

# Surveillance environnementale

---

Tom Brydges

La référence bibliographique de ce document se lit  
comme suit:

Brydges T (2003)

Surveillance environnementale.

In : Environnement et santé publique - Fondements et  
pratiques, pp. 823-846.

Gérin M, Gosselin P, Cordier S, Viau C, Quénel P,  
Dewailly É, rédacteurs.

Edisem / Tec & Doc, Acton Vale / Paris

Note : Ce manuel a été publié en 2003. Les connaissances  
ont pu évoluer de façon importante depuis sa publication.

## Surveillance environnementale

---

Tom Brydges

### **1. Introduction**

### **2. Programmes de surveillance environnementale**

2.1 Surveillance simple

2.2 Surveillance par relevés

2.3 Surveillance au moyen d'indicateurs ou de substituts

2.4 Surveillance intégrée

### **3. Nature de certains problèmes environnementaux actuels**

3.1 Certains éléments naturels et leurs composés peuvent causer des problèmes

3.2 Les effets écologiques sont à long terme

3.3 Les effets se produisent à l'échelle de l'écosystème

3.4 Les effets écologiques de divers stress se superposent

3.5 Les superficies touchées par le stress environnemental ont augmenté

### **4. Réactions mondiales aux défis environnementaux**

4.1 Conventions internationales visant à protéger l'environnement

### **5. Application des résultats de la surveillance**

### **6. Programmes nationaux et internationaux de surveillance**

6.1 Réseau d'évaluation et de surveillance écologiques du Canada

6.2 Surveillance de l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique

6.3 Programmes de coopération internationale mis sur pied dans le cadre de la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance

6.4 Dispositif national d'alerte rapide pour les pluies acides (DNARPA)

6.5 Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) et Système mondial de surveillance continue de l'environnement (GEMS)

6.6 Système mondial d'observation du climat

6.7 Réseaux bénévoles de surveillance

### **7. L'avenir**

## 1. INTRODUCTION

Le dictionnaire Robert donne du verbe «surveiller» la définition suivante: «Observer avec une attention soutenue, de manière à exercer un contrôle, une vérification». Tous les programmes de surveillance environnementale (ou écologique) exigent donc la prise de mesures à intervalles réguliers pendant une très longue période.

Deux raisons fondamentales justifient la surveillance de l'environnement naturel: la première vise à établir les conditions de base qui représentent l'état actuel des éléments de l'écosystème; la deuxième vise à détecter les changements dans le temps, particulièrement ceux qui s'écartent de la variation naturelle de ces paramètres (Hicks et Brydges, 1994). La nature même de ces raisons souligne l'importance de tenir des registres à long terme.

Une troisième raison étroitement associée aux deux premières est le besoin de définir la cause de tous les changements observés. Le présent chapitre fournit une description détaillée des diverses méthodes de surveillance, une liste des problèmes qui se posent avec les réseaux de surveillance actuels et une description des réseaux les plus représentatifs.

## 2. PROGRAMMES DE SURVEILLANCE ENVIRONNEMENTALE

Les programmes de surveillance environnementale se répartissent en quatre grandes catégories: surveillance simple, surveillance par relevés, surveillance au moyen d'indicateurs et de substituts et surveillance intégrée.

### 2.1 Surveillance simple

La surveillance simple consiste à enregistrer les valeurs d'une seule variable en un même point géographique au cours du temps. Dans la pratique, ce genre de surveillance est toutefois fréquemment élargi afin d'inclure des mesures du même paramètre à divers endroits. La mesure de la température de l'air est un exemple d'application d'une surveillance simple. Des données provenant du monde entier servent à calculer la température planétaire moyenne de l'air, qui est l'une des mesures clés dans le problème du changement climatique. Les graphiques de la

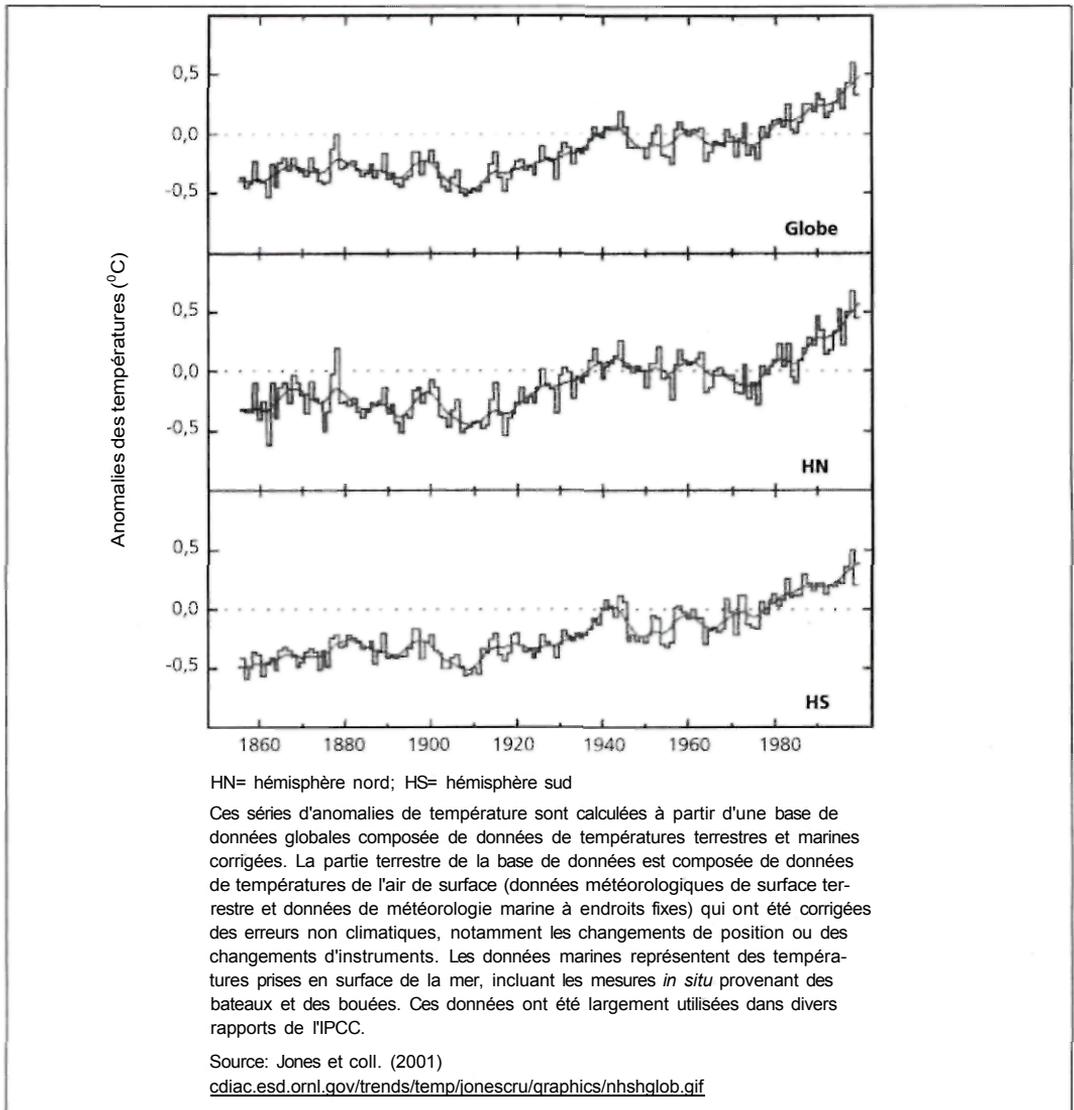
figure 31.1 représentent les plus longs enregistrements de températures qui puissent être établis à partir de mesures directes de la température de l'air et qui servent fréquemment à montrer que la moyenne globale a connu une hausse au cours des 150 dernières années.

Un autre exemple de surveillance simple est la mesure des concentrations atmosphériques de bioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le principal gaz responsable de l'effet de serre. La figure 31.2 présente l'enregistrement de la surveillance à long terme de l'observatoire du Mauna Loa, à Hawaii, aux États-Unis. Elle montre clairement une augmentation des concentrations; cette observation a eu beaucoup d'influence dans le dossier du réchauffement de la planète. Cette méthode de surveillance simple a été poussée au point où les concentrations atmosphériques de CO<sub>2</sub> sont maintenant mesurées dans de nombreux endroits de la planète.

### 2.2 Surveillance par relevés

Dans bien des cas, les problèmes environnementaux sont devenus évidents sans qu'on possède des enregistrements de surveillance documentant rétrospectivement les changements. Un registre des données historiques manquant pour une région peut être remplacé par un relevé des conditions actuelles prévalant dans une autre région géographique. Le relevé de surveillance est conçu de manière à inclure des zones touchées par le stress observé et d'autres zones qui ne le sont pas. On suppose que les régions touchées ont eu, à un certain moment de leur histoire, des caractéristiques environnementales semblables à celles des régions indemnes.

Par exemple, l'eutrophisation des lacs Érié et Ontario est devenue évidente durant les années 1960. Un enregistrement de surveillance historique aurait pu montrer une hausse simultanée des concentrations de phosphore et d'algues. Cependant, aucune surveillance de ce genre n'avait été entreprise. En 1968, Vollenweider a pallié le manque de données historiques en comparant les données d'études contemporaines sur la croissance des algues avec les concentrations de substances nutritives de nombreux lacs ayant atteint divers stades d'eutrophisation. Il a établi une relation entre la charge totale en phosphore et la croissance des

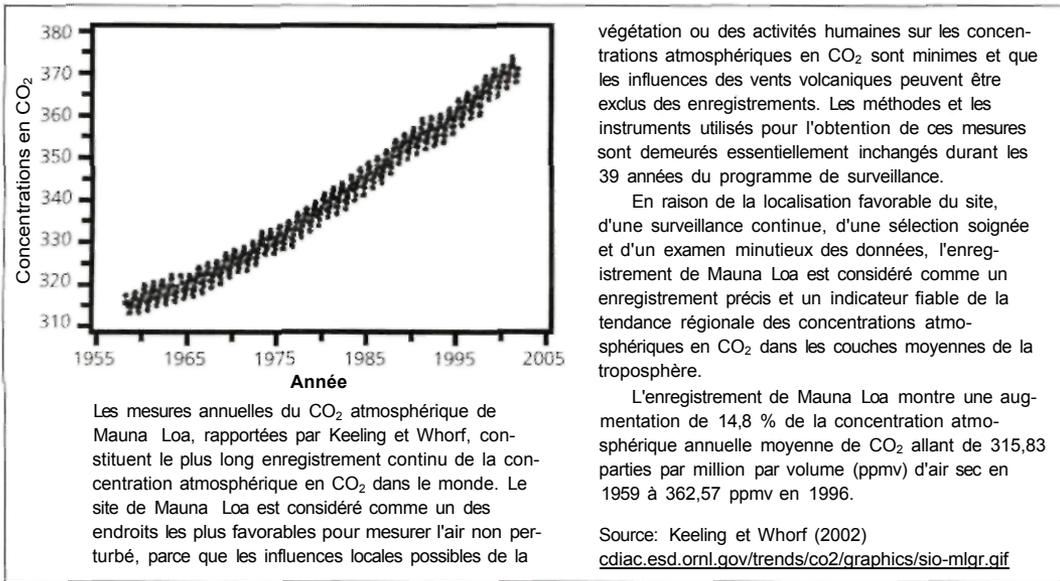


**Figure 31.1** Anomalies des températures annuelles du globe et des hémisphères 1856-1999

algues dans divers lacs (eutrophiés ou non). Il a appliqué cette relation aux lacs Érié et Ontario en supposant que les concentrations historiques d'algues et de matières nutritives étaient semblables à celles des lacs intacts (Vollenweider, 1968). En 1969, la Commission mixte internationale (Canada et États-Unis) a appliqué ce raisonnement à la mise sur pied de programmes de réduction du phosphore (CMI, 1969). Ces programmes de réduction ont réussi à faire baisser les concentrations de phosphore et la croissance des algues (Dobson, 1994).

### 2.3 Surveillance au moyen d'indicateurs ou de substituts

Une autre façon de compenser le manque d'enregistrements consiste à utiliser de l'information substitutive afin d'en déduire des conditions historiques. Dans le cadre de cette approche, les données sont tirées de l'information «stockée» dans l'environnement et reliée à une variable donnée. Par exemple, il serait idéal de posséder les enregistrements de température depuis le début des temps pour être en mesure d'évaluer

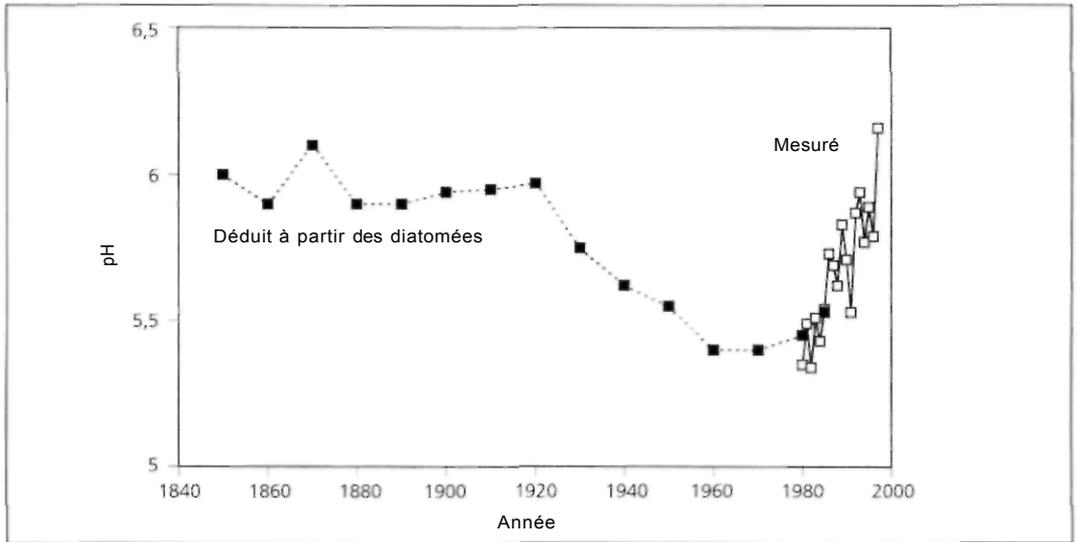


**Figure 31.2** Mauna Loa, Hawaï

les tendances du réchauffement planétaire. Comme cela est impossible, plusieurs substituts à la température ont servi à établir des historiques sur une longue durée.

L'information stockée dans les carottes de glace de l'Arctique a ainsi permis d'inférer les températures de l'air sur de très longues périodes. Dansgaard et coll. (1993) ont présenté des résultats pour deux carottes de glace prélevées au centre du Groenland et qui représentaient l'accumulation de la glace durant environ 250 000 ans. Ces carottes étaient d'une longueur d'environ 3000 mètres. Le rapport des isotopes stables oxygène à oxygène de l'air contenu dans les particules de neige est fonction de la température de l'air au moment où la neige se dépose. Celle-ci se tasse pour se transformer en glace et les rapports isotopiques de l'oxygène emprisonné dans les bulles d'air témoignent de l'enregistrement de la température dans les couches de glace qui s'accumulent durant des milliers d'années. Les mesures de ce rapport tirées des carottes de glace ont servi à comparer l'étendue et la vitesse des changements de la température ainsi inférée au cours de cette très longue période. Les auteurs ont conclu que la température a été remarquablement stable au cours des 10 000 dernières années, mais qu'au-paravant le climat de l'Amérique du Nord était marqué par l'instabilité.

Dans les années 1970, on a observé que plusieurs lacs et rivières d'Europe du Nord et de l'est du Canada avaient un pH anormalement bas et des concentrations de sulfate élevées. On a postulé que les pluies acides en étaient la cause, mais il manquait de données pour montrer que les valeurs historiques du pH avaient été en réalité plus élevées. Les critiques de la «théorie» des pluies acides ont postulé que les conditions observées étaient naturelles et ne résultaient pas d'une acidification récente. On savait que les restes fossilisés de certaines espèces de diatomées et d'algues chrysophytes s'accumulent dans les couches de sédiments au fond des lacs, et il avait été démontré que le nombre relatif de ces espèces changeait en fonction du pH d'un lac. On a alors mis au point une méthode permettant de déterminer à quel moment les couches de sédiments s'étaient déposées pour en déduire le pH historique du lac, grâce à la composition des espèces d'algues dans les sédiments. Cette technique a été largement appliquée dans l'est du Canada (Jeffries, 1997), où de vastes régions géographiques, contenant des milliers de lacs, avaient été affectées par les pluies acides. Plus précisément, on a montré que l'acidité et les concentrations de métaux ont commencé à augmenter vers 1920 dans les lacs à proximité d'importantes sources d'émission de métaux et d'anhydride sulfureux de Sudbury en



**Figure 31.3** pH du lac George. Les valeurs inférées à partir de la diatomée (Dixit et coll., 1992) sont données pour la période de 1850 à 1985 (carrés noirs); alors que celles mesurées (OMNR/OMOE non publiées) le sont pour la période de 1981 à 1998 (carrés blancs).

Ontario (Dixit et coll., 1992). Sur 54 lacs situés dans le centre-sud de l'Ontario, tous ceux dont le pH actuel est inférieur à 6,0 se sont acidifiés depuis environ 1850 (Hall et Smol, 1996). La valeur de leur pH historique mesurée par substitution est indiquée à la figure 31.3 ainsi que les plus récentes valeurs mesurées\*. Les résultats montrent une diminution mesurée par substitution du pH correspondant aux émissions locales d'anhydride sulfureux, suivie d'un rétablissement du pH après réduction des émissions. Ces mesures substitutives du pH historique ont été très importantes pour démontrer la nature à long terme de l'acidification de l'eau causée par des précipitations acides.

## 2.4 Surveillance intégrée

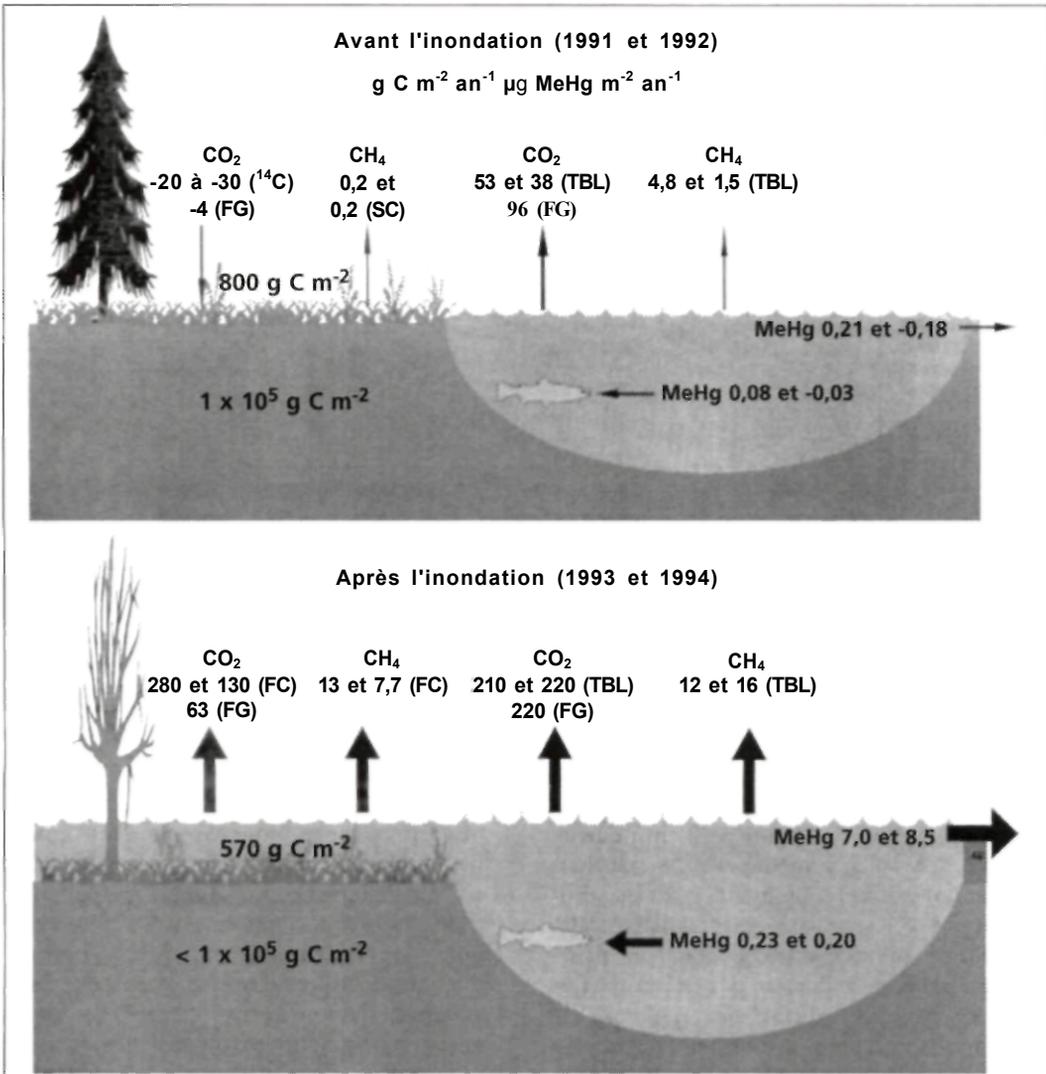
Bien que les enregistrements à long terme établis par la surveillance simple, les relevés et les données substitutives aient fourni des renseignements considérables sur l'évolution de l'environnement, ils ne permettent généralement pas de déterminer les causes de ces changements. Un ensemble de données écologiques plus détaillées est nécessaire pour établir des relations de cause à effet. Le concept de surveillance intégrée a été

mis au point avec, pour objectifs généraux, d'enregistrer les changements qui se produisent dans l'environnement, d'en comprendre et d'en définir les raisons. En d'autres termes, afin de définir ce qui change ou évolue, et pourquoi?

La surveillance intégrée poursuit quatre objectifs précis: 1) établir des relations de cause à effet, 2) déduire des programmes antipollution ou de gestion des ressources, 3) mesurer la réponse de l'environnement aux actions de réduction et 4) permettre des alertes rapides à l'apparition de nouveaux problèmes. Par exemple, la plus grande partie de l'information préliminaire sur les incidences écologiques des précipitations acides sur les eaux de surface est issue des ensembles de données recueillies en vue d'étudier l'eutrophisation des lacs. Ces dernières années, une quantité considérable d'information sur les effets écologiques du changement ou de la variabilité du climat a, à son tour, été déduite de la surveillance intégrée effectuée en vue de mesurer les incidences des précipitations acides.

Les lieux faisant l'objet d'une surveillance intégrée se caractérisent par une surveillance multidisciplinaire à long terme (c'est-à-dire de durée indéfinie) faisant intervenir la météorolo-

\* Communication personnelle d'E. Snucins, Département de biologie. Université Laurentienne, Sudbury, Ontario, Canada, 1999



**Figure 31.4** Perte annuelle en aval (sortie de la charge - entrée de la charge) de méthylmercure (MeHg) provenant des flux expérimentaux annuels de MeHg des terres humides chez les poissons deux ans avant et deux ans après l'inondation. Également, les fluctuations pré- et post-inondation de  $\text{CH}_4$  et  $\text{CO}_2$  provenant de la tourbe et des surfaces marécageuses de la terre humide vers l'atmosphère. Les méthodes utilisées pour mesurer les flux des gaz sont indiquées entre parenthèses.

TBL: méthode de couche mince limite; FG: flux-gradient (1992 et 1993 seulement);  $^{14}\text{C}$ : taux d'accumulation de carbone par marquage au  $^{14}\text{C}$ ; FC: chambres flottantes; SC: chambre statique sur la surface de tourbe

Source: Kelly et coll., 1997

gie, la chimie des précipitations, la chimie du ruissellement et une série complète de facteurs biologiques. La pièce maîtresse des lieux de surveillance intégrée est fréquemment un «bassin jaugé» dans lequel on essaie, au cours d'une surveillance approfondie, d'établir un bilan détaillé des entrées et des sorties d'eau, ainsi que des sub-

stances chimiques, tout en exerçant une surveillance biologique intensive des éléments terrestres et aquatiques du bassin hydrographique. L'information qui en résulte est souvent suffisante pour préciser à la fois les changements qui se sont produits et pourquoi ils se sont produits. La surveillance intégrée est habituellement con-

juguée à des projets de recherche approfondis et souvent à des expériences de manipulation écologique. Ces expériences consistent à altérer délibérément l'environnement dans des conditions très strictes et très surveillées. Par exemple, l'ajout de substances nutritives à un lac, combiné à une surveillance intégrée, a permis de déterminer qu'il fallait réduire le taux d'azote ou de phosphore pour limiter l'eutrophisation (Schindler et Fee, 1974). Des expériences d'acidification d'un lac (Schindler, 1980) ont fourni des renseignements essentiels sur la séquence des changements biologiques qui se produisent lorsque le pH diminue et sur l'importance relative de l'acide nitrique et de l'acide sulfurique (Rudd et coll., 1990).

Les résultats de l'inondation expérimentale d'un milieu humide en forêt boréale a aussi simulé l'effet d'une inondation par delà des barages et les incidences du changement éventuel du niveau de l'eau dû au changement ou à la variabilité climatiques (Kelly et coll., 1997). À cause de l'inondation, le milieu humide, normalement considéré comme un puits de carbone, est devenu une source de carbone pour l'atmosphère et a aussi entraîné une hausse de la transformation du mercure inorganique en diméthylmercure par la flore microbienne. L'évolution des flux est résumée à la figure 31.4.

Outre ces quatre catégories de surveillance, un large secteur de la technologie s'applique à la surveillance de la conformité industrielle à l'intérieur et au pourtour immédiat des usines. Cette surveillance sert à mesurer la nature des effluents afin de déterminer la charge des rejets et leur importance relative par rapport aux limites établies dans la réglementation. Il s'agit d'une information importante, particulièrement en ce qui a trait au suivi des stress imposés à l'environnement. Cependant, le présent chapitre se limite aux programmes de surveillance qui sont appliqués dans un milieu naturel.

### 3. NATURE DE CERTAINS PROBLÈMES ENVIRONNEMENTAUX ACTUELS

La nature des réponses écologiques à la succession actuelle de stress imposé aux écosystèmes pose des défis majeurs à l'atteinte des objectifs globaux et spécifiques de la surveillance intégrée.

#### 3.1 Certains éléments naturels et leurs composés peuvent causer des problèmes

Des éléments essentiels, notamment le phosphore, le soufre, l'azote et le carbone, peuvent modifier et altérer considérablement l'environnement s'ils sont présents en quantités excessives ou sous une forme particulière. Par exemple, dans les lacs, des quantités excessives de phosphore peuvent susciter une croissance démesurée des algues (eutrophisation) (Vollenweider, 1968; Schindler et Fee, 1974). Un excès de soufre dans les précipitations, sous forme d'acide sulfurique, peut causer l'acidification des sols vulnérables et des eaux de surface, ce qui entraîne une dégradation de l'environnement (CNRC, 1981; Environnement Canada, 1997). L'ammonium et les nitrates contribuent aussi à l'acidification des systèmes terrestres et aquatiques (Reuss et Johnson, 1986; Environnement Canada, 1997). Des quantités croissantes de carbone dans l'atmosphère, sous forme de CO<sub>2</sub>, peuvent modifier le climat de la planète (Houghton et coll., 1990). Par conséquent, ces éléments sont soumis à des mesures de contrôle afin d'en limiter les effets négatifs.

Puisque ces éléments sont essentiels à la vie et naturellement présents dans l'environnement, il n'est ni possible ni souhaitable d'en ramener la concentration à zéro. Lorsqu'on fixe des objectifs concernant la présence de ces éléments dans l'environnement, il est de pratique courante d'appliquer le concept de charge ou de concentration critique; celui-ci se définit comme la charge ou la concentration la plus élevée qui peut être atteinte sans que ne surviennent des changements ayant à long terme des effets nuisibles sur les écosystèmes les plus vulnérables (Nilsson, 1986). Des informations écologiques très détaillées (dérivées en grande partie des données issues d'une surveillance intégrée) sont cependant nécessaires pour déterminer ces charges critiques. Le fait que certains changements environnementaux puissent être considérés comme bénéfiques complique le défi posé aux programmes de surveillance. Par exemple, la hausse des dépôts d'azote dans les forêts peut accroître leur taux de croissance (Nilsson, 1986). Cependant, les dépôts d'azote peuvent aussi conduire à un écosystème terrestre composé d'espèces de plantes différentes de celles de l'écosystème naturel (Nilsson, 1986).

### 3.2 Les effets écologiques sont à long terme

Les réponses écologiques à ces éléments et à d'autres facteurs, comme l'invasion des espèces exotiques, se font sentir à long terme (sur des décennies). Du phosphore, contenu dans des eaux usées brutes ou partiellement traitées, a été rejeté dans les lacs Érié et Ontario depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle, mais les tapis d'algues, les mortalités massives de poissons et la raréfaction de l'oxygène ne sont devenus apparents que vers 1960.

Dans les années 1950, le nombre de saumons de l'Atlantique a commencé à diminuer dans plusieurs rivières de la Nouvelle-Écosse, et l'espèce avait complètement disparu en 1980 (Bangay et Riordan, 1980). La surveillance de la rivière Atran-Hogvadsan en Suède a permis de documenter la disparition presque complète du saumon (*Salmo salar*) entre 1952 et 1978 (Edman et Fleischer, 1980). Ces diminutions ont été expliquées par la lente acidification de l'eau de ruissellement consécutive aux dépôts acides qui ont débuté durant la première partie du XX<sup>e</sup> siècle. La température planétaire moyenne (figure 31.1) a montré plusieurs tendances. Elle a augmenté avant 1940, très peu changé par la suite et même baissé jusqu'en 1980. Elle a ensuite subi une augmentation considérable jusqu'en 1984, et depuis, elle augmente plus lentement. Des données à long terme sont nécessaires pour définir ces changements et pour établir que la tendance générale est à la hausse pour toute la période. Des ensembles de données couvrant plusieurs décennies peuvent cependant donner une information trompeuse sur les tendances à long terme.

Ryan et coll. (1994) ont analysé, sur une base régionale, la croissance des anneaux de croissance sur des érables à sucre de l'Ontario. Après avoir exclu les effets des variations dues aux conditions météorologiques et au vieillissement, ils ont découvert des diminutions du taux de croissance qu'ils associent à la pollution de l'environnement. Ces ralentissements de la croissance se sont produits pendant plus de 30 ans chez des arbres qui semblaient en santé. Watmough et coll. (1998) ont montré que les érables à sucre, dont on observe actuellement le déclin, ont vu leur taux de croissance diminuer depuis les années 1940.

On a pu mesurer, sur une période de huit ans, que l'invasion du lac St-Clair par la moule zébrée (*Dreissena polymorpha*) a amené des diminutions graduelles, puis l'extinction des populations de moules autochtones (*Nalepa* et coll., 1996). La capacité accrue de filtration de l'eau de la population de moule zébrée a permis de doubler la clarté de l'eau (Griffiths, 1993). La moule zébrée s'est répandue rapidement dans le fleuve Saint-Laurent; alors qu'elle était pratiquement inexistante en 1991, elle a atteint des densités de 20 000 moules par mètre carré au canal Soulanges (Ricciardi et coll., 1996), à Beauharnois, Bécancour ainsi qu'à l'île d'Orléans (De LaFontaine et coll., 2000). Bien qu'on se préoccupe des dommages écologiques causés par cette invasion, elle a certains avantages scientifiques. Comme les moules filtrent beaucoup d'eau, elles accumulent les contaminants. Les chercheurs du Centre Saint-Laurent tirent parti de cette caractéristique en surveillant les changements physiologiques qui se produisent dans les moules, notamment la rupture du matériel génétique et les changements de la fonction de reproduction, les considérant comme des «biomarqueurs» des effets à long terme des contaminants.

### 3.3 Les effets se produisent à l'échelle de l'écosystème

La réponse biologique aux stress se manifeste souvent à l'échelle de l'écosystème. Le sulfate des pluies acides entraîne le lessivage des substances nutritives (surtout le calcium et le magnésium) des sols vulnérables, ce qui fait diminuer les taux de croissance des arbres (Hall et coll., 1997). Cette situation peut en outre augmenter la vulnérabilité des arbres aux maladies et aux attaques des insectes, et un certain nombre d'entre eux en périront. On observe donc une longue chaîne de réponses écologiques aux divers stress; ceux-ci, exerçant un effet sur la physiologie des arbres et la chimie des sols, pourront éventuellement entraîner la mort des arbres.

### 3.4 Les effets écologiques de divers stress se superposent

Les réponses à un stress peuvent se superposer et les problèmes engendrés, s'aggraver. Par exemple, quand des bassins hydrographiques touchés

par les pluies acides subissent une sécheresse, de l'acide sulfurique peut se former par réoxygénation des composés de soufre stockés, ce qui entraîne des hausses brutales du ruissellement acide et la réacidification des lacs récepteurs (Keller et coll., 1992). Donc, des conditions climatiques plus chaudes ont accentué les effets d'un autre stress, la pluie acide en l'occurrence.

### 3.5 Les superficies touchées par le stress environnemental ont augmenté

Au cours du temps, les stress environnementaux se sont fait sentir sur de plus grandes superficies. Initialement, l'eutrophisation des lacs était essentiellement un problème local, bien qu'il ait pris des proportions internationales dans les Grands Lacs de l'Amérique du Nord ou en Europe. Les précipitations acides ont touché les lacs et les forêts de la majeure partie de l'est de l'Amérique du Nord et aussi de l'Europe, et sont devenues de ce fait un problème multinational. L'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique atteint des régions géographiques encore plus vastes que les pluies acides et, bien que ses effets soient encore confinés aux latitudes élevées des deux hémisphères, la réduction des émissions concerne à peu près tous les pays. Le changement climatique influant sur toute la planète, tous les pays sont concernés par la complexité des effets et des mesures de réduction.

Ainsi, la surveillance intégrée est devenue essentielle, et en même temps très difficile, en raison des caractéristiques des éléments naturels causant des dommages ou des changements sur de très longues périodes à l'écosystème et à l'échelle de la planète.

## 4. RÉACTIONS MONDIALES AUX DÉFIS ENVIRONNEMENTAUX

Compte tenu du besoin de données permettant de définir le changement écologique et de justifier des mesures onéreuses de réduction de la pollution, on a conçu et implanté, à l'échelle planétaire, des programmes de surveillance qui se répartissent entre les quatre catégories de surveillance.

### 4.1 Conventions internationales visant à protéger l'environnement

Afin de faire face aux changements environnementaux régionaux et mondial, de nouveaux mécanismes scientifiques et politiques, qui s'appliquent à l'échelle internationale, se sont imposés. La première étape du processus est l'établissement d'un accord écrit, après convention. Les conventions se limitent généralement à une seule question et sont fréquemment négociées sous la direction générale du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE). Il y a actuellement plus de 260 conventions et accords internationaux qui visent des problèmes environnementaux (Nelson, 1998).

De nombreuses conventions internationales exigent des pays qu'ils mettent sur pied des programmes de surveillance portant sur le problème particulier visé par la convention.

Les conventions internationales se caractérisent souvent par les aspects suivants.

- La convention vise à créer un consensus international sur le fait qu'il existe un problème concernant l'écologie, les espèces sauvages ou la pollution et qu'il faudra à terme prendre des mesures à l'échelle internationale.
- La convention est formulée en termes généraux et ne comporte généralement pas d'exigences relatives à des mesures précises de contrôle. Les pays sont alors en mesure de signer la convention, admettant ainsi l'existence d'un problème, mais sans avoir à s'entendre sur les mesures de réglementation qui entraîneraient des conséquences socio-économiques difficiles.
- La convention engage les pays à effectuer des activités de recherche et de surveillance; on s'entend fréquemment pour préparer des évaluations scientifiques. Celles-ci permettent de recueillir davantage d'informations écologiques et de meilleure qualité, ce qui permet d'améliorer le consensus sur la question. Les gouvernements sont alors dans une meilleure position pour défendre la nécessité d'une réglementation.
- La convention oblige les pays à rendre des comptes, notamment à présenter régulièrement des rapports sur les mesures qu'ils ont prises pour appliquer la convention.

- La convention est gérée par un secrétariat.
- La convention contient une disposition incitant les parties à négocier des protocoles sur diverses mesures de contrôle ou de gestion qui sont nécessaires pour résoudre un problème. On peut ainsi aborder de façon très souple des problèmes complexes et mettant en cause plusieurs polluants. On s'occupe des composés simples en remettant à plus tard les composés qui posent plus de difficultés ou qui sont moins importants. Les échéanciers des mesures de réduction varient selon les différents composés, et sont facilement modifiés à la lumière des progrès scientifiques et technologiques. Les pays peuvent décider de ne pas signer un protocole, sans avoir pour autant à renoncer à leur participation aux activités de la convention.
- Les calendriers et mesures de contrôle sont fréquemment modifiés en raison de nouvelles données écologiques, au fur et à mesure que les réseaux de surveillance en font la collecte.

On trouvera ci-dessous quelques exemples de conventions qui exigent des activités de surveillance.

La *Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance* (1979), signée par les pays de la Commission économique des Nations Unies pour l'Europe, fait référence à la surveillance de la manière suivante dans son préambule: «Par [...] des activités de recherche et de surveillance, de coordonner les mesures prises par les pays pour combattre la pollution de l'air...», et l'article 6 réitère cet objectif. L'article 7 déclare que les parties contractantes entreprendront des activités de recherche (et y collaboreront) concernant les effets des composés sulfureux et des principaux autres polluants atmosphériques sur la santé de l'homme et de l'environnement, y compris l'agriculture, la sylviculture, les matériaux, les écosystèmes aquatiques et autres ainsi que la visibilité, en vue d'établir sur un fondement scientifique, la détermination de relations dose/effet aux fins de la protection de l'environnement. Pour obtenir le texte de la convention: [www.admin.ch/ch/f/rs/i8/0.814.32.fr.pdf](http://www.admin.ch/ch/f/rs/i8/0.814.32.fr.pdf)

L'article 2.2 a) de la *Convention de Vienne pour la protection de la couche d'ozone* (1985) requiert des parties signataires qu'elles «coopèrent, au moyen d'observations systéma-

tiques, de recherches et d'échanges de renseignements afin de mieux comprendre et apprécier les effets des activités humaines sur la couche d'ozone et les effets exercés sur la santé humaine et l'environnement par la modification de la couche d'ozone». Pour de plus amples informations: [www.unep.ch/ozone/french/vienna-fr.shtml](http://www.unep.ch/ozone/french/vienna-fr.shtml)

L'article 7 b) de la *Convention sur la diversité biologique* exige du pays signataire qu'il «surveille par prélèvement d'échantillons et d'autres techniques les éléments constitutifs de la diversité biologique...». L'article 7 d) stipule qu'il «conserve et structure à l'aide d'un système les données résultant des activités d'identification et de surveillance». L'article 12 b) engage les pays à favoriser et à encourager la recherche qui contribue à la diversité biologique. L'annexe 1 précise la nécessité de reconnaître et de surveiller les écosystèmes et les habitats, les espèces et les communautés, ainsi que les génomes et gènes décrits revêtant une importance sociale, scientifique ou économique. Pour de plus amples informations: [www.biodiv.org/convention/articles.asp?lg=2](http://www.biodiv.org/convention/articles.asp?lg=2)

La *Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques* mentionne deux fois la surveillance. L'article 4 g) incite les pays à encourager et à soutenir, par leur coopération, les travaux de recherche scientifique, technologique, technique, socio-économique et autres, ainsi que l'observation systématique et la constitution d'archives de données sur le système climatique permettant de mieux comprendre les causes et les effets des changements climatiques. L'article 5 a) leur demande de soutenir et développer davantage les réseaux visant à définir, réaliser, évaluer et financer des travaux de recherche, de collecte de données et d'observation systématique. L'alinéa b) propose de renforcer l'observation systématique et les capacités nationales de recherche scientifique. Pour de plus amples informations: [www.un.org/french/ecosocdev/geninfo/environ/climcon.htm](http://www.un.org/french/ecosocdev/geninfo/environ/climcon.htm)

## 5. APPLICATION DES RÉSULTATS DE LA SURVEILLANCE

L'exécution de programmes de surveillance, la production de rapports sur les résultats et la préparation d'évaluations scientifiques sont autant d'éléments essentiels face à des problèmes environnementaux internationaux. Bon nombre de

conventions comprennent des accords par lesquels les pays signataires s'engagent non seulement à effectuer des activités de recherche et de surveillance, mais aussi à faire rapport sur les résultats et à préparer des évaluations scientifiques.

Les résultats des programmes de surveillance sont souvent communiqués au public sous forme d'indicateurs. Un indicateur est une statistique ou un paramètre qui est mesuré afin d'obtenir de l'information sur les tendances temporelles d'une condition environnementale. Les indicateurs environnementaux sont des statistiques essentielles choisies parce qu'elles représentent ou résument un aspect significatif de l'état de l'environnement ou de la durabilité d'une ressource naturelle et des activités humaines qui y sont reliées. Dans la mesure du possible, les indicateurs fournissent des renseignements permettant de trouver quels stress sont à l'origine des tendances. Les indicateurs environnementaux sont des instruments importants permettant de traduire et d'offrir aux décideurs une information concise et crédible du point de vue scientifique, qu'ils pourront facilement comprendre et utiliser. Ils s'accompagnent habituellement de rapports techniques exposant la manière dont l'écosystème et ses éléments réagissent à ces changements ainsi que la façon dont les sociétés réduiront les stress ou redresseront la situation.

Les bons indicateurs sont sensibles aux changements, étayés par des données de surveillance fiables et facilement accessibles, pertinents par rapport au problème, compris et acceptés par les utilisateurs visés.

Environnement Canada a produit des indicateurs pour 10 thématiques de préoccupation nationale. On en voit un exemple dans l'encadré 31.1. Durant une vingtaine d'années, le problème des précipitations acides a retenu considérablement l'attention. Le Canada a mis sur pied des programmes de réduction de l'anhydride sulfureux, et les États-Unis ont réduit le dépôt humide à 20 kg/ha/an. Les progrès accomplis sont montrés au public sous forme d'un indicateur pour la région touchée, indicateur conçu à partir des programmes de surveillance.

Les évaluations scientifiques sont devenues un instrument essentiel pour réunir et présenter sous forme de rapport les résultats des programmes de surveillance. On peut mentionner,

à titre d'exemple, les évaluations préparées par le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC). Deux évaluations globales ont fait l'objet de rapports dans le cadre de la Convention-cadre sur les changements climatiques. La Convention engage les parties signataires à effectuer une évaluation tous les cinq ans. Ces évaluations font largement appel aux résultats d'activités de surveillance, comme celles montrées aux figures 31.1 et 31.2. Les sommaires destinés aux décideurs résument les résultats des documents plus importants et plus complexes dans un bref rapport qui est à la portée du public. Ces sommaires ont beaucoup d'influence sur le public lorsqu'il s'agit de susciter une réponse et une intervention relativement au changement climatique.

## 6. PROGRAMMES NATIONAUX ET INTERNATIONAUX DE SURVEILLANCE

Des milliers de programmes de surveillance environnementale sont en opération dans le monde, aux échelons local, national ou international. On trouvera ci-dessous six exemples descriptifs du type de travail effectué. Ces exemples illustrent comment les programmes de surveillance peuvent être élargis pour répondre à de nouveaux besoins.

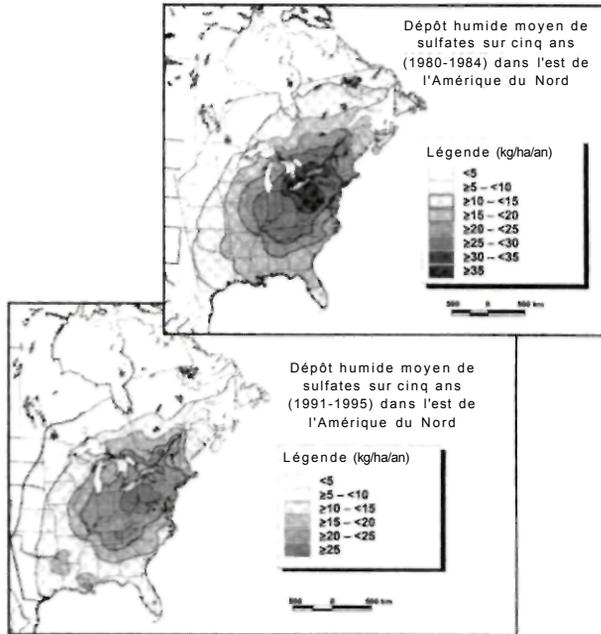
### 6.1 Réseau d'évaluation et de surveillance écologiques du Canada

Au Canada, des études environnementales multidisciplinaires, particulièrement à l'échelle des petits bassins hydrographiques, sont effectuées depuis plusieurs décennies. Elles ont été entreprises par des gouvernements et des établissements universitaires, généralement pour régler des problèmes environnementaux locaux. Par exemple, le gouvernement fédéral, dans les années 1960, a entrepris des études sur l'eutrophisation des lacs dans la région des lacs expérimentaux située près de Kenora (Ontario) (Hecky et coll., 1994). À Kuujuaupik (Québec), l'Université Laval a créé le Centre d'études nordiques qui s'est consacré aux processus écologiques arctiques et subarctiques. Des études sur les processus liés aux substances nutritives dans les eaux de surface ont été entreprises au parc national de Kejimikujik. Au fur et

## Encadré 31.1 Exemple d'indicateur produit par Environnement Canada

## Indicateur : Dépôt humide de sulfates

- ▶ La superficie de l'est du Canada qui reçoit 20 kg/ha/an ou plus de dépôt humide de sulfates a diminué de 61 % entre les deux périodes quinquennales (1980-1984 et 1991-1995), reflétant une réduction des émissions de SO<sub>2</sub> au Canada et aux États-Unis.
- ▶ L'objectif de 20 kg/ha/an de dépôt humide de sulfates a été fixé à titre d'objectif provisoire durant les années 1980. Des recherches récentes confirment que cet objectif est trop élevé étant donné qu'un dépôt de 20 kg/ha/an dépasse la capacité tampon de nombreux lacs sensibles à l'acide de l'est du Canada.
- ▶ Les changements des émissions, combinés aux variations des précipitations et des régimes météorologiques, modifient la forme et la taille de la zone de dépôt annuel. Les réductions d'émissions ne peuvent donc pas se traduire immédiatement en réductions du dépôt.



## Remarques :

- i) Le dépôt humide de sulfates représente le poids de sulfates déposé à la surface terrestre par les précipitations et constitue un indicateur de pluies acides. La valeur cible de 20 kg/ha/an de dépôt humide de sulfate provient des données limitées disponibles au début des années 80 et elle était basée principalement sur la perte de poissons de pêche sportive qui a lieu lorsque le pH est de 5.3 ou moins. Des études plus récentes révèlent qu'il faut un pH de 6.0 pour protéger la plupart des organismes aquatiques.
- ii) Les données présentées ici sont une mesure de sulfates en excès (ou sulfates corrigés pour le sel marin), c.-à-d. le dépôt de sulfates mesuré moins rapport en sulfates par les sels marins.
- iii) La Base de données nationales sur la chimie atmosphérique (NatChem) a été utilisée pour l'analyse des données sur les précipitations acides.
- iv) il n'existe pas de données nationales sur le dépôt sec de sulfates.

## Source :

R. Veil, C.-U. Ro et D. Ord. Base de données nationales sur la chimie atmosphérique et centre d'analyse. Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, Downsview (Ontario).

Source : Environnement Canada (1999)

à mesure que de nouveaux problèmes ont surgi, des sites comme ceux des lacs Turkey en Ontario et de Duschenay au Québec ont été créés afin de répondre au besoin d'obtenir plus d'information sur les précipitations acides. Ces études de surveillance intégrée, étalées sur plusieurs années, ont été très utiles pour régler des problèmes politiques et scientifiques.

En avril 1994, Environnement Canada a mis sur pied le Réseau d'évaluation et de surveillance écologiques (RESE), dont l'objectif général est de réaliser des activités de recherche et de surveillance intégrées afin de comprendre et d'expliquer les changements observés dans les

écosystèmes. Le RESE\* est le fruit d'un partenariat et d'une coopération entre des scientifiques des milieux universitaires, gouvernementaux (fédéral, provinces et administrations locales) et du secteur privé. Le RESE poursuit quatre objectifs spécifiques:

1. Offrir une perspective nationale sur la façon dont les écosystèmes canadiens sont touchés par les nombreux stress s'exerçant sur l'environnement;
2. Fournir des justifications défendables sur le plan scientifique pour les activités de contrôle de la pollution et de la gestion des ressources;

\* Pour de plus amples informations: [www.cciw.ca/eman/](http://www.cciw.ca/eman/)

3. Évaluer les politiques de gestion des ressources et faire rapport aux Canadiens de leur efficacité;
4. Trouver le plus tôt possible les nouveaux problèmes environnementaux.

Afin de gérer les affaires du RESE, le Bureau de coordination de la surveillance écologique (BCSE) a été créé au Centre canadien des eaux intérieures. Le BCSE a pour objectif de coordonner la recherche et la surveillance écologiques afin de répondre aux besoins nationaux, régionaux et locaux en matière d'information environnementale sur la fonction et la dynamique de l'écosystème.

## ***6.2 Surveillance de l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique***

L'ozone ( $O_3$ ) se forme dans la stratosphère à la suite de réactions entre le rayonnement solaire ultraviolet (UV) et les molécules d'oxygène. La formation et la décomposition sont en équilibre dynamique avec des variations quotidiennes, saisonnières et annuelles de la concentration d' $O_3$ .

Les scientifiques ont tout d'abord postulé, et ensuite observé, que des substances chimiques d'origine anthropiques, comme les chlorofluorocarbures, les halons et certains solvants chlorés, peuvent réagir avec l' $O_3$  pour en accélérer la décomposition, ce qui occasionne un appauvrissement de la couche d' $O_3$ . En raison de cet appauvrissement, davantage de rayonnements UV-B à haute énergie pourraient atteindre la surface de la Terre et exercer des effets biologiques. De plus, cette diminution d' $O_3$ , modifierait aussi le bilan du rayonnement atmosphérique et aurait des répercussions sur la température planétaire.

L'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique a été l'un des premiers problèmes environnementaux d'envergure mondiale, et la plupart des pays participent aux programmes de réduction mis en œuvre dans le cadre du Protocole de Montréal et de ses amendements.

La quantité d' $O_3$  dans l'atmosphère au-dessus d'un point donné peut être mesurée au moyen de méthodes spectrophotométriques. Le spectrophotomètre Brewer mesure constamment le rayonnement UV-B et l' $O_3$  total de la colonne de l'atmosphère au-dessus de l'instru-

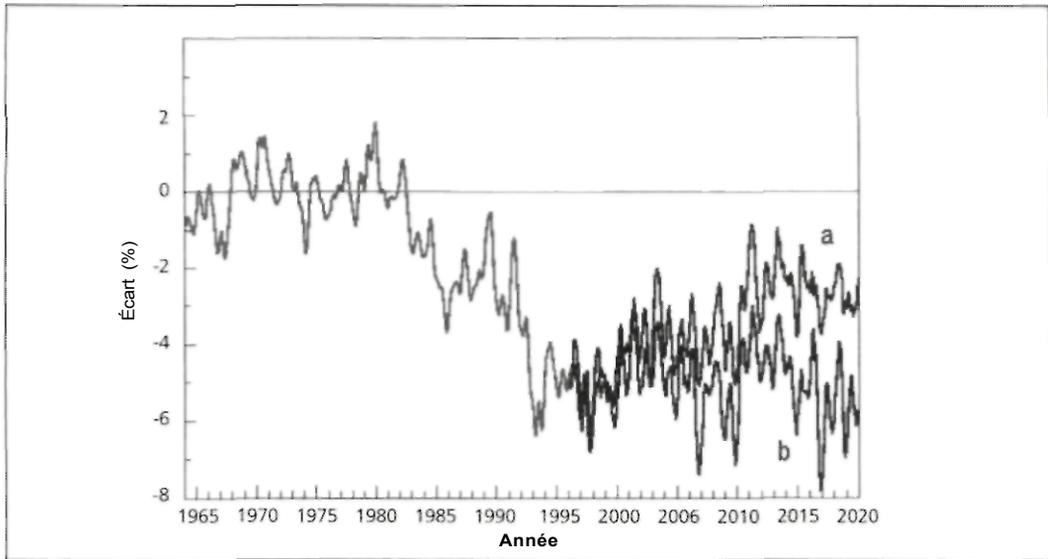
ment. Il existe un réseau mondial qui possède plus de 100 stations équipées d'instruments Brewer, dont 12 au Canada. De petits instruments emportés en altitude par des ballons mesurent les profils de concentrations verticales sur une base quotidienne et mensuelle, dans environ 260 endroits de la planète.

Les données provenant des réseaux de surveillance sont recueillies au Centre mondial des données sur l'ozone (CMDO) qui a été mis sur pied pour marquer l'Année géophysique internationale de 1957-1958. Situé à Toronto, il est géré par le Service météorologique du Canada (SMC) depuis le début des années 1960 pour le compte de l'Organisation météorologique mondiale (OMM). En 1992, le SMC a accepté la responsabilité additionnelle d'administrer le Centre mondial des données sur le rayonnement ultraviolet (WUDC). Ensemble, les deux centres de données forment le Centre mondial des données sur l'ozone et le rayonnement ultraviolet (WOUDC), qui dessert des pays comme la France, la Belgique, le Maroc, l'Algérie et la Syrie. En outre, le SMC exploite le système de gestion des données Brewer (BDMS), qui recueille les données de plus de 80 spectrophotomètres Brewer situés dans 15 pays. La Veille de l'atmosphère du globe (VAG) de l'OMM fournit des avis externes au WOUDC par l'entremise de son groupe consultatif sur le rayonnement UV et l' $O_3$ .

On a observé l'amincissement de la couche d' $O_3$  depuis une vingtaine d'années. La figure 31.5 présente les valeurs moyennes globales ainsi que deux scénarios projetés, qui dépendent du succès obtenu à ce jour par les programmes de réduction de l' $O_3$  (Wardle et coll. 1997). Les données sur l' $O_3$ , et le rayonnement UV, la collection de logiciels et les renseignements descriptifs sont accessibles sur le site Internet du WDOUC: [www.msc-smc.ec.gc.ca/woudc/index\\_f.html](http://www.msc-smc.ec.gc.ca/woudc/index_f.html)

## ***6.3 Programmes de coopération internationale mis sur pied dans le cadre de la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance***

La Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance a donné lieu à



**Figure 31.5** Écarts du niveau pré-1980 pour l'ozone total global

a) Le meilleur scénario

b) Toutes les substances diminuant la couche d'ozone restent à leur niveau de 1997

Source: Wardle et coll. (1999)

de nombreuses activités internationales de surveillance et de mesures antipollution. La Convention a permis de mettre sur pied le réseau européen de surveillance de la pollution atmosphérique, qui mesure la qualité de l'air et les dépôts de plusieurs polluants. Au fur et à mesure que des protocoles de réduction de la pollution ont été élaborés et ratifiés, on s'est intéressé de plus en plus à surveiller les effets des polluants et la réaction écologique aux programmes de réduction. Cet intérêt a suscité la création de cinq programmes de coopération internationale pour la surveillance qui concernent les forêts, les cours d'eau et les lacs, les cultures, les matériaux de construction et les monuments culturels, ainsi que la surveillance intégrée. Ils ont permis de recueillir une quantité considérable d'information sur les effets environnementaux des polluants atmosphériques, notamment le soufre, l'azote et l'ozone troposphérique.

Le Programme de surveillance intégrée, conjugué à des programmes ciblés, a comme objectif de promouvoir la compréhension des changements observés. Ce programme comprend actuellement des sites dans 22 pays européens et au Canada.

Ces lieux sont divisés en deux catégories (Kleemola et Laine, 1997):

- Lieux soumis à une surveillance intensive, où des échantillons sont prélevés et des observations effectuées dans de nombreux segments de l'écosystème en vue d'appliquer des modèles complexes. Des enquêtes poussées sur les relations dose-réponse sont aussi effectuées. Des critères concernant le choix des sites ont également été fixés pour les lieux qui se trouvent habituellement dans des régions protégées.
- Lieux soumis à la surveillance biologique, où l'objectif est de quantifier la variation inter-sites en ce qui concerne certaines des caractéristiques les plus importantes comme des modèles de bilan massique des éléments et des modèles pour les bioindicateurs sur une base spatiale. Ces sites sont plus particulièrement conçus pour de la surveillance biologique en vue de déceler les changements naturels, les effets des polluants atmosphériques et du changement climatique.

Le rapport annuel de 1997 du Programme de surveillance intégrée a conclu que les baisses d'émissions d'anhydride sulfureux ont fait diminuer les dépôts sec et humide de sulfates. En conséquence, les concentrations de sulfates et l'acidité de l'eau de ruissellement ont généralement baissé.

Les résultats ont aussi montré que les bassins hydrographiques réagissent de façon complexe au dépôt d'azote. Dans certains lieux, les concentrations en nitrates des eaux de ruissellement ont diminué, même si le dépôt n'a pas changé. D'autres sites ont enregistré une augmentation de nitrates dans les eaux de ruissellement, ce qui indique l'apparition possible d'une saturation en azote. Trouver des explications à ces observations pose un défi constant aux responsables des lieux soumis à la surveillance intégrée.

#### **6.4 Dispositif national d'alerte rapide pour les pluies acides (DNARPA)**

En 1984, le Service canadien des forêts (SCF) a mis sur pied le DNARPA afin de répondre aux préoccupations quant aux effets des précipitations acides sur les forêts canadiennes. La stratégie du DNARPA consiste à détecter les premiers signes de changements ou de dommages subis par les arbres et les sols forestiers affectés par les pluies acides, excluant les dommages attribuables aux facteurs naturels ou aux pratiques d'aménagement. Le DNARPA illustre l'une des grandes justifications de la surveillance, c'est-à-dire une surveillance simple effectuée afin d'établir l'état de la ressource et de déterminer si les changements observés excèdent la variation normale. Il a été possible d'observer des changements à long terme causés par les pluies acides ou d'autres polluants sur les sols et la végétation. Les symptômes des dommages occasionnés par la pollution atmosphérique ne sont pas spécifiques et ressemblent fréquemment à d'autres types de dommages dont ceux attribuables à des causes naturelles. L'expérience de spécialistes formés à distinguer les symptômes imputables aux anomalies climatiques de ceux attribuables à des carences en substances nutritives, aux conséquences de maladies ou des infestations d'insectes a été cruciale pour le bon fonctionnement du DNARPA.

Le dépérissement des forêts se définit comme une détérioration continue de la condition des arbres, aboutissant à leur mort. Le DNARPA n'a pas permis de repérer de larges secteurs en déclin, sauf en ce qui concerne les bouleaux à papier situés près de la baie de Fundy où les brouillards acides ont été mis en cause. On a cependant établi une corrélation claire entre la mortalité des arbres et les dépassements des

charges critiques au moyen de données provenant de certaines parcelles du DNARPA. Des chercheurs ont trouvé que la mortalité des arbres augmente lorsque la quantité de polluants atmosphériques acides déposés dépasse le niveau de tolérance à l'acidité calculé pour le sol forestier du site. En 1995, on a établi que les arbres de 17 parcelles forestières du DNARPA avaient subi des dommages visibles. Les 17 parcelles étaient toutes situées dans des régions où la pollution acide dépassait les charges critiques. Par ailleurs, aucune des parcelles à l'extérieur de la zone de dépassement ne montrait de dommages apparents qui ne puissent s'expliquer par des facteurs autres que les insectes, la température ou la dynamique des peuplements (Moayeri et Arp, 1997).

Le SCF a intégré 18 parcelles du DNARPA au projet sur les indicateurs forestiers de la transformation du globe qui incorpore un gradient des conditions de la pollution atmosphérique, de l'Ontario aux Maritimes. En tout, 25 parcelles font partie de ce gradient qui incorpore aussi quatre parcelles de l'ancien projet des érables de l'Amérique du Nord, ainsi que 3 lieux additionnels. Cette initiative a débuté en 1999 et sert à élaborer de nouveaux indicateurs précurseurs de la condition des forêts, à étudier les interactions entre la pollution atmosphérique, le changement climatique et la productivité de la forêt ainsi qu'à créer un assortiment de parcelles permanentes servant à la recherche-surveillance (surveillance intégrée) afin de réaliser des études détaillées des cycles du carbone et des substances nutritives dans l'est du Canada.

#### **6.5 Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) et Système mondial de surveillance continue de l'environnement (GEMS)**

Le Canada participe au programme mondial de surveillance de la qualité de l'eau en gérant le Centre de collaboration du GEMS/Eau situé à l'Institut national de recherche sur les eaux (INRE). Le GEMS/Eau, un programme des Nations Unies traitant de la qualité de l'eau à l'échelle mondiale, a été lancé par le PNUE en 1976. Il s'agit du seul programme international des Nations Unies exclusivement consacré à la qualité de l'eau. Il contribue grandement à faire comprendre à l'échelle mondiale les ten-

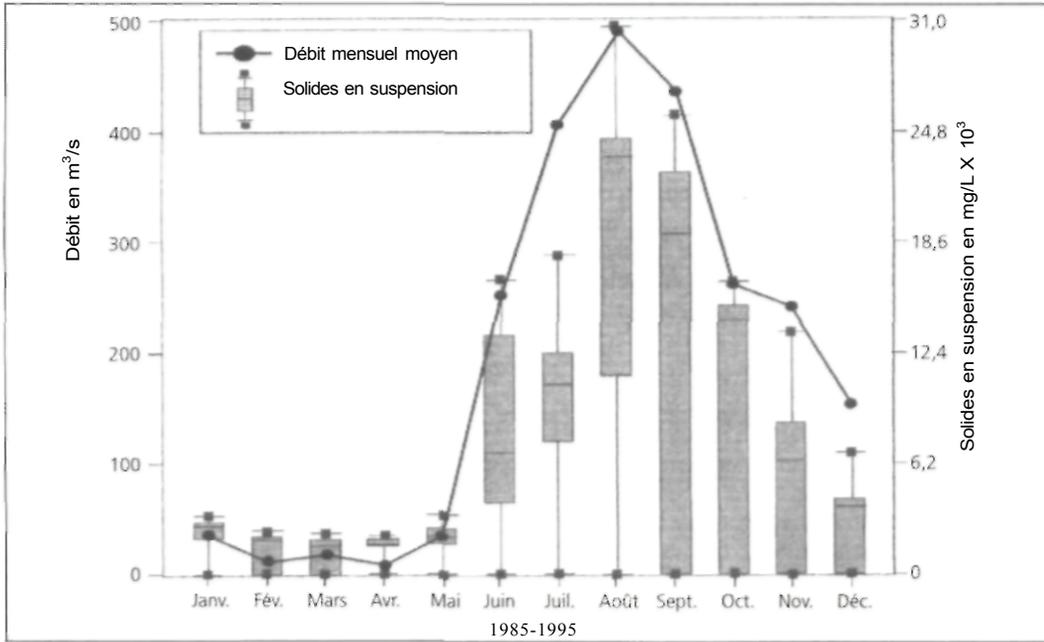


Figure 31.6 Fleuve Mékong - Laos

dances et la condition actuelles de la qualité de l'eau tout en préconisant la gestion de la qualité de l'eau douce dans une perspective durable. Les principales activités du programme GEMS/Eau sont les suivantes: surveillance et programmes de recueil de données menés en coopération à l'échelle internationale; partage des données et de l'information; évaluations globales et régionales; renforcement des capacités et expertise technique; fourniture d'avis aux gouvernements et aux organismes internationaux; produits d'information et partenariats.

Environ 70 pays participants, dont la Belgique, la France, le Sénégal, la Nouvelle-Zélande et la Russie, soumettent les données de quelque 700 stations à l'INRE en vue d'une inscription dans la Banque mondiale de données sur les eaux (GLOWDAT) de GEMS/Eau. Cette base de données contient actuellement 1,7 million de points de données, représentant 6 catégories de variables servant à l'évaluation de l'eau. Les extractions de la base de données servent à la préparation d'évaluations régionales et mondiales de la qualité de l'eau demandées par les organismes responsables ou certains organismes publics et privés pour divers projets de recherche. La figure 31.6 illustre la présentation des données.

Certaines activités sont en cours afin d'inciter de nouveaux pays à participer au programme GEMS/Eau: ils s'adressent plus particulièrement aux pays en développement, surtout ceux de l'Afrique. Depuis 1998, la participation des gouvernements nationaux et des agences au GEMS/Eau a considérablement augmenté, ce qui dénote une sensibilisation et une préoccupation grandissantes pour la qualité et la disponibilité de l'eau dans l'environnement, ainsi que sur l'impact de cette ressource sur la vie des peuples du monde entier. Le programme GEMS/Eau est un point de convergence pour la collecte de données et de renseignements sur la qualité de l'eau et contribue à enrichir les évaluations scientifiques entreprises par les Nations Unies sur les activités propices au développement durable.

## 6.6 Système mondial d'observation du climat

L'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, des émissions de dioxyde de soufre, la formation d'ozone troposphérique (au sol) et l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique créent un ensemble d'interactions complexes influant sur

le bilan radiatif de l'atmosphère (IPCC, 1994). Ces changements ont probablement déjà fait augmenter la température moyenne du globe (Wigley et coll., 1998; Crowley, 2000). De plus, les fluctuations naturelles de l'énergie solaire entraînent des variations de la température moyenne mondiale et ont probablement contribué à la hausse des températures observée au cours des 150 dernières années (Wigley et coll., 1998). Le phénomène El Nino a, pour sa part, causé de grandes variations dans les conditions météorologiques du monde entier au cours de la dernière décennie.

La superficie géographique phénoménale (soit l'ensemble de la planète) et la complexité du changement climatique provoqué par des causes anthropiques exigent un effort de surveillance concerté à l'échelle internationale afin de mesurer les changements et de déterminer les causes et conséquences écologiques et sociologiques. L'OMM promeut cet effort international, et le Système mondial d'observation du climat (SMOC) en assure la coordination.

Bien que bon nombre de programmes de surveillance existent déjà, les responsables du SMOC ont constaté que de nouveaux programmes et des programmes réorganisés sont nécessaires pour permettre aux nations de

- déceler et quantifier le changement climatique dès les premiers stades du processus;
- documenter la variabilité naturelle du climat ainsi que les phénomènes climatiques extrêmes;
- modéliser, comprendre et prédire le changement et la variabilité du climat;
- en évaluer l'incidence éventuelle sur les écosystèmes et la situation socioéconomique;
- élaborer des stratégies visant à diminuer les effets potentiellement néfastes;
- offrir des services et des applications aux secteurs vulnérables aux effets du climat;
- appuyer le développement durable (Spence et Townshend, 1995).

Un atelier de planification tenu en 1995 (Karl et coll., 1995) a permis de définir un ensemble de besoins en matière de surveillance qu'on peut répartir en trois catégories principales:

**A. Forçage climatique et rétroactions** Cette catégorie englobe la surveillance de la série com-

plète des gaz à effet de serre: bioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), méthane ( $\text{CH}_4$ ), monoxyde de carbone (CO), oxyde nitreux ( $\text{N}_2\text{O}$ ), chlorofluorocarbures (CFC), ozone ( $\text{O}_3$ ) et vapeur d'eau. Cette information sera combinée avec des mesures des aérosols, du rayonnement solaire et de la couverture nuageuse en vue de calculer les bilans énergétiques.

**B. Réponses climatiques et rétroactions** Ce programme comporte 11 volets qui vont des mesures du niveau de la mer, des processus affectant les océans, de la température de l'atmosphère à la surface des terres, des températures de la troposphère et de la stratosphère, de l'évolution des précipitations et de la cryosphère à de nouvelles analyses des prédictions de modèles climatiques et à des définitions de nouvelles variables sensibles au forçage climatique anthropique.

**C. Impacts sur le climat** En dernier lieu, ce sont les effets écologiques de la transformation de l'atmosphère et des variables climatiques qui intéressent le public, les gestionnaires des ressources, les planificateurs et les gouvernements. Le public se préoccupe avant tout de certaines questions: Comment la production agricole (alimentaire) sera-t-elle touchée? Qu'arrivera-t-il aux forêts? Les conditions météorologiques extrêmes menacent-elles les vies et les biens?

Les responsables du SMOC vont au-delà des aspects climatologiques des changements atmosphériques pour évaluer l'évolution de la condition écologique du globe. Des travaux seront effectués afin d'élaborer des indicateurs environnementaux, de les mesurer et de les rendre publics. Des études sont actuellement effectuées sur la surveillance à long terme de caractéristiques de la surface des terres comme la végétation, l'humidité du sol, le ruissellement et les températures en surface. Des systèmes d'observation polyvalents servant aux opérations, à la recherche et à la surveillance seront probablement les moyens les plus pratiques pour obtenir un système économique de surveillance à long terme du climat.

## 6.7 Réseaux bénévoles de surveillance

Il existe aussi, à travers le monde, des programmes de surveillance simple de grande envergure, exécutés par des bénévoles formés. Ces pro-

grammes ont une grande valeur intrinsèque, car ils permettent de recueillir de l'information sur les changements survenus dans l'environnement et d'en faire état. Par ailleurs, ils renforcent les réseaux utilisés par des scientifiques. Dans une situation idéale, les explications scientifiques du changement sont dérivées des sites de surveillance intégrée. Ces explications peuvent alors être appliquées aux observations provenant des réseaux de bénévoles afin d'obtenir un portrait complet de l'étendue et de l'emplacement du changement environnemental.

Lorsqu'on met sur pied des programmes bénévoles de surveillance, il est important de choisir des variables qui soient facilement et économiquement mesurables, de manière à ce qu'un grand nombre de personnes puissent y participer. Il est aussi essentiel de former les participants au moyen de manuels, de vidéos et de conférences.

Voici quelques exemples de réseaux de bénévoles.

Le Canada met sur pied «Écovigie», une appellation qui recouvre une grande variété de programmes utilisant des méthodes communes pour surveiller des organismes comme les grenouilles, les plantes et les arbres. Le recours à des méthodes communes permet de comparer des résultats dans l'ensemble du pays et même dans le monde au fur et à mesure que des programmes se développent.

### **Attention Grenouilles — Les oreilles de la science**

Les amphibiens et les grenouilles existent sur Terre depuis l'apparition des premiers dinosaures il y a environ 200 millions d'années. Ils ont survécu à la disparition des dinosaures il y a 65 millions d'années, mais les amphibiens sont aujourd'hui en péril, car leur nombre diminue dans le monde entier; il importe donc de se montrer vigilants.

Dans l'est du Canada, c'est par leurs cris uniques qu'on peut reconnaître les grenouilles — certains ressemblent à des trilles, à de petits cris aigus, à deux ballons qui se frottent l'un contre l'autre, etc. Les enseignants ou les étudiants peuvent apprendre à reconnaître ces cris en écoutant une bande magnétique ou Internet, ou en téléphonant à un répondeur spécial pour les entendre. Les bénévoles s'installent ensuite à l'ex-

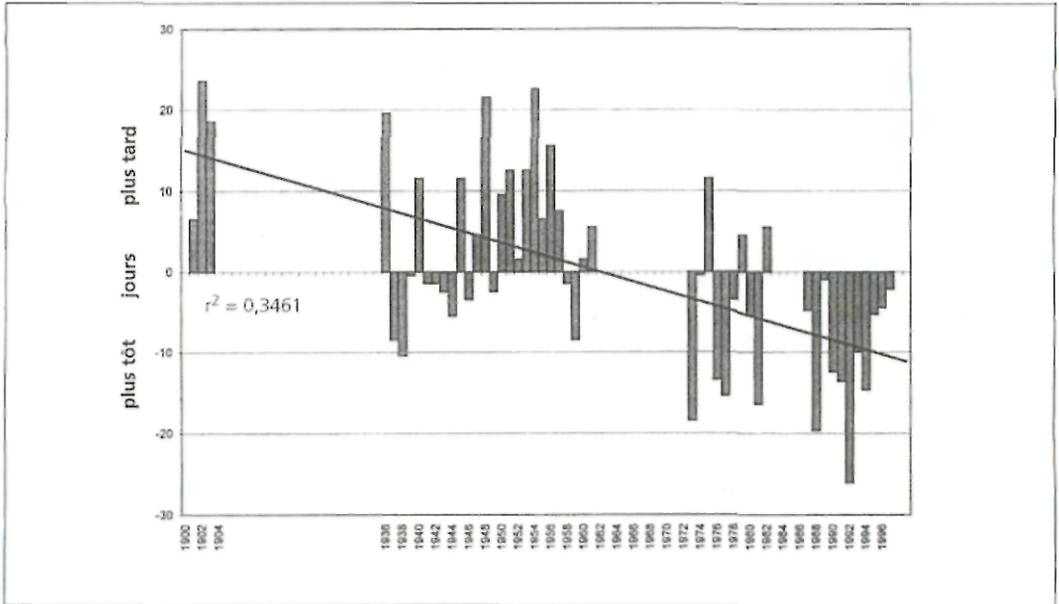
térieur de leur école, dans leur cour, près de l'étang ou du lac le plus proche et écoutent les cris des amphibiens. Les observations ainsi enregistrées peuvent être transmises par courrier, par Internet ou par téléphone à un répondeur. Ces observations sont compilées, et le résultat est transmis au public, sur Internet, sous forme de cartes d'inventaire indiquant où vivent ces espèces. Comme cet exercice est répété d'année en année, on pourra repérer toute baisse des populations d'amphibiens ainsi que les changements ou le déclin survenant dans les répartitions géographiques sans observation.

### **PlantWatch**

Plantwatch est un programme de phénologie (étude de la chronologie saisonnière des phénomènes du cycle de vie). Des étudiants et d'autres observateurs unissent leurs efforts pour suivre la montée du printemps vers le Nord. Les étudiants peuvent acquérir des capacités scientifiques tout en observant la transformation printanière des plantes et en s'informant sur la biodiversité. Les observateurs surveillent la floraison de huit plantes et rapportent le moment de l'éclosion aux scientifiques du centre par Internet\*. Les cartes ainsi élaborées sont affichées toutes les semaines sur Internet. Des guides destinés aux observateurs et aux enseignants illustrent les plantes et leur répartition en Amérique du Nord, décrivent le programme et établissent des liens avec le programme scolaire. Les écoles sont encouragées à créer des jardins Plantwatch dans lesquels on cultive les principales plantes indicatrices.

Dans l'ouest du Canada, on a observé une tendance à une floraison plus hâtive en conjonction avec les forts épisodes El Nino, aux températures plus élevées des océans ainsi qu'aux hivers plus chauds (figure 31.7) (Beaubien et Freeland, 2000). Cette information saisonnière très précieuse aide les agriculteurs et les forestiers à prendre des décisions. En effet, ils peuvent calculer correctement quand effectuer des opérations comme la plantation, la fertilisation, la protection des cultures et prédire la date de la récolte. Elle a aussi son utilité pour la gestion des espèces sauvages (quand le printemps est hâtif, plus de faons survivent, par exemple), pour la santé humaine (avertissements sur le pollen destinés aux personnes souf-

\* [www.devonian.ualberta.ca/pwatch/](http://www.devonian.ualberta.ca/pwatch/)



**Figure 31.7** Tendence à long terme (1901-1997) des premières floraisons de *P. tremuloides* à Edmonton, Alberta. Les années juliennes de floraison sont représentées par les écarts de la date de floraison moyenne pour toutes les données. Les données phénologiques de 1901-1903, 1936-1961, 1973-1982 et 1987-1997 sont tracées (si pas d'écart, la valeur égale zéro)

Source: Beaubien et Freeland (2000)

frant d'allergies) et pour le tourisme (connaître le meilleur moment pour photographier des fleurs ou des animaux, ou pour pêcher à la mouche).

### Tree Watch

Le projet Tree Watch permet aux écoles et aux collectivités de créer des parcelles de surveillance de la biodiversité dans des écosystèmes forestiers du monde entier, en utilisant des méthodes mises au point par la Smithsonian Institution/Programme de la biodiversité du Programme l'Homme et la Biosphère de l'UNESCO.

Les méthodes sont simples: on utilise une parcelle de surveillance permanente d'un hectare divisée en 25 quadrants de 20 m sur 20 m; on repère l'espèce et la localisation de chaque arbre dans la parcelle et on mesure le diamètre de chaque arbre à hauteur d'homme (dhh) ainsi que sa hauteur. Chaque arbre est alors cartographié au moyen du BIOMON, un logiciel mis au point par la Smithsonian Institution; ces cartes servent à valider les données de terrain au cours d'une vérification *in situ*.

Ces mesures sont importantes pour les scientifiques, parce qu'elles donnent des renseignements de base sur le nombre d'espèces d'arbres (diversité des espèces), la répartition et la dynamique de ces espèces (abondance des espèces) et la biomasse de la parcelle. Puisque les arbres sont mesurés tous les cinq ans, cette information peut révéler des changements de l'habitat de bon nombre d'organismes vivants qui composent la biodiversité du Canada.

## 7. L'AVENIR

Les programmes de surveillance environnementale ont montré leur utilité pour l'atteinte des principaux objectifs, soit définir les problèmes et leur trouver des solutions, faire rapport sur l'efficacité des programmes de contrôle et déceler les nouveaux problèmes. Malgré les succès remarquables obtenus dans la résolution de nombreux problèmes environnementaux ou au moins pour l'amorce d'intervention, nous avons perdu du terrain par rapport à l'objectif global de protection de l'environnement. L'environnement est perturbé pour de multiples

raisons, notamment lorsque l'utilisation des terres est modifiée et qu'on introduit accidentellement ou délibérément des espèces exotiques. Un des problèmes qui menacent l'environnement découle des activités anthropiques qui modifient la composition chimique de l'atmosphère terrestre. Par exemple, des hausses des concentrations de CO<sub>2</sub>, de CH<sub>4</sub>, de N<sub>2</sub>O et de CFC ont été enregistrées par des programmes de surveillance. En outre, des composés soufrés et azotés ont changé les caractéristiques chimiques des précipitations (pluie acide) à l'échelle régionale en Amérique du Nord, en Europe et en Asie. À leur tour, ces changements altèrent les propriétés physiques de l'atmosphère, ce qui se manifeste par l'appauvrissement de la couche d'ozone, la formation d'ozone troposphérique et la modification du bilan radiatif. Ce dernier changement fera augmenter la température planétaire moyenne (réchauffement de la planète). La biosphère est perturbée par les phénomènes chimiques et physiques qui se produisent dans l'atmosphère; on peut donc s'attendre à ce qu'elle réagisse à ces nouvelles conditions, ainsi qu'on peut déjà l'observer.

Les émissions de bioxyde de soufre et d'oxydes d'azote ont altéré les caractéristiques physiques des précipitations dans des régions proches ou sous le vent de grandes sources de ces polluants. Des dégâts infligés aux lacs, aux forêts, à la santé humaine, aux matériaux de construction et à la visibilité ont été rapportés dans l'est de l'Amérique du Nord (Environnement Canada, 1997). Ce rapport a également fait remarquer que les programmes de contrôle actuels ne sont pas suffisamment rigoureux pour protéger entièrement l'environnement. Il faut réduire encore plus les émissions, et plus particulièrement celles de bioxyde de soufre.

Keeling et coll. (1996) ont rapporté des changements dans l'amplitude et le rythme du cycle du carbone terrestre. Au cours des 30 dernières années, l'amplitude du cycle annuel a augmenté de 20 % au-dessus de l'observatoire du Mauna Loa, à Hawaï, et d'environ 40 % au-dessus des sites situés dans l'Arctique, soit celui d'Alert au Canada et de Pt. Barrow aux États-Unis. En outre, on observe maintenant que le minimum de la concentration atmosphérique annuelle de bioxyde de carbone survient maintenant une semaine plus tôt qu'il y a 30 ans, ce qui serait lié à la hausse des tem-

pératures moyennes. Keeling et coll. (1996) ont remarqué que les augmentations saisissantes de ces 30 années pourraient représenter des changements sans précédent dans la biosphère terrestre, particulièrement en réponse aux températures planétaires moyennes annuelles plus élevées et au fait que la croissance des plantes est actuellement stimulée par les concentrations de CO<sub>2</sub> atmosphérique les plus élevées des 150 000 dernières années.

Briffa et coll. (1998) ont rapporté l'état de la croissance des arbres situés à 300 endroits à des latitudes élevées de l'hémisphère Nord. Au cours des 50 dernières années, les régimes de croissance prévus en rapport avec la température n'ont pas été observés. Les taux de croissance ont été plutôt inférieurs aux prévisions. Bien que les raisons de ces changements demeurent inconnues, il s'agit de perturbations à grande échelle des processus normaux dans la biosphère. McLaughlin et Percy (1999) ont signalé qu'en Amérique du Nord les distributions régionales des maladies les plus fréquentes, établies à partir des inventaires forestiers, correspondent spatialement aux distributions des plus hautes concentrations d'ozone et de dépôt acide. Les effets physiologiques de polluants atmosphériques peuvent prédisposer les arbres à d'autres stress ou en accentuer les effets.

Wardle (1997) a rapporté des changements concernant l'appauvrissement de la couche stratosphérique au-dessus de l'Arctique canadien. Les baisses des valeurs de l'ozone au printemps sont devenues plus fréquentes et plus graves, à cause des basses températures de la stratosphère. Cette baisse des températures de la stratosphère peut, à son tour, être causée par l'augmentation des concentrations de bioxyde de carbone. Wardle postule que ces hausses des concentrations atmosphériques de bioxyde de carbone entraîneront des chutes supplémentaires des températures de la stratosphère en hiver, ce qui aura pour effet d'accroître l'appauvrissement de la couche d'ozone au début du printemps (Wardle, 1997). Cette situation peut se produire même si les concentrations de CFC dans l'atmosphère n'ont augmenté que très peu au cours des dernières années.

Dans l'ensemble, nous pouvons nous attendre à un large éventail de réponses écologiques complexes suite aux modifications des propriétés chimiques et physiques de l'atmosphère. Les

changements d'utilisation des terres et la présence d'espèces exotiques accentueront encore plus le stress écologique. Comme les ressources naturelles qui sont compromises servent de fondement à l'économie, il est essentiel d'enregistrer et de comprendre la transformation de ces écosystèmes afin de gérer d'une manière durable les produits et procédés industriels concernées. Ceci représente un défi majeur pour les programmes de surveillance et particulièrement pour les sites de surveillance intégrée.

## Remerciements

---

De nombreuses personnes ont fourni des rapports, des textes et des graphiques précieux. Merci spécialement à E. Beaubien, A. Fenech, E. Hare, H. Hirvonen, W. Hogg, J. Rudd, E. Snucins, D. Wardle, et au Centre de collaboration du PNUE et du GEMS/Eau de l'OMS. Marilyn Brydges et Adam Fenech ont accepté de réviser ce texte.

## Bibliographie

- Bangay, G. E. et C. Riordan (co-chairs). *Memorandum of Intent on Transboundary Air Pollution*, Impact Assessment Work Group 1, rapport final, 1980.
- Beaubien, E. G. et H. J. Freeland. «Spring phenology trends in Alberta, Canada: links to ocean temperature», *Int J Biometeorol*, 44, 2000, p. 53-59.
- Briffa, K. R., F. H. Schweingruber, P. D. Jones, T. J. Osborn, S. G. Shiyatov et E. A. Vaganov. «Reduced sensitivity of recent tree growth to temperature at high northern latitude. *Nature*, 391, 1998, p. 678-682.
- Commission mixte internationale (CMI). *La pollution dans le lac Erie, le lac Ontario et le secteur international du fleuve Saint-Laurent. Volume 1 — Sommaire*, rapport de la Commission internationale de lutte contre la pollution des eaux du lac Érié et Commission internationale de lutte contre la pollution des eaux du lac Ontario et du Saint-Laurent, 1969.
- Conseil national de recherches du Canada (CNRC). «Acidification dans l'environnement aquatique du Canada: critères scientifiques pour évaluer les effets du dépôt acides sur les écosystèmes aquatiques», rapport 18475, Conseil national de recherches du Canada, Ottawa, 1981.
- Crowley, T. J. «Causes of climate change over the past 1000 years», *Science*, 289, 2000, p. 270-276.
- Dansgaard, W., S. J. Johnsen, H. B. Clausen, D. Dahl-Jensen, N. S. Gundestrup, C. U. Hammer, C. S. Hvidberg, J. P. Steffensen, A. E. Sveinbjörnsdóttir, J. Jouzel et G. C. Bond. «Evidence for general instability of past climate from a 250-year ice-core record», *Nature*, 264, 1993, p. 218-220.
- De LaFontaine, Y., F. Gagné, C. Blaise, G. Costan et P. Gagnon. «Biomarkers in Zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) for the assessment and monitoring of water quality of the St. Lawrence River (Canada)», *Aquat Toxicol*, 50, 2000, p. 51-73.
- Dixit, S. S., J. P. Smol, J. C. Kingston et D. F. I. Charles. «Diatoms: powerful indicators of environmental change», *Environ Sci Tech* 26, 1992, p. 23-33.
- Dobson, H. F. H. *Lake Ontario water quality trends, 1969 to 1992: some observational nutrient-science for protecting a major and vulnerable source of drinking water*. National Water Research Institute, Contribution 94-58, 1994.
- Edman, G. et S. Fleischer. «The River Hogvadsan liming project — a presentation», *Proc Int Conf Impact Acid Precip*, Norway, projet SNSF, 1980, p. 300-301.
- Environnement Canada. *Les pluies acides au Canada*, tome 1, *Les résultats en bref*, 1997.
- Environnement Canada. «Série nationale d'indicateurs environnementaux. Les pluies acides», Gouvernement du Canada, Bulletin EDE 99-3, Ottawa, 1999, 8 p. [www.ec.gc.ca/soer-ree/Francais/Indicators/issues/acidrain/default.cfm](http://www.ec.gc.ca/soer-ree/Francais/Indicators/issues/acidrain/default.cfm)
- Griffiths, R. W. «Effects of Zebra Mussels (*Dreissena polymorpha*) on the benthic fauna of Lake St. Clair», dans T. F. Nalepa et D. W. Schloesser (rédacteurs) *Zebra Mussels: Biology, Impacts and Control*, Lewis Publishers/CRC Press, Boca Raton, Floride, 1993, p. 415-437.
- Hall, R. I. et J. P. Smol. «Paleolimnological assessment of long-term water quality changes in south central Ontario lakes affected by cottage development and acidification», *Can J Fish Aquat Sci*, 53, 1996, p. 1-17.
- Hall, P. et coll. *Canadian Acid Rain Assessment*, volume 4, *The Effects on Canada's Forests*, Environnement Canada, numéro de catalogue En56-123/4-1997E, 1997.
- Hecky, R. E., P. Campbell et D. M. Rosenberg. «The 25 Anniversary of the Experimental Lakes Area and the History of Lake 227», *Can J Fish Aquat Sci*, 51, 1994, p. 2243-2246.
- Hicks, B. B. et T. G. Brydges. «A strategy for integrated monitoring», *Environ Manage*, 18, 1, 1994, p. 1-12.
- Houghton, J. J., G. Jenkins et J. J. Ephraums (rédacteurs). *Climate Change: the IPCC Scientific Assessment*, University Press, Cambridge, 1990.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Radiative Forcing of Climate Change. The 1994 Report of the Scientific Assessment Working Group of IPCC Summary For Policy Makers*, World Meteorological Organization/United Nations Environment Programme, 1994.
- Jeffries, D. S. *Canadian Acid Rain Assessment: The Effects on Canada's Lakes, Rivers and Wetlands*, vol. 3, Environnement Canada, Ottawa, 1997.
- Jones, P. D., D. E. Parker, T. J. Osborn et K. R. Briffa. «Global and hemispheric temperature

- anomalies—land and marine instrumental records» dans *Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center*, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., 2001.cdiac.esd.ornl.gov/trends/temp/jonscr/jones.html
- Karl, T., F. Bretherton, W. Easterling, C. Miller et K. Trenberth. «Long-Term Climate Monitoring by the Global Climate Observing System (GCOS): An Editorial», *Climate Change*, 31, 2-4, 1995, p. 135-147.
- Keeling, C. D., J. F. S. Chin et T. P. Whorf. «Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO<sub>2</sub> measurements», *Nature*, 382, 6587, 1996, p. 146-149.
- Keeling, C. D. et T. P. Whorf. «Atmospheric CO<sub>2</sub> records from sites in the SIO air sampling network» dans *Trends: A Compendium of Data on Global Change*, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., 2002.cdiac.esd.ornl.gov/trends/co2/sio-mlo.htm
- Keller, W., J. R. Pitblado et J. Carbone. «Chemical responses of acidic lakes in the Sudbury, Ontario area to reduced smelter emissions», *Can J Fish Aquat Sci*, 49, suppl. 1, 1992, p. 25-32.
- Kelly, C. A., W. M. Rudd, R. A. Bodaly, N. P. Roulet, V. L. St-Louis, A. Heyes, T. R. Moore, S. Schiff, R. Aravena, K. J. Scott, B. Dyck, R. Harris, B. Warner et G. Edwards. «Increases in fluxes of greenhouse gases and mercury following flooding of an experimental reservoir», *Environ Sci Technol*, 31, 5, 1997, p. 1334-1344.
- Kleemola, S. et Y. Laine. «The Finnish Environment 116», 6<sup>th</sup> annual report 1997, dans S. Kleemola et M. Forsius (rédacteurs) UN ECE ICP Integrated Monitoring. Finnish Environment Institute, Helsinki, Finlande, 1997, p. 6-11.
- McLaughlin, S. et K. Percy. «Forest health in North America: some perspectives on actual and potential roles of climate and air pollution», *Water Air Soil Poll*, 116, 1999, p. 151-197.
- Moayeri, M. H. et P. A. Arp. *Unpublished data, assessing critical soil acidification load effects for ARNEWS sites; preliminary results*, University of New Brunswick, Fredericton, N.-B., 1997.
- Nalepa, T. F., D. J. Harston, G. W. Gostenik, D. L. Fanslow et G. A. Lang. «Changes in the freshwater mussel community of Lake St. Clair: From *Unionidae* to *Dreissena polymorpha* in eight years». *Journal of Great Lakes Research*, 22, 2, 1996, p. 354-369.
- Nelson, D. D. *International Environmental Auditing*, Government Institutes, Rockville, Maryland, 1998.
- Nilsson, J. (rédacteur). *Critical Loads for Sulphur and Nitrogen*, Nordic Council, Copenhagen, 1986.
- Nilsson, J. (rédacteur). *Critical Loads for Sulphur and Nitrogen*, Rep. NORD — Workshop Skokloster, Sweden, Nordic Council of Ministers, 15, 1988.
- Reuss, J. D. et D. W. Johnson. *Acid Deposition and the Acidification of soils and Waters*, 59 Springer-Verlag, Berlin, 1986.
- Ricciardi, A., F. G. Whoriskey et J. B. Rasmussen. «Impact of the *Dreissena* invasion on native unionid bivalves in the upper St. Lawrence River», *Can J Fish Aquat Sci*, 53, 1996, p. 685-695.
- Rudd, J. W. M., C. A. Kelly, D. W. Schindler et M. A. Turner. «A comparison of the acidification efficiencies of nitric and sulfuric acids by two whole-lake addition experiments», *Limnol Oceanogr*, 35, 1990, p. 663-679.
- Ryan, D. A. J., O. B. Allen, D. L. McLaughlin et A. M. Gordon. «Interpretation of sugar maple (*Acer saccharum*) ring chronologies from central and southern Ontario using a mixed linear model», *Can J Forest Res*, 24, 1994, p. 568-575.
- Schindler, D. W. et E. J. Fee. «Experimental Lakes Area: whole-lake experiments in eutrophication», *J Fish Res Board Can*, 31, 5, 1974, p. 937-953.
- Schindler, D. W. «Experimental acidification of a whole lake — a test of the oligotrophication hypothesis» dans D. Drablos et A. Tollan (rédacteurs) *Proceedings of the International Conference on the Ecological Impact of Acid Precipitation*, SNSF — Project Sandefjord, Norway, 1980, p. 370-374.
- Spence, T. et J. Townshend. «The Global Climate Observing System (GCOS): An Editorial», *Climate Change*, 31, 2-4, 1995, p. 130-134.
- Vollenweider, R. A. *The scientific basis of lake and stream eutrophication, with particular reference to phosphorus and nitrogen as eutrophication factors*, Technical Report DAS/CS1/68, 27, 1-182, OECD, Paris, 1968.
- Wardle, D. I. «Trends in ozone over Canada, ozone depleting substances and the UV-B», dans

- Emerging Air Issues of the 21st Century*, Actes de conférences de l'Air Waste Management Association, Calgary, 19 septembre 1997, p. 66-74.
- Wardle, D. I., J. Kerr, C. T. McElroy et D. R. Francis (rédacteurs). *La science de l'ozone: perspective canadienne sur la couche d'ozone: sommaire*, Environnement Canada, Service de l'environnement atmosphérique, CARD, 97-3. Ottawa, 1997.
- Watmough, S., T. Brydges et T. Hutchison. «The tree-ring chemistry of declining sugar maple in central Ontario, Canada», *Ambio*, 28, 7, 1999, p. 613-618.
- Wigley, T. M. L., R. L. Smith et B. D. Santer. «Anthropogenic Influence on the Autocorrelation Structure of Hemispheric-Mean Temperatures», *Science*, 282, 1998, p. 1676-1679.