurer les concentrations d'ozone troposphérique, l'intensité du rayonnement UV-B, le dépôt acide ou les fluctuations des niveaux de CO₂. Les récepteurs de ces stress sont la population humaine, le phytoplancton et la totalité de l'écosystème terrestre. La dose d'agent agresseur doit dépasser une valeur seuil pour induire une réaction. Si elle continue à augmenter, elle atteint un point de saturation au-delà duquel il n'y a pas d'effet supplémentaire (Whelpdale and Williams, 1997). Selon une étude récente, des concentrations élevées de dioxyde de carbone sont associées à une production plus élevée de la plante, mais avec une valeur nutritive moindre. Des expériences menées sur des

champs de blé exposés à une valeur dépassant de 200 ppm le niveau habituel ont révélé une teneur en protéines plus basse que dans les conditions optimales (Thompson, 1998). Un des avantages de cette approche est qu'elle permet d'établir une relation quantitative entre la cause et l'effet. En l'utilisant convenablement pour des récepteurs divers, on peut déterminer les réponses relatives et identifier le récepteur le plus sensible. Une de ses limitations est qu'il est difficile d'extrapoler des conditions contrôlées du laboratoire aux conditions en champ. De plus, les relations qui sont élaborées pour un agent stressant unique peuvent ne pas s'appliquer aux situations où plusieurs sont présents simultanément.

Décrire le reste des méthodes utilisées dans l'approche écosystémique dépasse la portée du présent document. Il est cependant important de définir les trois types d'intégration (Rothman and Robinson, 1997) :

- a) L'intégration verticale, dans laquelle l'activité humaine exerce une pression qui induit des changements dans l'environnement. Cette situation à son tour a des impacts sur les systèmes non humains et, directement ou indirectement, sur les systèmes humains. En conséquence, il peut y avoir ou non changement de l'activité humaine, et le cycle se poursuit.
- b) L'intégration horizontale, qui intègre les perspectives par secteur, région ou problème. Elle pose entre autres les questions suivantes : quelle est la portée de la substance de l'évaluation? Se concentre-t-elle sur plusieurs secteurs de l'activité humaine et/ou l'environnement? Prend-on en compte les connexions entre diverses régions? Prend-on en compte les interac-

tions entre divers facteurs sociaux et environnementaux?

- c) L'intégration totale, qui intègre les réponses humaines et environnementales dans un tableau plus dynamique. Elle travaille à partir de scénarios pour déterminer le degré de changement et évaluer les impacts de celui-ci. Cela exige une plus grande expansion des problèmes en intégrant à l'analyse la complexité des réactions et des liens. On doit alors prendre grand soin que l'ensemble de l'étude soit facile à suivre.

On pourrait voir des exemples d'approches intégrées dans l'élaboration de nombreux modèles. Avec une brève description de deux ou trois de ceux-ci, on pourrait avoir une indication de leur profondeur et de leur portée.

4.3 Modèle d'évaluation intégrée (MEI)

Le MEI est un système de modélisation sous Windows sur PC, conçu pour modéliser la totalité du système de dépôt acide, des émissions et coûts de maîtrise jusqu'aux effets sur la vie aquatique, les forêts, les espèces sauvages, les matériaux et la santé. La version actuelle du MEI se compose d'un inventaire des émissions de SO_2 , d'un module des sources-récepteurs atmosphériques (40 régions sources, 15 régions réceptrices) de dépôt humide de SO_4 , d'un module de chimie aquatique et de plusieurs modules des effets sur les oiseaux aquatiques et les poissons. Le MEI peut être exécuté soit en mode scénario pour prédire l'impact des changements des émissions de SO_2 sur le dépôt humide de SO_4 , soit en mode d'optimisation pour calculer les changements des émissions de SO_2 qui permettront d'atteindre la réduction souhaitée dans les niveaux de dépôt humide de SO_4 . C'est un outil utile pour les évaluations d'examen préalable de l'impact et des effets environnementaux des

changements dans les émissions de SO_2 (Gong, 1998).

Certains modèles intégrés comme RAINS et IMAGE permettent d'intégrer plusieurs problèmes atmosphériques. Des modèles d'évaluation intégrée ont aussi été utilisés dans les études du changement climatique (Maarouf and Smith, 1997).

4.4 AURAMS (modèle unifié régional de la qualité de l'air du SEA)

Le modèle unifié régional de la qualité de l'air du SEA (AURAMS) est un nouveau système de modélisation multi-polluants multi-problèmes, qui couple des modèles ou des modules nouveaux et existants en un cadre unifié de modélisation (Gong, 1998). Les modèles existants sont les suivants :

- a) le modèle communautaire compressible méso-échelle/modèle des traceurs chimiques (MC2/MTC), soit un modèle de pronostic météorologique, le MC2, couplé à un modèle d'échelle régionale des oxydants photochimiques, le MTC;
- b) le modèle du dépôt acide et des oxydants (ADOM), modèle régional du dépôt acide; et
- c) le module canadien des aérosols (MCA), module des aérosols présentement utilisé aussi bien dans un modèle climatologique planétaire que dans un modèle régional.

Le quatrième élément de base est le système canadien de traitement des émissions (CEPS), système de modélisation des émissions pour les modèles de qualité de l'air à méso-échelle qui est nécessaire pour créer des fichiers d'entrée des émissions. Le développement du modèle est né au départ du besoin d'appuyer les normes pan-canadiennes visant les matières particulaires et

l'ozone troposphérique. Cependant, comme certains des processus chimiques et physiques à prendre en compte pour modéliser les PM sont liés à d'autres problèmes, p. ex. l'ozone troposphérique et le dépôt acide, ce modèle des PM équivaut en fait à un modèle de qualité de l'air multi-polluants multi-problèmes. Par conséquent, ce modèle « unifié » sera capable de convertir les estimations d'émissions en qualité de l'air et donc d'évaluer l'impact des scénarios de réduction des émissions (séparément ou ensemble) pour les PM, l'ozone troposphérique, le dépôt acide et, à terme, les composés toxiques de l'atmosphère.

Dans tous ces modèles intégrés, il faut prendre en considération le moment de survenue, en tant que paramètre de la mise en oeuvre de politiques. En 2010, le Protocole de Kyoto demandant des réductions des gaz à effet de serre aura été mis en oeuvre, ce qui implique également une réduction concomitante des sulfates, des nitrates et des COV. Ces mesures entraîneront aussi une réduction de l'ozone troposphérique, avec des conséquences encore inconnues sur les lacs d'eau claire, qui continueront d'être affectés par le rayonnement UV-B, puisque l'ozone stratosphérique sera alors à son maximum d'appauvrissement.

5. Conclusion

La complexité des problèmes atmosphériques exige que l'on dispose de plusieurs niveaux d'intégration pour élaborer une approche cohérente permettant de régler les problèmes pris séparément, ainsi que les interactions synergiques et non linéaires qui s'exercent entre eux tous. Les six problèmes atmosphériques sont liés directement à la circulation atmosphérique. Lors du développement d'outils pour aider à prévoir et évaluer les risques, il est nécessaire d'évaluer les compromis et les avantages accessoires futurs.

Les évaluations cumulatives et les approches de modélisation intégrées dans un cadre basé sur les connaissances scientifiques et les politiques exigent la coopération de disciplines diverses afin d'incorporer la science de l'environnement, la recherche sur l'atmosphère, l'économique (coûts de l'action et de l'inaction), les sciences sociales et les sciences politiques dans l'élaboration de stratégies d'adaptation et d'atténuation. Toutes ces rétroactions seront indispensables pour répondre à la question fondamentale des raisons des changements atmosphériques et des conséquences nettes de ceux-ci.

Par exemple, le Canada a signé à Kyoto une entente exécutoire de réduction des gaz à effet de serre. Cependant, les aérosols de sulfate (p. ex. le dépôt sec) atténuent le réchauffement planétaire. De plus, la vapeur d'eau, le NO₂ et les gaz à effet de serre qui causent les nuages stratosphériques polaires perpétuent l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique. En outre, les avantages pour les végétaux de la fertilisation par le dioxyde de carbone peuvent compenser les effets des pluies acides et de l'ozone troposphérique.

Les orientations futures de la science devront continuer à bâtir sur les réalisations, modèles, évaluations et ententes de politiques visant un problème unique. En même temps, il est recom-

mandé de développer les modèles atmosphériques et évaluations intégrées selon cinq grands axes :

- ❖ Utilisation d'un cadre intégré d'évaluation multi-problèmes qui combine les technologies de type SIG, les modèles et/ou les méthodes de mise à l'échelle pour appuyer le développement de stratégies de prévision environnementale.
- ❖ Ciblage des moments de survenue cumulatifs des changements atmosphériques, sur la base des objectifs individuels science-politiques. Par exemple, pour nombre de problèmes atmosphériques, les échéances se situent aux alentours de 2010. Si ces objectifs sont atteints, quels seraient alors la structure et le fonctionnement de l'atmosphère et quels éléments entreraient en conflit?
- ❖ Développement d'un cadre d'évaluation intégrée et d'un modèle qui prédise de manière fonctionnelle les impacts accessoires de la réduction d'un problème atmosphérique, comme les gaz à effet de serre, sur tous les autres, ainsi que les conséquences nettes en matière de sciences et de politiques.
- ❖ Établissement d'un lien fonctionnel entre la **totalité** de l'atmosphère et d'autres problèmes entièrement intégrés, comme la santé humaine et la biodiversité, afin d'évaluer complètement les avantages nets et les effets de rétroaction sur l'atmosphère.
- ❖ Développement de stratégies d'atténuation et d'adaptation dans le contexte de l'atmosphère **totale** et de son évolution.

6. RÉFÉRENCES

- Bass, B. and J.R. Brook. 1997. Downscaling Procedures as a tool for integration of multiple air issues. *Environmental Monitoring and Assessment* Vol 46: 151-174.
- Battan, Luis. 1966. The Unclear Sky - A Meteorologist Look at Air Pollution. Anchor Books Doubleday and Company, Inc. New York. 77 pp.
- Bayley, S.E.; R.S. Behr and C.A. Kelly. 1986. Retention and release of sulphur from freshwater wetland. *Water Air Soil Pollution*, Vol. 31: 101-114 pp.
- Boden, T.A.; D.P. Kaiser; R.J. Sepanski and F.W. Stoss (eds.). 1994. Trends '93: A Compendium of Data on Global Change. ORNL/CDIAC-65, Oak Ridge National Laboratory.
- Brook, Jeffrey. 1998. Per. Comm. Research Scientist, Air Quality Research Division. AES. Environment Canada.
- Burnett, R.T.; J.R. Brook; W.T. Yung and R.E. Dales. 1997. Association Between Ozone and Hospitalization for Respiratory Diseases in 16 Canadian Cities. *Environmental Research*, Vol. 72: 24-31 pp.
- Évaluation scientifique des NO_x et des COV au Canada en 1996. 1997. Synthèse des résultats clés du Programme scientifique sur les NO_x et les COV. 79 p.
- Dann, T. and J. Brook. 1997. PM₁₀ and PM_{2.5} concentration and Trends at Canadian Urban and Rural Sites. *Proceedings of the Air and Waste Management Association Specialty Conference - emerging Air Issues for the 21st Century: The Need for Multi-Disciplinary Management*. Calgary, Alberta, Sep. 22-24.
- Data Analysis Working Group. 1996. Ground-level ozone and its precursors, 1980-1993. Canadian 1996 NO_x/VOC Science Assessment. 295 pp.
- Dillon, P.J.; L.A. Molot and M. Futter. 1997. The Effect of El Niño-related Drought on the Recovery of Acidified Lakes. *Environmental Monitoring and Assessment* Vol. 46: 105-111 pp.
- Environnement Canada. 1997. Les pluies acides au Canada : Rapport d'évaluation de 1997 : les résultats. Vol 1. 17 pp.
- Fergusson, Angus. 1998. Comm. pers. Business Planning and Development Division, AES. Environment Canada.
- Francis, D. et H. Hengeveld. 1998. Sommaire du changement climatique : phénomènes météorologiques extrêmes. Environnement Canada, 37 p.
- Furmanczyk, Tom. 1988. Pers. Comm. Stat. Analyst with Environment Canada, Environmental Protection Service, Pollution Data Branch. Dec. 4.
- Gong, Wanmin. 1998. Per. Comm. Modeling Scientist, Modeling and Integration Research Division. AES. Environment Canada.
- Gouvernement du Canada. 1998. Accord Canada-Etats-Unis sur la qualité de l'air - Rapport d'étape 1998. 28 p.
- Health Objective Working Group. 1996. Canadian 1996 NO_x/VOC Science Assessment. 109 pp.
- Heck, W.W.; C.S. Furiness; E.B. Cowling and C.K. Sims. 1998. Effects of Ozone on Crop, Forest, and Natural Ecosystems: Assessment of Research Needs. *Environmental Managers*, October issue, 11- 22pp.
- Hengeveld, H. 1995. Comprendre l'atmosphère en évolution : Revue de la science de base et des implications d'un changement du climat et d'un appauvrissement de la couche d'ozone. Rapport sur l'état de l'environnement No. 95-2, 70 p.
- IADN. 1998. Technical Summary of Progress under the Integrated Atmospheric Deposition Program 1990-1996. US/Canada. IADN Scientific Steering Committee, January.
- Last J.; K. Trouton and D. Pengelly. 1998. Taking our Bread Away - The Health Effects of Air Pollution and Climate Change. David Suzuki Foundation. 51 pp.
- Maarouf A. and J. Smith. 1997. Interactions Amongst Policies Designed to Resolve Individual Air Issues, *Environmental Monitoring and Assessment* Vol 46: 5-21 pp.

- MacIver, D.C. 1998. Atmospheric Change and Biodiversity, *Environmental Monitoring and Assessment* Vol 49: 177-189 pp.
- Munn, R.E., A. Maarouf and L. Cartmale. 1997. Atmospheric Change in Canada: Assessing the whole as well as the parts. *Environmental Monitoring and Assessment* Vol. 46 (1-2): 1-4 pp.
- NASA. 1998. *NASA News*. <http://pao.gsfc.nasa.gov/pub/pao/releases/1998/98-159.htm>.
- Phillips, D. 1990. Les climats du Canada. Approvisionnement et Services Canada. 176p.
- Regier, Henry. 1995. Atmospheric Change in Canada: Assessing the whole as well as the parts. Institute for Environmental Studies, U of T. 36 pp.
- Ro, Chul-Un. 1997. Pers. comm. Senior Scientist. Air Quality Measurements and Analysis, AES, Environment Canada.
- _____. 1998. Pers. comm.
- Rodhe, H.; P. Grennfelt; J. Wisniewski; C. Agren; G. Bengtsson; K. Johansson; P. Kauppi; V. Kucera; L. Rasmussen; B. Rosseland; L. Schotte and G. Sellden. 1995. Acid Reign '95? – Conference Summary Statement. *Water, Air, and Soil Pollution*. Vol. 85: 1-14 pp.
- Rothman, D.S. and J.B. Robinson. 1997. Growing Pains: A conceptual framework for considering integrated Assessments. *Environmental Monitoring and Assessment* Vol. 46: 23-43, pp.
- SENES Consulting Ltd. 1998. Great Lakes Basin. Draft report. Prepared for Ontario Region - Environment Canada
- Slingo, T. 1989. Wetter clouds dampen global greenhouse warming. *Nature*, Vol. 341. 104 pp.
- The Acidifying Emissions Task Group. 1997. Towards a National Acid Rain Strategy. Environment Canada, 98 pp.
- The Federal-Provincial Working Group. 1998. Ground-Level Ozone. Science Assessment Document. Draft, APAC, Environment Canada, March 520 pp.
- The Federal-Provincial Working Group. 1999. National Ambient Air Quality Objectives for Particulate Matter. Part 1 Science Assessment Document.
- Thompson, T. 1998. "High CO₂ produces less nutritious plants." *Daily News*. Aug, 18, 1998. University of Arizona Department of Soil, water and Environmental Sciences.
- Wardle, D. I., J.B. Kerr, C.T. McElroy et D.R. Francis 1997. La science de l'ozone : Perspective canadienne sur la couche d'ozone. Protocole de Montréal, Environnement Canada, 119 p.
- Wardle, D. and V. Fioletov. 1998. Pers. comm. Senior Scientist Chief of Experimental Studies Division, and research scientist of AES, Environment Canada.
- Wallace, J. M. and P. V. Hobbs. 1977. Atmospheric Science an Introductory Survey. Academic Press Inc. New York. 467 pp.
- Whelpdale D.M. and Williams, G.R. 1997. Linking Air Issues with dose-response and Biogeochemical-cycle models. *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 46: 59-71 pp.