

Rédacteurs  
*Jerry Spiegel*  
et *Lucien Y. Maystre*

**Table des matières**

Prévenir et combattre la pollution de l'environnement ..... <i>Jerry Spiegel et Lucien Y. Maystre</i>	55.2
La gestion de la pollution de l'air ..... <i>Dietrich Schwela et Berenice Goelzer</i>	55.3
La pollution de l'air: la modélisation de la dispersion des polluants de l'air..... <i>Marion Wichmann-Fiebig</i>	55.9
La surveillance de la qualité de l'air ..... <i>Hans-Ulrich Pfeffer et Peter Bruckmann</i>	55.12
La lutte contre la pollution atmosphérique . . . . <i>John Elias</i>	55.21
La lutte contre la pollution de l'eau . . . . . <i>Herbert C. Preul</i>	55.27
Le projet de régénération et de valorisation des eaux usées de la région de Dan: une étude de cas..... <i>Alexander Donagi</i>	55.38
Les principes de gestion des déchets . . . . . <i>Lucien Y. Maystre</i>	55.43
La gestion et le recyclage des déchets solides ..... <i>Niels Jørn Hahn et Poul S. Lauridsen</i>	55.44
Etude de cas: prévention et maîtrise par le Canada de la pollution multimilieux dans les Grands Lacs <i>Thomas Tseng, Victor Shantora et Ian R. Smith</i>	55.47
Des techniques de production moins polluantes..... <i>David Bennett</i>	55.53

## ● PRÉVENIR ET COMBATTRE LA POLLUTION DE L'ENVIRONNEMENT

*Jerry Spiegel et Lucien Y. Maystre*

Au cours du XX<sup>e</sup> siècle, on a pris de plus en plus conscience de l'impact des activités anthropiques sur l'environnement et la santé publique (étudié dans le chapitre n° 53, «Les risques pour la santé liés à l'environnement») et cette prise de conscience a conduit à la mise au point et à l'application de méthodes et de technologies visant à réduire les effets de la pollution. Dans ce contexte, les gouvernements ont adopté des réglementations et d'autres mesures (examinées dans le chapitre n° 54, «La politique de l'environnement»), afin de réduire le plus possible les effets défavorables et d'assurer le respect des normes de qualité de l'environnement.

Le présent chapitre vise à donner un aperçu général des méthodes utilisées pour prévenir et combattre la pollution. On y exposera les principes fondamentaux suivis pour éliminer les conséquences préjudiciables à la qualité de l'eau, de l'air ou de la terre; on verra comment la primauté est désormais accordée à la prévention et non plus à la lutte et l'on examinera les limitations auxquelles on se heurte lorsqu'on formule des solutions pour les divers milieux de l'environnement. Ainsi, pour protéger l'air, il ne suffit pas d'éliminer les traces de métaux des gaz de cheminée en se contentant de transférer ces contaminants aux sols par des méthodes inappropriées de gestion des déchets solides. Il faut des solutions intégrées prenant en compte les transferts de milieu à milieu.

### Le principe de la maîtrise de la pollution

L'industrialisation rapide a eu sur l'environnement des conséquences qui ont été illustrées par les innombrables cas où les ressources en sols, en air et en eau ont été contaminées par des matières toxiques et d'autres polluants, mettant ainsi gravement en danger la santé des êtres humains et la salubrité des écosystèmes. Avec l'utilisation plus extensive et intensive des matières et de l'énergie, la qualité des écosystèmes locaux, régionaux et mondiaux a été soumise à des pressions cumulatives.

Avant que l'on ne fasse un effort concerté pour restreindre l'impact de la pollution, la gestion de l'environnement n'allait guère au-delà d'une politique de laisser-faire tempérée par l'élimination des déchets pour éviter des nuisances locales graves considérées dans une optique à court terme. La nécessité de mesures correctrices était admise à titre exceptionnel lorsque les dommages étaient jugés inacceptables. A mesure que l'activité industrielle s'intensifiait et que l'on comprenait mieux les effets cumulatifs, le principe de *lutte contre la pollution* s'est imposé avec force dans la gestion de l'environnement.

Deux concepts ont servi de fondement à cette approche:

- le concept de la *capacité d'assimilation*, lequel affirme l'existence d'un niveau déterminé d'émissions qui n'entraîne pas de conséquences inacceptables pour l'équilibre de l'environnement ou pour la santé humaine;
- le concept du *principe de la prévention*, lequel postule que les dommages causés à l'environnement peuvent être évités si l'on agit sur les modalités, le rythme et le taux de pénétration des polluants.

Dans le cadre de la lutte contre la pollution, on a surtout cherché à isoler les contaminants de l'environnement et à utiliser des filtres et dispositifs d'épuration en fin de cycle. Ces solutions ont généralement mis l'accent sur des objectifs de qualité ou des limites d'émission propres aux divers milieux environnementaux et elles ont visé principalement les effluents provenant de sources ponctuelles qui étaient déversés dans ces milieux (air, eau, sols).

### La mise en œuvre des techniques de lutte contre la pollution

L'application des méthodes de lutte contre la pollution s'est révélée très efficace dans la maîtrise des problèmes — en particulier ceux de caractère local. Elle repose sur une analyse systématique de la source et de la nature de l'émission ou du rejet en question, de son interaction avec l'écosystème et du problème de pollution ambiante à résoudre, ainsi que sur la mise au point de techniques appropriées pour atténuer et surveiller les impacts sur l'environnement.

Dans leur article sur la lutte contre la pollution de l'air, Dietrich Schwela et Berenice Goelzer expliquent combien il est important de concevoir l'évaluation et la maîtrise des sources ponctuelles et non ponctuelles de cette pollution dans une perspective globale, et montrent les implications de cette démarche. Ils exposent également les problèmes — et les possibilités d'action — des pays qui connaissent une industrialisation rapide sans que leur développement antérieur ait été accompagné de solides mesures antipollution.

Marion Wichmann-Fiebig décrit les méthodes utilisées pour modéliser la dispersion des polluants atmosphériques en vue de définir et de caractériser la nature des problèmes de pollution. C'est sur cette base qu'il faut concevoir les mesures à mettre en place et évaluer leur efficacité. Grâce à une meilleure compréhension des effets potentiels, on peut maintenant dépasser le cadre local et estimer ces effets à l'échelle régionale et même mondiale.

Hans-Ulrich Pfeffer et Peter Bruckmann donnent un aperçu de l'équipement et des méthodes utilisés pour surveiller la qualité de l'air afin de pouvoir évaluer les problèmes potentiels de pollution, ainsi que l'efficacité des mesures de prévention et de lutte.

John Elias présente une vue d'ensemble des types de mesures antipollution que l'on peut appliquer et des questions qu'il faut aborder pour choisir les formules adéquates de la gestion de la lutte contre la pollution atmosphérique.

Le défi soulevé par la lutte contre la pollution de l'eau est traité par Herbert Preul dans un article qui montre le processus par lequel les eaux naturelles du globe peuvent être polluées par des sources ponctuelles, non ponctuelles ou intermittentes et les fondements de la réglementation en la matière, ainsi que les différents critères à appliquer pour définir les programmes de lutte. Cet auteur explique comment les effluents pénètrent dans les masses d'eau et peuvent être analysés et évalués en vue d'apprécier et de gérer les risques. Enfin, il donne un aperçu des techniques employées pour appliquer à grande échelle le traitement des eaux usées et la lutte contre la pollution de l'eau.

Pour finir, une étude de cas offre un exemple éloquent de la façon dont les eaux usées peuvent être réutilisées, question d'une grande importance dans la recherche d'un emploi efficace des ressources de l'environnement, spécialement lorsqu'elles sont rares. Alexander Donagi expose la méthode suivie pour traiter les eaux usées municipales d'une population de 1,5 million d'habitants en Israël et pour recharger la nappe souterraine.

### La gestion globale des déchets

Dans l'optique de la lutte contre la pollution, les déchets sont considérés comme un sous-produit indésirable du processus de production qu'il faut limiter pour éviter de contaminer les ressources en sols, en eau et en air au-delà du niveau jugé acceptable. Lucien Maystre donne un aperçu des problèmes à résoudre dans la gestion des déchets, ce qui permet de comprendre l'importance croissante de la prévention de la pollution et du recyclage.

Comme il est largement attesté que la mise en décharge sauvage des déchets donne lieu à une grave contamination, les gouvernements ont fixé des normes pour les pratiques acceptables de

collecte, de traitement et d'élimination, afin d'assurer la protection de l'environnement. Ils ont accordé une attention particulière aux critères d'élimination sans danger pour l'environnement par l'utilisation de décharges contrôlées, de l'incinération et du traitement des déchets dangereux.

Pour éviter les contraintes que l'élimination des déchets pourrait faire peser sur l'environnement et les coûts qu'elle entraîne et pour encourager une gestion plus avisée des ressources peu abondantes, on fait une place croissante à la réduction de la production des déchets et à leur recyclage. Niels Hahn et Poul Lauridsen décrivent succinctement les problèmes qui se posent lorsqu'on donne la préférence au recyclage comme stratégie de gestion des déchets et ils examinent les conséquences que cette solution pourrait avoir sur le plan de l'exposition des travailleurs.

### La priorité à la prévention

En réduisant la pollution en fin de cycle, on risque de la transférer d'un milieu à un autre, où elle pourrait créer des problèmes environnementaux tout aussi graves, ou même finir par être une source indirecte de pollution du même milieu. Sans être aussi onéreuse qu'une mesure correctrice, la réduction en fin de cycle peut augmenter sensiblement le coût des procédés de production sans ajouter de valeur. Cette démarche est d'ailleurs caractéristique des régimes de réglementation qui entraînent d'autres séries de dépenses dans la mesure où il faut assurer le respect des mesures adoptées.

Si la formule de la lutte contre la pollution a donné d'excellents résultats en remédiant à court terme aux phénomènes locaux, elle a moins bien réussi à résoudre les problèmes cumulatifs que l'on découvre de plus en plus au niveau régional (comme les pluies acides) ou mondial (comme l'appauvrissement de la couche d'ozone).

Un plan de lutte contre la pollution de l'environnement à visée sanitaire cherche à améliorer la qualité de la vie en ramenant les dégradations au niveau le plus faible possible. Les programmes et politiques de lutte, dont les implications et les priorités varient d'un pays à l'autre, englobent tous les aspects de la pollution (air, eaux, sols, etc.) et supposent une coordination entre divers domaines comme le développement industriel, l'urbanisme, la mise en valeur des ressources en eau et la politique des transports.

Thomas Tseng, Victor Shantora et Ian Smith prennent comme exemple une étude de l'impact multimilieux exercé par la pollution sur un écosystème vulnérable soumis à de nombreuses agressions — les Grands Lacs d'Amérique du Nord. Ils examinent en particulier l'efficacité limitée du modèle de lutte contre la pollution dans le cas des substances toxiques rémanentes qui se dispersent dans l'environnement. En mettant l'accent sur la solution adoptée dans un pays et ses conséquences pour l'action internationale, cette étude montre la portée des mesures qui s'attachent à la prévention aussi bien qu'à la lutte contre la pollution.

Comme les techniques de lutte sont devenues plus complexes et plus coûteuses, on s'est intéressé davantage aux moyens d'incorporer la prévention à la conception des procédés industriels, en vue d'éliminer les effets nocifs sur l'environnement tout en améliorant la compétitivité des entreprises. La prévention de la pollution, les techniques propres et la réduction de l'utilisation des substances toxiques ont notamment pour avantage d'offrir la possibilité de supprimer l'exposition des travailleurs aux risques qui pèsent sur leur santé.

David Bennett expose les raisons pour lesquelles on privilégie de plus en plus la prévention et comment elle se rattache aux autres méthodes de gestion de l'environnement. Cette approche joue un rôle capital dans l'instauration d'un développement durable, objectif dont l'importance a été largement reconnue depuis la parution du rapport de la Commission des Nations Unies sur l'environnement et le développement en 1987 et confirmée à la

Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement (CNUED) tenue à Rio de Janeiro en 1992.

La démarche de prévention met directement l'accent sur l'emploi de procédés, méthodes, matières et énergies qui évitent ou réduisent au minimum la création de polluants et de déchets à la source au lieu de préconiser des mesures qui interviennent en aval. Si la détermination des entreprises joue un rôle capital dans la décision de prévenir la pollution (voir l'article de Bringer et Zosel dans le chapitre n° 54, «La politique de l'environnement»), Bennett souligne les avantages que présente pour la société la réduction des risques auxquels sont exposés les écosystèmes et la santé des humains, celle des travailleurs en particulier. Il indique les principes qui peuvent servir de base pour évaluer les possibilités d'application de cette formule.

## LA GESTION DE LA POLLUTION DE L'AIR

*Dietrich Schwela et Berenice Goelzer*

La gestion de la pollution de l'air vise à éliminer, ou à ramener à des niveaux acceptables, les polluants gazeux en suspension dans l'air, les particules en suspension ainsi que les agents physiques et, dans une certaine mesure, biologiques, dont la présence dans l'atmosphère peut avoir des effets nocifs sur la santé de l'humain (augmentation de l'incidence ou de la prévalence des troubles respiratoires, morbidité, cancer, surmortalité) ou sur son bien-être (effets sensoriels, réduction de la visibilité, par exemple), exercer une action délétère sur les animaux ou les végétaux et, enfin, causer des dommages aux matières qui présentent un intérêt économique pour la société et à l'environnement (modifications du climat, par exemple). Il faut aussi accorder une grande attention aux graves dangers liés aux polluants radioactifs ainsi qu'aux procédures spéciales qu'exigent leur maîtrise et leur élimination.

On ne saurait trop insister sur l'importance d'une bonne gestion de la pollution atmosphérique à l'extérieur et à l'intérieur des bâtiments. En l'absence de mesures de réglementation adéquates, la multiplication des sources de pollution dans le monde moderne peut conduire à des dommages irréparables pour l'environnement et l'humanité.

Le présent article vise à donner un aperçu des solutions possibles pour la gestion de la pollution de l'air ambiant causée par les véhicules à moteur et l'industrie. Il faut cependant faire remarquer d'emblée que la pollution de l'air à l'intérieur des bâtiments (en particulier dans les pays en développement) pourrait avoir un rôle encore plus important que celle de l'extérieur, car on a constaté que les concentrations de polluants étaient souvent nettement plus élevées au-dedans qu'au-dehors.

Outre les émissions provenant de sources fixes ou mobiles, la gestion de la pollution atmosphérique doit prendre en compte des facteurs additionnels (comme la topographie et la météorologie, ou la participation de la communauté et du gouvernement, parmi beaucoup d'autres), qui doivent tous être intégrés dans un programme global. Les conditions météorologiques, par exemple, peuvent influencer dans une large mesure sur les concentrations au niveau du sol provenant d'une même émission de polluants. Les sources de pollution atmosphérique peuvent être dispersées au-dessus d'une communauté ou d'une région et leurs effets peuvent concerner plusieurs administrations ou nécessiter leur coopération. Qui plus est, la pollution atmosphérique ignore les frontières: les émissions d'une région peuvent avoir un impact dans une autre, puisqu'elles sont transportées à longue distance.

Tableau 55.1 • Polluants atmosphériques courants et leurs sources

Catégorie	Source	Polluants émis
Agriculture	Combustion à ciel ouvert	SPM, CO, COV
Industries extractives	Extraction du charbon	SPM, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , COV
	Production de pétrole brut et de gaz naturel	SO <sub>2</sub>
	Extraction de minerais non ferreux	SPM, Pb
	Carrières de pierres	SPM
Industries manufacturières	Alimentation, boissons et tabacs	SPM, CO, COV, H <sub>2</sub> S
	Textiles et industries du cuir	SPM, COV
	Produits du bois	SPM, COV
	Produits du papier, imprimerie	SPM, SO <sub>2</sub> , CO, COV, H <sub>2</sub> S, R-SH
Fabrication de produits chimiques	Anhydride phtalique	SPM, SO <sub>2</sub> , CO, COV
	Chlore et soude	Cl <sub>2</sub>
	Acide chlorhydrique	HCl
	Acide fluorhydrique	HF, SiF <sub>4</sub>
	Acide sulfurique	SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub>
	Acide nitrique	No <sub>x</sub>
	Acide phosphorique	SPM, F <sub>2</sub>
	Oxyde de plomb et pigments	SPM, Pb
	Ammoniac	SPM, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, COV, NH <sub>3</sub>
	Carbonate de sodium	SPM, NH <sub>3</sub>
	Carbure de calcium	SPM
	Acide adipique	SPM, NO <sub>x</sub> , CO, COV
	Alkylplomb	Pb
	Anhydride maléique et acide téréphtalique	CO, COV
	Production d'engrais et de pesticides	SPM, NH <sub>3</sub>
	Nitrate d'ammonium	SPM, NH <sub>3</sub> , HNO <sub>3</sub>
	Sulfate d'ammonium	COV
	Résines synthétiques, matières plastiques, fibres	SPM, COV, H <sub>2</sub> S, CS <sub>2</sub>
	Peintures, vernis, laques	SPM, COV
	Savon	SPM
	Noir de carbone et encre d'imprimerie	SPM, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, COV, H <sub>2</sub> S
	Trinitrotoluène	SPM, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , SO <sub>3</sub> , HNO <sub>3</sub>
	Raffineries de pétrole	Divers produits du pétrole et du charbon
Fabrication de produits minéraux non métalliques	Produits du verre	SPM, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, COV, F
	Produits en argile de construction	SPM, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, COV, F <sub>2</sub>
	Ciment, chaux et plâtre	SPM, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO
Industries des métaux de base	Fer et acier	SPM, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, COV, Pb
	Métaux non ferreux	SPM, SO <sub>2</sub> , F, Pb
Production d'énergie	Electricité, gaz et vapeur	SPM, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, COV, SO <sub>3</sub> , Pb
Commerce de gros et de détail	Stockage du carburant, opérations de remplissage	COV
Transports		SPM, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, COV, Pb
Services collectifs	Incinérateurs municipaux	SPM, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , CO, COV, Pb

Source: Economopoulos, 1993.

La gestion de la pollution atmosphérique exige donc une approche multidisciplinaire ainsi que des efforts conjugués des organes privés et publics.

### Les sources de la pollution atmosphérique

Les sources de la pollution résultant des activités humaines (ou sources des émissions) sont fondamentalement de deux ordres:

- *sources stationnaires*, qui peuvent être divisées en sources sectorielles (comme la production agricole, les industries extractives et
- *sources mobiles*, comprenant tous types de véhicules à moteur à combustion interne (voitures légères à moteur à essence, véhi-

l'industrie), en sources ponctuelles et sectorielles (comme la fabrication de produits chimiques, de produits minéraux non métalliques, la grosse métallurgie et la production d'énergie) et, enfin, en sources des collectivités (chauffage des habitations et bâtiments, incinérateurs des déchets municipaux et des boues d'épuration, cheminées, cuisinières, services de blanchisserie et installations de teinturerie);

cules légers et lourds à moteur diesel, motocyclettes, aéronefs, y compris les sources linéaires avec émissions de gaz et de matières particulaires provenant de la circulation automobile).

Il faut aussi tenir compte des sources naturelles de pollution (par exemple, les régions érodées, les volcans, certaines plantes qui libèrent de grandes quantités de pollen, les sources de bactéries, de spores et de virus). Les sources naturelles ne seront pas examinées dans le présent article.

### Les types de polluants atmosphériques

On distingue généralement trois catégories de polluants atmosphériques: les particules en suspension (poussières, vapeurs, brouillards, fumées), les polluants gazeux (gaz et vapeurs) et les odeurs. On trouvera ci-après quelques exemples de polluants courants:

*Les particules en suspension* (Suspended Particulate Matters (SPM, PM-10) comprennent les gaz d'échappement des diesels, les cendres volantes du charbon, les poussières minérales (charbon, amiante, calcaire, ciment, par exemple), les poussières et vapeurs (zinc, cuivre, fer, plomb, par exemple) et les brouillards acides (acide sulfurique, par exemple), les fluorures, les pigments pour peintures, les aérosols de pesticides, le noir de carbone et les fumées d'hydrocarbures. Les polluants sous forme de particules en suspension ont non seulement pour effet de causer des affections respiratoires, des cancers et de la corrosion, de détruire la flore, etc., mais ils peuvent aussi constituer une nuisance (encrassement, par exemple), faire obstacle à la lumière du soleil (formation de smog et de brumes par la diffusion de la lumière, par exemple) et agir comme surfaces catalytiques pour la réaction des substances chimiques absorbées.

*Les polluants gazeux* comprennent les composés du soufre (dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) et trioxyde de soufre (SO<sub>3</sub>)), le monoxyde de carbone, les composés de l'azote (monoxyde d'azote (NO), dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>), ammoniac (NH<sub>3</sub>)), les composés organiques (hydrocarbures (HC), composés organiques volatils (COV), hydrocarbures polycycliques aromatiques (HPA), aldéhydes), les composés halogénés et les dérivés halogénés (HF et HCl), le sulfure d'hydrogène, le sulfure de carbone et les mercaptants (odeurs).

Les polluants secondaires peuvent se former sous l'effet de réactions thermiques, chimiques ou photochimiques. Ainsi, sous l'action thermique, le dioxyde de soufre peut s'oxyder en trioxyde de soufre qui, dissous dans l'eau, donne lieu à la formation de brouillards d'acide sulfurique (catalysés par les oxydes de manganèse et de fer). Les réactions photochimiques entre les oxydes d'azote et les hydrocarbures réactifs peuvent produire de l'ozone (O<sub>3</sub>), du formaldéhyde et du nitrate de peroxyacétyle (PAN); les réactions entre HCl et le formaldéhyde peuvent former de l'oxyde de bis(chlorométhyle).

Si l'on sait que certaines odeurs peuvent être causées par des agents chimiques déterminés, comme le sulfure d'hydrogène (H<sub>2</sub>S), le sulfure de carbone (CS<sub>2</sub>) et les mercaptants (R-SH ou R1-S-R2), d'autres sont difficiles à définir chimiquement.

On trouvera au tableau 55.1 des exemples des principaux polluants atmosphériques industriels et de leurs sources.

### Les plans de préservation de la pureté de l'air

La gestion de la qualité de l'air vise à préserver la qualité de l'environnement par la définition du degré de pollution toléré, en laissant aux pouvoirs locaux et aux pollueurs le soin de formuler et d'appliquer les mesures nécessaires pour que ce degré ne soit pas dépassé. On trouve un exemple de législation conforme à cette optique dans l'adoption de normes de qualité de l'air ambiant qui reposent très souvent sur les directives (OMS, 1987a) concernant différents polluants; celles-ci définissent des niveaux

maximaux acceptés de polluants (ou indicateurs) dans la zone cible (par exemple, au niveau du sol à un point déterminé dans une collectivité) et elles peuvent être des normes primaires ou secondaires. Les normes primaires (OMS, 1987b) représentent les niveaux maximaux compatibles avec une marge de sécurité suffisante et avec la préservation de la santé publique, et il faut s'y conformer dans un délai déterminé; les normes secondaires sont celles que l'on juge nécessaires pour assurer la protection contre des effets nocifs connus ou attendus autres que des risques d'atteinte à la santé (principalement sur la végétation); et il faut s'y conformer «dans un délai raisonnable». Les normes de qualité de l'air sont des valeurs à court, moyen ou long terme valables pour 24 heures par jour, 7 jours par semaine et pour l'exposition mensuelle, saisonnière ou annuelle de tous les êtres vivants (y compris les sous-groupes sensibles comme les enfants, les personnes âgées et les malades), ainsi que pour des objets non vivants. Elles se distinguent des normes maximales autorisées pour l'exposition au travail, qui s'appliquent à une exposition hebdomadaire partielle (par exemple, 8 heures par jour, 5 jours par semaine) de travailleurs adultes et théoriquement en bonne santé.

Dans la gestion de la qualité de l'air, on recourt généralement à des mesures de limitation à la source telles que l'obligation d'utiliser des convertisseurs catalytiques dans les véhicules ou de respecter des normes d'émission dans les incinérateurs, les actions d'aménagement du territoire et la fermeture des usines ou la réduction du trafic lorsque les conditions météorologiques sont défavorables. La meilleure méthode de gestion insiste sur la nécessité que les émissions de polluants atmosphériques soient maintenues à un minimum, défini essentiellement par des normes relatives aux diverses sources de pollution atmosphérique, qui pourrait être atteint dans le cas des sources industrielles, par exemple, à l'aide de systèmes en circuit fermé et de collecteurs extrêmement efficaces. Une norme d'émission est une limite imposée à la quantité ou à la concentration d'un polluant émis par une source. Ce type de législation suppose que l'on décide pour chaque industrie des meilleurs moyens de limiter ses émissions (par exemple, en fixant des normes).

La gestion de la pollution atmosphérique vise principalement à établir un plan de préservation de la qualité de l'air (ou plan de réduction de la pollution atmosphérique) (Schwela et Köth-Jahr, 1994) comportant les éléments suivants:

- description de la zone en termes de topographie, de météorologie et de conditions socio-économiques;
- inventaire des émissions;
- comparaison avec les normes d'émission;
- inventaire des concentrations de polluants atmosphériques dans l'air;
- concentrations simulées de polluants atmosphériques dans l'air;
- comparaison avec les normes de qualité de l'air;
- inventaire des effets sur la santé publique et l'environnement;
- analyse des causes;
- mesures antipollution;
- coût des mesures antipollution;
- coût des effets sur la santé publique et l'environnement;
- analyse coûts-avantages (coûts des mesures de lutte comparés aux coûts des effets);
- transports et aménagement du territoire;
- plan d'application; engagement des ressources;
- projections concernant l'évolution de la population, du trafic, des industries et de la consommation de combustible;
- stratégies de suivi.

Certains de ces problèmes sont examinés ci-après.

### L'inventaire des émissions; la comparaison avec les normes d'émission

L'inventaire des émissions est une liste très complète des sources dans une zone donnée et des émissions de chacune d'elles, estimées avec autant de précision que possible pour toutes les sources ponctuelles, linéaires et dispersées (diffuses). En comparant ces émissions aux normes fixées pour une source donnée, on obtient une première idée des mesures antipollution possibles dans le cas où ces normes ne sont pas respectées. L'inventaire permet aussi de dresser une liste prioritaire des sources importantes en fonction de la quantité de polluants émise et il indique l'influence relative des différentes sources, par exemple le trafic par rapport aux sources industrielles ou résidentielles. Il sert enfin à faire une estimation des concentrations de polluants atmosphériques dans le cas des polluants pour lesquels il est difficile ou trop onéreux de mesurer les concentrations ambiantes.

### L'inventaire des concentrations de polluants atmosphériques; la comparaison avec les normes de qualité de l'air

L'inventaire des concentrations de polluants atmosphériques intègre les résultats de la surveillance des polluants de l'air ambiant sous forme de moyennes annuelles, de percentiles et de tendances de ces quantités. Les composés mesurés pour un tel inventaire sont:

- dioxyde de soufre;
- oxydes d'azote;
- particules en suspension;
- monoxyde de carbone;
- ozone;
- métaux lourds (Pb, Cd, Ni, Cu, Fe, As, Be);
- hydrocarbures polycycliques aromatiques: benzo[*a*]pyrène, benzo[*e*]pyrène, benzo[*a*]anthracène, dibenzo[*a,h*]anthracène, benzo[*ghi*]pérylène, coronène;
- composés organiques volatils: *n*-hexane, benzène, 3-méthylhexane, *n*-heptane, toluène, octane, éthylbenzène, xylène (*o*-, *m*-, *p*-), *n*-nonane, isopropylbenzène, propylbenzène, *n*-2-/3-/4-éthyltoluène, 1,2,4-/1,3,5-triméthylbenzène, trichlorométhane, 1,1,1-trichloroéthane, tétrachlorométhane, trichloroéthylène, tétrachloroéthylène.

La comparaison des concentrations de polluants atmosphériques avec les normes ou directives de qualité de l'air, si elles existent, indique les secteurs à problèmes pour lesquels il faut procéder à une analyse des causes, afin de repérer les sources incriminées. Pour cette analyse des causes, il faut modéliser la dispersion (voir l'article «La pollution de l'air: la modélisation de la dispersion des polluants de l'air»). On trouvera dans l'article «La surveillance de la qualité de l'air» une description des moyens et procédures utilisés de nos jours pour surveiller la pollution atmosphérique ambiante.

### Les concentrations simulées de polluants atmosphériques; la comparaison avec les normes de qualité de l'air

En se fondant sur l'inventaire des émissions, dont les milliers de composés ne sauraient tous être surveillés dans l'air ambiant pour des raisons financières, on peut recourir à la modélisation de la dispersion pour estimer les concentrations des composés les plus «exotiques». En se servant de paramètres météorologiques appropriés dans un modèle de dispersion bien choisi, on peut estimer les moyennes et percentiles annuels et les comparer aux normes ou directives de qualité de l'air, s'il en existe.

### L'inventaire des effets sur la santé publique et l'environnement; l'analyse des causes

Une autre source importante d'information est l'inventaire des effets (Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen, 1993) qui regroupe les résultats des études épidémiologiques réalisées dans une zone donnée et les effets de la pollution de l'air observés sur les récepteurs biologiques et matériels, par exemple les plantes, les animaux, les métaux utilisés dans la construction et les pierres des bâtiments. Les effets observés attribués à la pollution atmosphérique doivent faire l'objet d'une analyse causale pour rechercher le constituant responsable d'un effet donné — par exemple, une prévalence accrue de la bronchite chronique dans une zone polluée. Si un ou plusieurs composés ont été repérés dans une analyse des causes (analyse composé-cause), il faut en faire une deuxième pour trouver les sources responsables (analyse source-cause).

### Les mesures antipollution; leur coût

Pour les installations industrielles, les mesures antipollution consistent en dispositifs d'épuration de l'air qui soient bien conçus, bien installés, qui fonctionnent efficacement et qui soient bien entretenus; ce sont les collecteurs ou séparateurs. On peut définir un séparateur ou un collecteur comme «un appareil servant à séparer un ou plusieurs des éléments d'un milieu gazeux dans lequel ils sont en suspension ou avec lequel ils sont mélangés: particules solides (filtre et séparateur de poussières), particules liquides (filtre et séparateur de gouttelettes) et gaz (purificateur de gaz)». Les principaux types de matériels antipollution (examinés ci-après dans l'article «La lutte contre la pollution atmosphérique») sont:

- pour les particules: séparateurs inertiels (cyclones, par exemple), filtres en tissu (installations de filtres à sacs), précipitateurs électrostatiques, dépoussiéreurs par voie humide;
- pour les polluants gazeux: dépoussiéreurs par voie humide, équipements d'adsorption (lits d'adsorption, par exemple), brûleurs de postcombustion pouvant être allumés directement (incinération thermique) ou par catalyse (combustion catalytique).

Les dépoussiéreurs par voie humide peuvent servir à recueillir en même temps les polluants gazeux et les particules. Par ailleurs, certains types de dispositifs à combustion peuvent brûler les gaz et vapeurs combustibles aussi bien que certains aérosols combustibles. Selon le type d'effluent, on peut utiliser un ou plusieurs types de séparateurs.

La lutte contre les odeurs qui peuvent être identifiées chimiquement repose sur la maîtrise de l'agent ou des agents chimiques dont elles émanent (par exemple, par absorption ou par incinération). Lorsqu'une odeur n'est pas définie chimiquement ou que l'agent l'émet à des niveaux extrêmement faibles, on peut recourir à d'autres techniques, notamment pour la masquer (par un agent plus fort, mieux accepté et inoffensif) ou pour la contrecarrer (par un additif qui contrarie ou neutralise partiellement l'odeur désagréable).

Il ne faut pas oublier qu'il est indispensable de bien utiliser et entretenir les séparateurs pour en obtenir l'efficacité attendue. Il faut s'en assurer au stade de la planification, sur le plan du savoir-faire comme sur celui du financement. Il ne faut pas négliger les besoins en énergie. Lors du choix d'un dispositif d'épuration de l'air, il faut prendre en considération non seulement son coût initial, mais aussi les frais de fonctionnement et d'entretien. Lorsqu'il s'agit de polluants très toxiques, il faut veiller à obtenir une grande efficacité et à adopter des procédures spéciales pour l'entretien et l'élimination des déchets.

Dans les installations industrielles, les mesures antipollution fondamentales sont:

*Remplacement d'une matière par une autre.* Exemples: remplacer les solvants très toxiques employés dans certains procédés industriels par des produits moins toxiques; utiliser des combustibles à teneur plus faible en soufre (charbon lavé, par exemple) qui produisent donc moins de composés du soufre, etc.

*Modification ou remplacement du procédé ou de l'équipement.* Exemples: dans l'industrie sidérurgique, remplacer le minerai brut par du minerai en boulettes agglomérées (pour réduire la poussière libérée lors de la manutention); se servir de systèmes en circuit fermé plutôt qu'en circuit ouvert; remplacer les systèmes de chauffage au combustible par des techniques faisant appel à la vapeur, l'eau chaude ou l'électricité; utiliser des catalyseurs à la sortie des gaz d'échappement (procédés de combustion), et ainsi de suite.

La modification des procédés et de l'aménagement de l'usine peut aussi faciliter ou améliorer les conditions de dispersion et de captage des polluants. Ainsi, une configuration différente de l'usine peut faciliter l'installation d'un système d'échappement local; en abaissant le rendement d'un procédé, on pourra peut-être utiliser un certain collecteur (avec des limitations de volume, mais des résultats satisfaisants par ailleurs). Les modifications du procédé qui agissent sur différentes sources d'effluents dépendent étroitement du volume traité, et l'efficacité de certains dispositifs d'épuration de l'air augmente avec la concentration des polluants dans l'effluent. Le remplacement d'une matière par une autre et la modification des procédés peuvent présenter des limitations techniques et économiques qu'il faut prendre en considération.

*Ordre, propreté et stockage approprié.* Exemples: imposer une hygiène rigoureuse dans le traitement des denrées alimentaires et des produits d'origine animale; éviter de stocker à l'air libre les substances chimiques (tas de soufre, par exemple) ou les poussières et matières particulaires (comme le sable) ou, à défaut, asperger d'eau (si possible) les amas de particules volatiles ou appliquer un revêtement de surface (agents mouillants, plastique, par exemple) aux tas de matières qui risquent de libérer des polluants.

*Élimination appropriée des déchets.* Exemples: ne pas se contenter d'entasser les déchets chimiques (comme ceux des réacteurs de polymérisation) ou de déverser les matières polluantes (solides ou liquides) dans les cours d'eau. Cette dernière pratique non seulement souille les eaux, mais peut aussi créer une source secondaire de pollution atmosphérique, comme c'est le cas des déchets liquides provenant des papeteries qui utilisent le procédé au bisulfite, lequel dégage des polluants gazeux aux odeurs désagréables.

*Entretien.* Exemple: les moteurs à combustion interne qui sont bien entretenus et bien réglés produisent moins de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures.

*Méthodes de travail.* Exemple: tenir compte des conditions météorologiques, en particulier des vents, lorsqu'on pulvérise des pesticides.

Comme pour les méthodes sur le lieu du travail, l'adoption de bonnes pratiques au niveau de la collectivité peut contribuer à réduire la pollution de l'air, par exemple en modifiant l'utilisation des véhicules automobiles (recours accru aux transports en commun, aux voitures de petite cylindrée, etc.) et en agissant sur les installations de chauffage (meilleure isolation des bâtiments qu'il faudra de ce fait moins chauffer, meilleurs combustibles, etc.).

Pour lutter contre la pollution par les émissions des véhicules automobiles, on peut adopter des programmes efficaces d'inspection et d'entretien obligatoires pour le parc de voitures existant, imposer des convertisseurs catalytiques dans les nouvelles voitures, remplacer résolument les automobiles utilisant des carburants par des voitures fonctionnant à l'énergie solaire/électrique, réglementer la circulation routière et se doter d'une bonne politique des transports et d'aménagement du territoire.

On réduit la pollution causée par les véhicules à moteur en diminuant les émissions par kilomètre parcouru par véhicule (km/v) et en abaissant le nombre de km/v (Walsh, 1992). On peut

réduire les émissions par km/v en améliorant la performance du véhicule — matériel, entretien — pour les nouvelles voitures comme pour celles en circulation. On peut agir sur la composition de l'essence au plomb en diminuant la teneur en plomb ou en soufre, ce qui a également pour avantage de réduire les émissions d'hydrocarbures (HC) provenant des véhicules. Abaisser la teneur en soufre du carburant diesel pour réduire les émissions de particules présente en outre l'avantage d'augmenter les possibilités de limitation catalytique des émissions de particules diesel et d'HC organiques.

Un autre moyen important de réduire les émissions par évaporation, en particulier lorsqu'on fait le plein, consiste à agir sur la volatilité de l'essence, ce qui permet d'abaisser fortement les émissions d'HC par évaporation. L'emploi d'additifs oxygénés dans l'essence réduit les émissions d'HC et de CO, pour autant que la volatilité du carburant ne soit pas accrue.

Outre la réduction du nombre de km/v, on peut limiter les émissions des automobiles en recourant aux stratégies suivantes:

- utiliser des modes de transport plus efficaces;
- augmenter le nombre moyen de passagers par voiture;
- étaler les pointes de trafic;
- réduire la demande de déplacements.

Bien que ces solutions conduisent à économiser le carburant, elles ne sont pas encore acceptées par le grand public, et les gouvernements n'ont pas encore tenté sérieusement de les appliquer.

Toutes ces solutions techniques et politiques au problème des automobiles, exception faite de l'adoption des voitures électriques, sont de plus en plus contrecarrées par l'augmentation du nombre de véhicules. Ce problème ne trouvera une solution que si l'on s'attaque réellement à la question de l'extension du parc automobile.

### **Le coût des effets sur la santé publique et l'environnement; l'analyse coûts-avantages**

L'estimation du coût des effets sur la santé publique et l'environnement est la partie la plus difficile d'un plan de préservation de la qualité de l'air, étant donné qu'il est très difficile d'évaluer le prix de la réduction de durée de la vie causée par les maladies invalidantes, les taux d'hospitalisation et les heures de travail perdues. Pourtant, il est absolument nécessaire de procéder à cette estimation et de la comparer au coût des mesures antipollution si l'on veut le mettre en regard de ce que coûterait l'inaction en termes d'effets sur la santé publique et l'environnement.

### **Les transports et l'aménagement du territoire**

Le problème de la pollution est intimement lié à l'aménagement du territoire et aux transports, notamment à des questions comme l'urbanisme, la conception des routes, la réglementation de la circulation et des transports en commun, ainsi qu'aux considérations démographiques, topographiques, économiques et sociales (Venzia, 1977). En général, l'expansion rapide des agglomérations urbaines crée de graves problèmes de pollution parce que les politiques d'aménagement du territoire et des transports ont été peu satisfaisantes. Pour planifier les transports en vue de lutter contre la pollution, il faut adopter une réglementation, définir une politique, choisir les transports en commun urbains et prendre en compte le coût des embouteillages sur les routes. Les mesures de réglementation des transports ont un impact important sur le grand public en termes d'équité, d'interdictions et de perturbations économiques et sociales — et, plus particulièrement, les dispositions directes comme les contraintes relatives aux automobiles, les restrictions concernant l'essence et la réduction des émissions de véhicules. On peut estimer de manière fiable les réductions d'émissions imputables aux mesures directes et les véri-

fier. Les mesures indirectes, comme la réduction du nombre de kilomètres parcourus par véhicule obtenue grâce à l'amélioration des transports en commun urbains, la réglementation visant à accroître la fluidité de la circulation, les dispositions concernant les aires de stationnement, les péages et les taxes sur l'essence, les autorisations d'utiliser la voiture et les incitations à accepter librement des restrictions, reposent généralement sur l'expérience des succès et échecs passés et comportent un grand nombre d'incertitudes si l'on cherche à établir un plan viable des transports.

Les plans d'action nationaux prévoyant des mesures de réglementation indirectes peuvent influencer sur les transports et l'aménagement du territoire en ce qui concerne les routes, les aires de stationnement et les centres commerciaux. La planification à long terme du réseau des transports en commun et des zones qu'il dessert empêchera une détérioration importante de la qualité de l'air et contribuera au respect des normes en la matière. On considère généralement que les transports en commun urbains constituent une solution potentielle aux problèmes de pollution de l'air en milieu urbain. Le choix d'un système de transports en commun urbains desservant une région donnée et les diverses formules de répartition modale entre la circulation individuelle et l'autobus ou le chemin de fer modifieront en fin de compte les caractéristiques de l'aménagement du territoire. Il existe une répartition optimale qui réduit la pollution atmosphérique à un minimum; elle peut toutefois ne pas se révéler acceptable lorsqu'on prend en considération les facteurs non environnementaux.

On a dit de l'automobile qu'elle était le plus grand producteur d'effets économiques externes que l'on ait jamais connu. Certains d'entre eux, comme la création d'emplois et la mobilité, sont positifs, mais les effets négatifs, comme la pollution atmosphérique, les accidents qui entraînent morts et blessures, les dommages causés aux biens, le bruit, le temps perdu et le stress incitent à conclure que les transports ne sont pas une industrie à coût décroissant dans les zones urbaines. Le coût des embouteillages sur les routes est un autre effet économique externe, mais il est difficile de déterminer le prix du temps perdu et des encombrements. Or, on ne saurait obtenir une juste évaluation des différents modes de transport en concurrence, notamment les transports en commun urbains, si le coût des déplacements pour se rendre au travail n'inclut pas celui des embouteillages.

L'aménagement du territoire en vue de la lutte antipollution englobe les règlements de zone et les normes de performance, la réglementation de l'utilisation du domaine foncier, ainsi que la politique en matière de logement et d'urbanisation. Le zonage foncier a été la première tentative pour protéger la population, ses biens et ses chances économiques. Toutefois, comme les polluants atmosphériques se dispersent partout, il faut davantage qu'une séparation physique entre les industries et les zones résidentielles pour protéger les personnes. On a donc introduit dans certains règlements fonciers des normes de performance reposant initialement sur des considérations esthétiques ou des décisions qualitatives en vue de quantifier les critères qui doivent permettre de repérer les problèmes éventuels.

Pour planifier à long terme l'aménagement du territoire, il faut connaître les limitations de l'environnement en termes de capacité d'assimilation. On peut alors élaborer les mesures réglementant l'occupation foncière de façon à répartir équitablement la capacité entre les activités que l'on désire implanter sur un territoire donné. On peut avoir recours à des systèmes de permis pour les nouvelles sources stationnaires, à un zonage qui distingue les zones industrielles et résidentielles, à l'imposition de restrictions sous forme de servitudes ou d'achat de terrains, à la réglementation des milieux récepteurs, au zonage en fonction de la densité des émissions et aux règles d'attribution de droits d'émission.

Les politiques de logement qui visent à rendre la propriété accessible à un grand nombre de personnes auxquelles elle reste-

rait autrement interdite (mesures fiscales d'encouragement et politique du crédit immobilier) favorisent l'étalement des villes et découragent indirectement le développement d'un habitat plus dense. Or, on constate de nos jours que ces politiques sont désastreuses pour l'environnement, car elles n'ont pas été accompagnées de la mise en place de systèmes efficaces de transport en commun pour répondre aux besoins de toutes les nouvelles zones bâties. Cette constatation démontre qu'il convient de coordonner les programmes qui ont un impact sur l'environnement et que la planification doit intervenir au niveau où le problème se pose et sur une échelle suffisamment vaste pour englober l'ensemble du système.

Pour protéger convenablement l'environnement à long terme, il faut examiner l'aménagement du territoire aux niveaux national, régional et local. Les programmes gouvernementaux commencent habituellement par le choix des sites pour les centrales électriques, l'emplacement des industries extractives, le zonage côtier et l'aménagement des espaces désertiques ou montagneux ou d'autres zones récréatives. Étant donné que, par leur multiplicité, les autorités locales d'une région ne sont pas en mesure de traiter correctement les problèmes environnementaux de la région, ce sont les administrations ou organismes régionaux qui devraient coordonner les schémas d'utilisation et de densité foncières en contrôlant la répartition spatiale ainsi que l'emplacement et l'utilisation des nouvelles constructions et des moyens de transport. L'aménagement du territoire et la planification des transports doivent aller de pair avec le respect des règlements visant à maintenir la qualité de l'air désirée. Dans l'idéal, la lutte contre la pollution de l'air devrait être planifiée par le même organisme régional que celui qui gère l'aménagement du territoire, étant donné le chevauchement des effets externes associés à ces deux problématiques.

### **Le programme d'application; l'engagement des ressources**

Le plan antipollution de l'air devrait toujours contenir un programme d'application qui indique comment faire respecter les mesures prises. Pour ce faire, il faut aussi engager des ressources qui, selon le principe du pollueur payeur, définiront ce que le pollueur doit faire et comment l'administration l'aidera à remplir ses engagements.

### **Les projections sur l'avenir**

A titre de précaution, le plan antipollution devrait inclure des estimations des tendances de l'évolution démographique, de la circulation, des industries et de la consommation de combustible, pour que l'on puisse définir les parades aux problèmes futurs. On évitera alors les perturbations en prenant les mesures voulues longtemps avant l'apparition des problèmes entrevus.

### **Les stratégies de suivi**

La stratégie de suivi pour la gestion de la qualité de l'air consiste en programmes et mesures concernant l'application de futurs plans antipollution.

### **Le rôle des études d'impact sur l'environnement**

L'étude d'impact sur l'environnement (EIE) est la procédure qui permet à l'organisme responsable de fournir un exposé détaillé de l'effet d'une action envisagée qui risque d'influer sensiblement sur la qualité de l'environnement humain (Lee, 1993). L'EIE est un instrument de prévention visant à prendre l'environnement humain en compte dès la première phase d'élaboration d'un programme ou d'un projet.

Cette étude revêt une importance particulière pour les pays qui élaborent des projets dans le cadre de la réorientation et de la restructuration de leur économie. Elle est prévue par la loi dans

un grand nombre de pays développés et est aujourd'hui appliquée de plus en plus largement dans les pays en développement et les économies en transition.

L'EIE constitue une synthèse en ce sens qu'elle intègre la planification et la gestion globales de l'environnement en prenant en considération les interactions entre les différents milieux environnementaux. D'autre part, elle incorpore au processus de planification l'estimation des conséquences pour l'environnement et devient ainsi un instrument du développement durable. Elle associe aussi les aspects techniques et la participation des citoyens puisque, d'une part, elle collecte, analyse et exploite les données scientifiques et techniques en prenant en considération les contrôles de qualité et l'assurance qualité et que, d'autre part, elle souligne l'importance des consultations, avant l'octroi de permis, entre les organismes responsables de l'environnement et le public qui pourrait être touché par le projet. Le plan antipollution de l'air peut être considéré comme un élément de la procédure EIE en ce qui concerne l'air.

## ● LA POLLUTION DE L'AIR: LA MODÉLISATION DE LA DISPERSION DES POLLUANTS DE L'AIR

*Marion Wichmann-Fiebig*

Par la modélisation de la pollution atmosphérique, on cherche à évaluer les concentrations de polluants à l'extérieur causées, par exemple, par les procédés de production industrielle, les rejets accidentels ou la circulation. La modélisation de la pollution de l'air sert à déterminer la concentration totale des polluants et à trouver la cause de niveaux anormalement élevés. Pour les projets qui en sont au stade de la planification, on peut estimer d'avance les nuisances qu'ils ajouteront à la charge existante afin de pouvoir optimiser les conditions d'émission.

Selon les normes de qualité de l'air définies pour un polluant donné, il est intéressant de connaître les valeurs annuelles moyennes ou les concentrations de pointe sur une courte période. D'ordinaire, il faut calculer les concentrations là où la population est active, c'est-à-dire près de la surface, à 2 mètres environ au-dessus du sol.

### Les paramètres influant sur la dispersion des polluants

Deux types de paramètres influencent la dispersion des polluants: les paramètres de la source et les paramètres météorologiques. Pour les paramètres de la source, les concentrations sont proportionnelles à la quantité de polluants émis. Dans le cas des poussières, il faut connaître le diamètre des particules pour déterminer la sédimentation et le dépôt des matières (VDI, 1992a). Comme les concentrations au niveau du sol diminuent avec la hauteur de la cheminée, il faut aussi connaître ce paramètre. En outre, les concentrations dépendent de la quantité totale des gaz dégagés, ainsi que de leur température et de leur vitesse. Si leur température excède celle de l'air ambiant, les gaz seront soumis à une surélévation thermique. Leur vitesse d'échappement, qui peut se calculer à partir du diamètre intérieur de la cheminée et du débit des gaz, causera une surélévation liée à la quantité de mouvement. On peut recourir à des formules empiriques pour décrire ces caractéristiques (VDI, 1985; Venkatram et Wyngaard, 1988). Il convient de souligner que ce n'est pas la masse du polluant considérée, mais celle de l'ensemble des gaz qui est responsable de la flottabilité thermique et de la flottabilité liée à la quantité de mouvement dynamique.

### Les programmes internationaux de surveillance

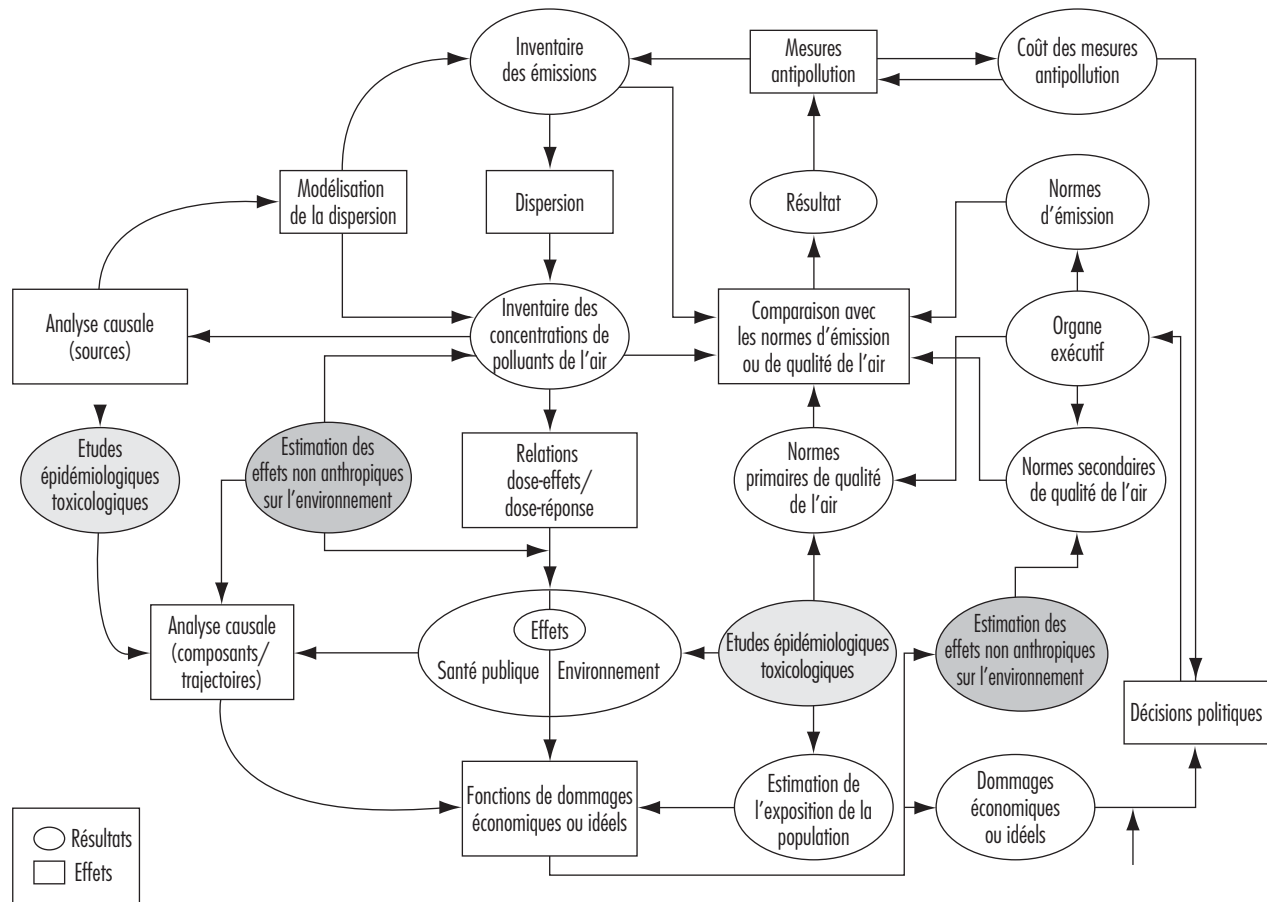
Les organismes internationaux comme l'Organisation mondiale de la santé (OMS), l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) ont établi des projets de surveillance et de recherche pour éclaircir les problèmes de la pollution atmosphérique et pour promouvoir des mesures visant à prévenir une nouvelle détérioration de la santé publique et de l'environnement, ainsi que des conditions climatiques.

Le Système mondial de surveillance continue de l'environnement GEMS/Air (OMS/PNUE, 1993b), organisé et patronné par l'OMS et le PNUE, a élaboré un programme complet visant à fournir les instruments d'une gestion rationnelle de la pollution de l'air (voir figure 55.1). Au centre de ce programme se trouve une base mondiale de données sur les concentrations dans l'air urbain des polluants ci-après: dioxydes de soufre, particules en suspension, plomb, oxydes d'azote, monoxyde de carbone et ozone. Un autre élément, tout aussi important, est la fourniture d'instruments de gestion tels que les guides pour les inventaires rapides des émissions, les programmes de modélisation de la dispersion, les estimations de l'exposition de la population, les mesures antipollution et l'analyse coûts-avantages. A cet égard, GEMS/Air offre des manuels d'étude de la méthodologie (OMS/PNUE, 1994, 1995b), fait des évaluations mondiales de la qualité de l'air, facilite l'examen et la validation des évaluations, sert d'intermédiaire pour l'échange de données et d'informations, publie des documents techniques sur tous les aspects de la gestion de la qualité de l'air, facilite l'établissement d'une surveillance, réalise et diffuse largement des études annuelles et établit ou repère des centres régionaux de collaboration ou des experts pour coordonner et appuyer les activités en fonction des besoins des différentes régions (OMS/PNUE, 1992, 1993a, 1995a).

La Veille de l'atmosphère globale (VAG) (Miller et Soudine, 1994) fournit des données et d'autres informations sur la composition chimique et les caractéristiques physiques connexes de l'atmosphère, ainsi que sur leurs tendances, pour permettre de comprendre les liens entre les modifications de la composition de l'atmosphère et les changements climatiques mondiaux et régionaux, le transport et le dépôt à grande distance dans l'atmosphère de substances chimiques potentiellement toxiques au-dessus des écosystèmes terrestres, d'eau douce et marins, et le cycle naturel des éléments chimiques dans le système mondial atmosphère/océans/biosphère, ainsi que les effets des activités humaines sur ce système. La VAG comprend quatre domaines d'activité: le Système mondial d'observation de l'ozone (SMO<sub>3</sub>), la surveillance mondiale de la composition de fond de l'atmosphère, y compris le Réseau de surveillance de la pollution atmosphérique de fond (BAPMoN); la dispersion, le transport, la transformation chimique et le dépôt des polluants atmosphériques sur terre et en mer à différentes échelles de temps et d'espace, l'échange des polluants entre l'atmosphère et d'autres compartiments de l'environnement, et la surveillance intégrée. L'un des aspects les plus importants de la VAG est l'établissement de centres d'activité scientifiques chargés de l'assurance de la qualité des données recueillies dans le cadre de la VAG.

Les paramètres météorologiques qui influent sur la dispersion des polluants sont la vitesse et la direction du vent, ainsi que la stratification thermique horizontale. La concentration du polluant est fonction inverse de la vitesse du vent, ce qui s'explique principalement par l'accélération du transport. En outre, le brassage turbulent augmente avec la vitesse du vent. Etant donné que les inversions (situations dans lesquelles la température augmente avec l'altitude) empêchent le brassage turbulent, on observe des concentrations maximales au sol en cas de stratification extrêmement stable. Inversement, les situations de convection intensifient le brassage vertical et produisent par conséquent les concentrations les plus faibles.

Figure 55.1 • Système mondial de surveillance continue de l'environnement



Les normes de qualité de l'air — par exemple, les valeurs moyennes annuelles ou les 98<sup>e</sup> percentiles — reposent habituellement sur des statistiques. Il faut donc des séries chronologiques de données pour les paramètres météorologiques pertinents. L'idéal serait d'avoir des statistiques qui reposent sur 10 années d'observation. Si l'on dispose seulement de données portant sur une période plus courte, il faudrait s'assurer qu'elles soient représentatives pour une période plus longue. On peut le faire notamment par l'analyse des séries chronologiques plus longues provenant d'autres sites d'observation.

Il faut aussi que les séries météorologiques chronologiques dont on se sert soient représentatives du site considéré, c'est-à-dire qu'elles traduisent les caractéristiques locales. C'est particulièrement important pour les normes de qualité de l'air qui reposent sur les fractions de crête de la distribution, comme les 98<sup>e</sup> percentiles. Si l'on ne dispose pas de séries chronologiques de ce genre, on peut utiliser un modèle météorologique d'écoulement pour en calculer une à partir d'autres données, comme on le verra plus loin.

### Les principes de la modélisation de la pollution de l'air

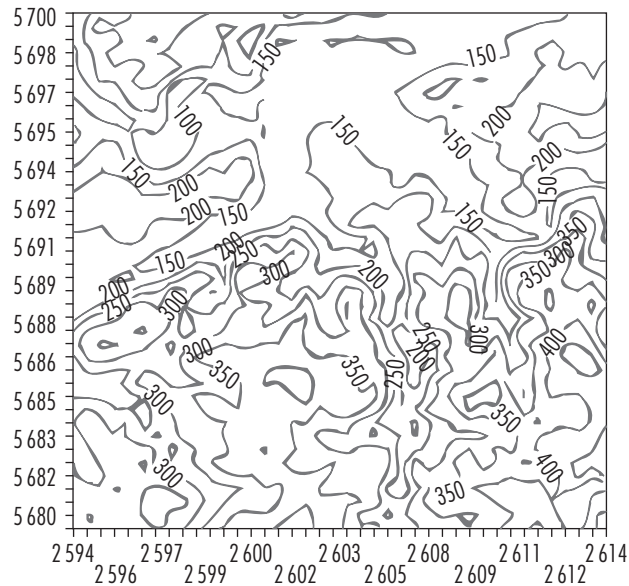
Comme on l'a signalé plus haut, la dispersion des polluants dépend des conditions d'émission, du transport et du brassage turbulent. On appelle modélisation de la dispersion de type eulérien

(Pielke, 1984) l'emploi de l'équation complète qui décrit ces caractéristiques. Avec cette méthode, il faut déterminer les gains et pertes du polluant considéré à chacun des points d'une grille spatiale fictive et à des intervalles de temps distincts. Comme cette méthode est très complexe et exige beaucoup de temps d'ordinateur, elle ne peut pas être utilisée de façon courante. Toutefois, pour de nombreuses applications, on peut la simplifier à l'aide des hypothèses suivantes:

- aucune modification des conditions d'émission avec le temps;
- aucune modification des conditions météorologiques pendant le transport;
- vitesses du vent supérieures à 1 m/s.

Dans ce cas, l'équation visée plus haut peut être résolue analytiquement. La formule obtenue décrit un panache avec une distribution gaussienne des concentrations, dénommé modèle de panache gaussien (VDI, 1992a). Les paramètres de distribution dépendent des conditions météorologiques et de la distance sous le vent, ainsi que de la hauteur de la cheminée. Ils doivent être déterminés empiriquement (Venkatram et Wyngaard, 1988). On peut décrire à l'aide du modèle de bouffée gaussienne (VDI, 1996) les situations dans lesquelles les émissions et les paramètres météorologiques varient fortement dans le temps et dans l'espace. Dans cette méthode, des bouffées distinctes sont émises à intervalles de temps fixes, chacune suivant sa propre trajectoire en fonc-

Figure 55.2 • Structure topographique d'une région modèle



Modèle topographique d'une région de 20 x 20 km, avec une source de 8 760 kg/an supposée aux coordonnées de Gauss-Kruger 2 607/5 687 à une hauteur de 20 m au-dessus du sol.

Source: Wichmann-Fiebig et Brüchner, 1997.

tion des conditions météorologiques existantes. Le long de son parcours, chaque bouffée grandit selon le brassage turbulent. Les paramètres qui décrivent cette croissance doivent, là encore, être déterminés à partir de données empiriques (Venkatram et Wyngaard, 1988). Il convient cependant de souligner que, pour atteindre cet objectif, il faut disposer de paramètres présentant la répartition voulue dans l'espace et dans le temps.

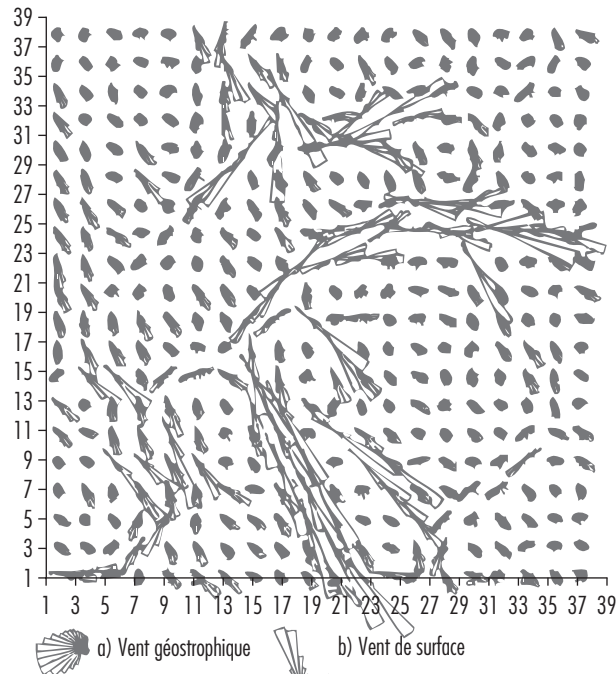
Pour les rejets accidentels ou les études de cas isolées, il est recommandé d'utiliser un modèle lagrangien ou particulaire (VDI, 1999). L'idée est de calculer les trajectoires d'un grand nombre de particules, représentant chacune une quantité fixe du polluant considéré. Les différentes trajectoires sont déterminées par le transport dû au vent moyen et par les perturbations stochastiques. En raison de l'élément stochastique, ces trajectoires ne concordent pas entièrement, mais décrivent le brassage dû à la turbulence. En principe, les modèles lagrangiens sont capables de prendre en considération des conditions météorologiques complexes, en particulier le vent et la turbulence; les champs calculés à l'aide des modèles de circulation décrits ci-dessous peuvent être utilisés dans la modélisation lagrangienne de la dispersion.

### La modélisation de la dispersion dans le cas d'un relief complexe

S'il faut calculer les concentrations de polluants dans un terrain accidenté, il peut être nécessaire de tenir compte dans la modélisation des effets de la topographie sur la dispersion. Ces effets sont, par exemple, le transport suivant la structure topographique, ou les systèmes de vents thermiques comme les brises de mer ou les vents de montagne qui modifient la direction du vent au cours de la journée.

Si ces effets se produisent à une échelle beaucoup plus vaste que la zone du modèle, leur influence peut être étudiée à l'aide de données météorologiques qui reflètent les caractéristiques locales. En l'absence de données de ce genre, on peut se représenter la structure en trois dimensions imposée par la topographie à la

Figure 55.3 • Distribution des fréquences au niveau du sol déduites à l'aide de la distribution des fréquences géostrophiques pour des champs de vents hétérogènes



a) Vent géostrophique b) Vent de surface

a) et b) représentent la distribution des fréquences géostrophiques à l'emplacement de la source et la distribution au niveau du sol qui en résultent. La distribution des fréquences au niveau du sol pour l'ensemble de la zone du modèle reflète la structure topographique de la zone.

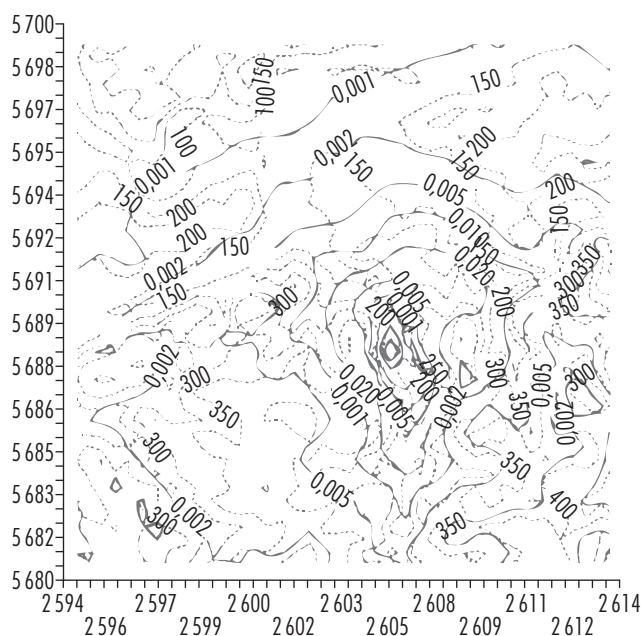
Source: Wichmann-Fiebig et Brüchner, 1997.

circulation étudiée en utilisant un modèle de circulation correspondant. A l'aide de ces données, on peut modéliser la dispersion elle-même en prenant pour hypothèse une homogénéité horizontale, comme on l'a vu plus haut dans le cas du modèle de panache gaussien. Toutefois, dans les cas où les conditions de vent changent sensiblement dans la zone du modèle, la modélisation de la dispersion doit prendre en considération le courant à trois dimensions influencé par la configuration topographique. Comme on l'a signalé ci-dessus, on peut y parvenir en utilisant une bouffée gaussienne ou un modèle lagrangien. On peut aussi procéder par une modélisation de type eulérien, qui est plus complexe.

Pour déterminer la direction du vent en tenant compte de la configuration topographique, on peut utiliser une modélisation de la circulation basée sur la conservation de la masse ou le diagnostic (Pielke, 1984). Avec cette méthode, on intègre la circulation à la topographie en faisant varier aussi peu que possible les valeurs initiales et en conservant la masse. Comme elle donne des résultats rapides, cette méthode peut aussi servir à générer des statistiques du vent pour un site donné si l'on ne dispose pas d'observations. Pour ce faire, on emploie des statistiques du vent géostrophique (c'est-à-dire des données de radiosondage en altitude).

Si l'on doit examiner plus en détail les régimes de vents thermiques, il faut alors utiliser des modèles pronostiques. Selon l'échelle et la déclivité de la zone prise comme modèle, on choisira une

Figure 55.4 • Concentrations annuelles moyennes de polluants pour une région hypothétique, calculées à partir de la distribution des fréquences géostrophiques pour des champs de vent hétérogènes



Les courbes de niveau sont représentées par les lignes en pointillé, les isolignes de concentration des polluants par des lignes continues. On constate que le transport suit de préférence les axes des vallées, ce qui donne une orientation nord-sud de la distribution des concentrations à proximité de la source. En dehors de la vallée, vers le nord, on observe une distribution plus homogène.

Source: Wichmann-Fiebig et Brüchner, 1997.

approche hydrostatique, ou l'approche non hydrostatique qui est encore plus complexe (VDI, 1992b). Les modèles de ce type exigent un ordinateur puissant et une grande expérience. Ils ne permettent pas de déterminer les concentrations en se fondant sur des moyennes annuelles de caractère général. En revanche, on peut réaliser des études pour les conditions les plus défavorables en examinant uniquement une direction du vent, ainsi que les paramètres de vitesse du vent et de stratification qui donneront les concentrations les plus élevées au sol. Si les valeurs ainsi obtenues dans les conditions les plus défavorables n'excèdent pas les normes de qualité de l'air, il n'est pas nécessaire de procéder à des études plus détaillées.

Les figures 55.2, 55.3 et 55.4 montrent comment représenter le transport et la dispersion des polluants en fonction de l'influence de la topographie et de la climatologie des vents obtenue par l'étude des fréquences des vents de surface et des vents géostrophiques.

### La modélisation de la dispersion dans le cas de sources de faible hauteur

Lorsqu'on examine la pollution atmosphérique causée par des sources de faible hauteur (c'est-à-dire par des cheminées de même hauteur que le bâtiment ou les émissions de la circulation routière), il faut tenir compte de l'influence des constructions avoisinantes. Les émissions de la circulation routière sont emprisonnées dans une certaine mesure par les couloirs de rue urbains. Des formules empiriques ont été mises au point pour décrire ce phénomène (Yamartino et Wiegand, 1986).

Les polluants émis par une cheminée de faible hauteur située sur un bâtiment seront retenus dans la circulation sur le côté du bâtiment qui est sous le vent. L'extension de cette circulation sous le vent dépend de la hauteur et de la largeur du bâtiment, ainsi que de la vitesse du vent. C'est pourquoi on ne peut généralement utiliser les méthodes simplifiées pour décrire la dispersion des polluants en pareil cas, en se fondant seulement sur la hauteur d'un bâtiment. On a pu connaître l'extension verticale et horizontale de cette circulation sous le vent grâce à des études faites en soufflerie (Hosker, 1985) et on peut l'appliquer à des modèles de diagnostic basés sur la conservation de la masse. Dès que l'on a déterminé le champ du vent, on peut s'en servir pour calculer le transport et le brassage turbulent du polluant émis. On peut utiliser pour ce faire le modèle lagrangien ou eulérien de dispersion.

Des études plus détaillées — concernant les rejets accidentels, par exemple — ne peuvent être réalisées qu'à l'aide de modèles de circulation et de dispersion non hydrostatiques, et non par un modèle diagnostique. Comme ce travail exige en général un ordinateur puissant, il est recommandé d'utiliser la méthode pour les conditions les plus défavorables décrites ci-dessus avant la modélisation statistique complète.

## LA SURVEILLANCE DE LA QUALITÉ DE L'AIR

*Hans-Ulrich Pfeffer et Peter Bruckmann*

La surveillance de la qualité de l'air consiste à mesurer systématiquement les polluants de l'air ambiant pour pouvoir déterminer l'exposition des récepteurs vulnérables (populations, animaux, végétaux et ouvrages d'art, par exemple) sur la base des normes et directives découlant des effets observés et identifier la source de la pollution atmosphérique (analyse causale).

Les concentrations de polluants dans l'air ambiant sont influencées par la variation dans l'espace ou dans le temps des émissions de substances dangereuses et par la dynamique de leur dispersion dans l'air. On observe donc des variations journalières et annuelles marquées des concentrations. Il est pratiquement impossible de déterminer de façon unifiée toutes ces variations de la qualité de l'air (en langage statistique, la population des états de qualité de l'air). Les mesurages des concentrations de polluants dans l'air ambiant ont donc toujours le caractère d'échantillons aléatoires dans l'espace ou dans le temps.

### La planification des mesurages

Pour planifier les mesurages, la première chose à faire est de formuler l'objectif avec autant de précision que possible. Dans la surveillance de la qualité de l'air, les questions et domaines d'activité importants sont:

Les mesurages à référence spatiale:

- détermination représentative de l'exposition dans une zone (surveillance générale de l'air);
- mesurage représentatif de la pollution préexistante dans la zone où l'on prévoit d'implanter une installation (autorisation, TA Luft [instruction technique, air]);
- alertes au smog (smog d'hiver, concentrations élevées d'ozone);
- mesurages aux points chauds de pollution atmosphérique pour estimer l'exposition maximale des récepteurs (directive UE-NO<sub>2</sub>, mesurage dans les couloirs de rue urbains, conformément à la loi antipollution de la République fédérale d'Allemagne);
- vérification des résultats des mesures de réduction de la pollution et des tendances dans le temps;

- mesurages de présélection;
- investigations scientifiques — par exemple, le transport des polluants atmosphériques, les transformations chimiques, l'étalement des calculs de dispersion.

Les mesurages aux installations:

- mesurages faits suite à des plaintes;
- détermination des sources des émissions, analyse causale;
- mesurages en cas d'incendie ou de rejets accidentels;
- vérification du succès des mesures de réduction de la pollution;
- surveillance des fuites et émissions fugaces de l'usine.

La planification a pour but d'utiliser correctement les procédures de mesure et d'évaluation pour répondre à des questions spécifiques avec une certitude suffisante et à un prix aussi faible que possible.

On trouvera au tableau 55.2 un exemple des paramètres à utiliser pour planifier les mesurages dans le cas d'une évaluation de la pollution de l'air à réaliser dans la zone où l'on prévoit d'implanter une installation industrielle. Sachant que les exigences officielles varient selon les pays, il convient de noter qu'il s'agit ici des procédures allemandes d'autorisation.

Le tableau 55.2 expose le cas d'un réseau de mesure qui est censé surveiller de façon aussi représentative que possible la qualité de l'air dans une zone déterminée pour la comparer aux limites fixées. Cette méthode repose sur l'idée que l'on choisit au hasard les sites de mesure de manière à prendre en compte la variabilité des emplacements situés dans une zone où la qualité de l'air est variable (espaces habitables, rues, zones industrielles, parcs, centres urbains, banlieues). Dans des zones étendues, cette méthode peut se révéler très coûteuse en raison du nombre de sites de mesure requis.

On peut concevoir autrement le réseau de mesure et commencer par des sites choisis de façon à être représentatifs. Si l'on connaît la variabilité de la qualité de l'air aux emplacements les plus importants et si l'on sait pendant combien de temps les objets protégés restent dans ces «microenvironnements», on peut alors déterminer l'exposition. Cette méthode peut être étendue à d'autres «microenvironnements» (pièces à l'intérieur des bâtiments, voitures, par exemple) pour estimer l'exposition totale. Le choix des sites de mesure sera facilité par la modélisation de la diffusion ou les mesures de présélection.

Une troisième méthode consiste à faire les mesurages là où l'on pense que l'exposition est la plus élevée (par exemple, dans les couloirs de rue urbains pour le NO<sub>2</sub> et le benzène). Si cet emplacement répond aux normes d'évaluation, il existe une probabilité suffisante pour qu'il en soit de même pour tous les autres. En se focalisant sur les points critiques, cette méthode exige relativement peu d'emplacements d'échantillonnage, mais ceux-ci doivent être choisis avec un soin particulier. En effet, on risque de surestimer l'exposition réelle.

Les paramètres de la période de mesure, de l'évaluation des données obtenues et de la fréquence des mesurages sont donnés en grande partie dans la définition des normes (limites) d'évaluation et des intervalles de confiance désirés pour les résultats. Les valeurs limites admissibles sont liées aux conditions périphériques dont il faut tenir compte dans la planification des mesurages. Grâce à des procédures de mesure en continu, on peut obtenir une densité qui ne laisse pratiquement aucun intervalle de temps entre les mesurages. Cette finesse n'est toutefois nécessaire que pour la surveillance des valeurs de pointe et pour les alertes au smog; pour le suivi des moyennes annuelles, par exemple, des mesurages en discontinu suffisent.

Les possibilités offertes par les procédures de mesure et de contrôle de qualité en tant qu'autre paramètre important de la planification sont décrites ci-après.

Tableau 55.2 • Paramètres applicables au mesurage des concentrations de polluants dans l'air ambiant (avec un exemple d'application)

Paramètre	Exemple d'application: procédure d'autorisation pour les installations industrielles en Allemagne
Exposé de la question	Mesurage de la pollution préalablement à la procédure d'autorisation; mesurage d'échantillons représentatifs prélevés au hasard
Zone de mesure	Cercle tracé autour de l'emplacement, d'un rayon égal à trente fois la hauteur réelle de la cheminée (simplifiée)
Normes d'évaluation (selon le lieu et le temps): valeurs caractéristiques à tirer des mesurages	Valeurs seuils IW1 (moyenne arithmétique) et IW2 (98 <sup>e</sup> percentile) de TA Luft [instruction technique, air]; calcul de I1 (moyenne arithmétique) et de I2 (98 <sup>e</sup> percentile) à l'aide des mesurages rapportés à 1 km <sup>2</sup> (surface de l'évaluation) à comparer à IW1 et IW2
Classement, choix et densité des sites de mesure	Quadrillage régulier de 1 km <sup>2</sup> , donnant le choix au hasard des sites de mesurages
Période de mesure	1 an, au moins 6 mois
Hauteur de mesure	1,5 à 4 m au-dessus du sol
Fréquence des mesurages	52 (104) mesurages par zone d'évaluation pour les polluants gazeux, selon la hauteur de la pollution
Durée de chaque mesure	1 demi-heure pour les polluants gazeux, 24 heures pour les poussières en suspension, 1 mois pour la précipitation des poussières
Date du mesurage	Choix au hasard
Objet mesuré	Pollution de l'air émise par l'installation planifiée
Procédure de mesure	Procédure nationale standard de mesure (directives VDI)
Certitude requise des résultats des mesurages	Elevée
Exigences de qualité, contrôle de qualité, étalonnage, entretien	Directives VDI
Enregistrement des données de mesure, validation, archivage, évaluation	Calcul des valeurs I1V et I2V pour chaque zone d'évaluation
Coûts	Variés selon la zone de mesure et les objectifs

### L'assurance qualité

Il peut être coûteux de mesurer les concentrations de polluants dans l'air ambiant, et les résultats obtenus peuvent influencer sur des décisions importantes qui peuvent avoir de graves conséquences économiques et écologiques. Les mesures de l'assurance qualité font donc partie intégrante du processus. Deux domaines sont à distinguer ici.

#### Les dispositions concernant la procédure

Toute procédure complète de mesure comprend plusieurs étapes: échantillonnage, préparation et nettoyage de l'échantillon,

séparation et détection (étape analytique finale), puis collecte et évaluation des données. Dans quelques cas, spécialement pour le mesurage en continu de gaz inorganiques, certaines étapes peuvent être omises (la séparation, par exemple). Lors des mesurages, il faut se conformer le plus possible aux procédures. Il faut que celles-ci soient normalisées et, par conséquent, entièrement documentées, sous la forme des normes DIN/ISO, des normes CEN ou des directives VDI.

#### **Les dispositions concernant l'utilisateur**

Il ne suffit pas d'utiliser un matériel et des procédures normalisés et éprouvés dans le mesurage des concentrations de polluants dans l'air ambiant pour obtenir un résultat acceptable; encore faut-il que l'utilisateur emploie des méthodes appropriées de contrôle de qualité. Les normes DIN/EN/ISO 9000 (normes de gestion de la qualité et d'assurance qualité), EN 45000 (qui définit les conditions à remplir par les laboratoires d'essai) et le guide ISO 25 (conditions générales de compétence des laboratoires d'étalonnage et d'essai) jouent un rôle important dans les dispositions que doit prendre l'utilisateur pour s'assurer de la qualité.

Les principales dispositions consistent à:

- accepter les méthodes prescrites et les mettre en œuvre selon les bonnes pratiques de laboratoire;
- entretenir correctement le matériel de mesurage, prendre les précautions voulues pour éliminer les perturbations et assurer les réparations;
- procéder aux étalonnages et aux vérifications régulières pour garantir un bon fonctionnement;
- procéder aux essais interlaboratoires.

### **Les procédures de mesurage**

#### **Les procédures de mesurage pour les gaz inorganiques**

Il existe un grand nombre de méthodes de mesurage pour une large gamme de gaz inorganiques. Nous examinerons séparément les méthodes manuelles et les procédures automatisées.

#### **Les méthodes manuelles**

Dans le cas des méthodes manuelles dont on se sert pour les gaz inorganiques, la substance à mesurer est habituellement absorbée lors de l'échantillonnage dans une solution ou une matière solide. Dans la plupart des cas, on fait un dosage photométrique après une réaction colorante appropriée. Plusieurs méthodes manuelles de mesurage ont une importance spéciale en tant que pratiques de référence. Etant donné que leur coût en personnel est relativement élevé, elles ne sont que rarement appliquées aujourd'hui pour les mesurages sur le terrain, car des procédures automatisées existent. Les méthodes manuelles les plus importantes sont brièvement exposées au tableau 55.3.

Une variante spéciale des prélèvements, utilisée principalement en liaison avec les méthodes manuelles, est celle du tube de séparation par diffusion (le «dénudeur»). La technique du dénudeur vise à séparer les phases gazeuses des phases particulières en se fondant sur leurs taux différents de diffusion. Cette technique est utilisée souvent pour les problèmes difficiles de séparation, par exemple: ammoniac et composés de l'ammonium; oxydes d'azote, acide nitrique et nitrates; oxydes de soufre, acide sulfurique et sulfates; ou halogénures d'hydrogène/halogénures. Dans la méthode classique du dénudeur, l'air à analyser est aspiré à travers un tube de verre possédant un revêtement spécial, selon la ou les matières à recueillir. Cette technique a été perfectionnée en un grand nombre de variantes et a aussi été partiellement automatisée. Elle a fortement élargi les possibilités de l'échantillonnage différencié, mais elle peut être très laborieuse, selon la variante, et il faut une grande expérience pour l'utiliser convenablement.

#### **Les procédures automatisées**

Il existe sur le marché un grand nombre d'appareils de mesurage en continu pour le dioxyde de soufre, les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone et l'ozone. La plupart d'entre eux sont employés en particulier dans les réseaux de mesurage. Les caractéristiques les plus importantes de chacune des méthodes sont résumées au tableau 55.4.

Il faut souligner que toutes les procédures automatisées reposant sur des principes physico-chimiques doivent être étalonnées à l'aide des procédures de référence (manuelles). Etant donné que le matériel automatique des réseaux de mesurage fonctionne souvent pendant de longues périodes (plusieurs semaines, par exemple) sans supervision humaine directe, il est indispensable de contrôler régulièrement et automatiquement son bon fonctionnement. On le fait généralement au moyen de gaz témoins et de gaz d'essai qui peuvent être produits par plusieurs méthodes (préparation de l'air ambiant, bouteilles de gaz sous pression, imprégnation, diffusion, dilution statique et dynamique).

#### **Les procédures de mesurage des polluants atmosphériques particulaires et de leur composition**

Parmi les polluants atmosphériques particuliers, on distingue les retombées de poussières et les particules en suspension (Suspended Particulate Matter (SPM)). Les retombées de poussières sont des particules plus grandes, qui tombent au sol en raison de leur taille et de leur masse volumique. Les SPM comprennent la fraction des particules qui est dispersée dans l'atmosphère de manière quasi stable et quasi homogène et qui y reste donc en suspension pendant un certain temps.

#### **Le mesurage des particules en suspension et des composés métalliques dans les SPM**

Tout comme dans le cas des polluants atmosphériques gazeux, on peut différencier pour les SPM les procédures de mesurage continu ou discontinu. En règle générale, les SPM sont d'abord séparées sur des filtres à fibres de verre ou à membrane. On procède ensuite à un dosage gravimétrique ou radiométrique. Selon l'échantillonnage, on peut distinguer deux procédures de mesurage de la quantité totale de SPM: l'une sans fractionnement en fonction de la dimension des particules, et l'autre avec fractionnement pour mesurer les poussières fines.

Les avantages et les inconvénients des mesurages fractionnés de poussières en suspension font l'objet d'un débat international. En Allemagne, par exemple, toutes les valeurs seuils et les normes d'évaluation sont fondées sur la totalité des particules en suspension. Cela signifie que, la plupart du temps, on mesure uniquement le total des SPM. Aux États-Unis, en revanche, on utilise très couramment la procédure PM-10 (Particulate Matter (PM)) ( $\leq 10 \mu\text{m}$ ). Selon cette méthode, seules sont retenues les particules d'un diamètre aérodynamique maximal de  $10 \mu\text{m}$  (proportion d'inclusion de 50%), qui sont inhalables et peuvent donc entrer dans les poumons. Il est prévu d'introduire la procédure PM-10 dans l'Union européenne en tant que référence. Le coût des mesurages fractionnés de SPM est nettement plus élevé que celui du mesurage des poussières totales en suspension, étant donné que les appareils doivent être équipés d'éléments sensibles spéciaux de construction coûteuse et qui exigent un entretien onéreux. On trouvera au tableau 55.5 des précisions sur les procédures les plus importantes de mesurage des SPM.

On a mis au point des changeurs automatiques qui contiennent un grand nombre de filtres et les connectent automatiquement à l'échantillonneur, l'un après l'autre, à intervalle fixe. Les filtres exposés sont entreposés dans un magasin. Les seuils de détection pour les procédures à filtre sont généralement compris entre 5 et  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Tableau 55.3 • Méthodes manuelles de mesurage des gaz inorganiques

Matière	Méthode	Exécution	Commentaires
SO <sub>2</sub>	Méthode TCM	Absorption dans une solution de tétrachloromercurate (flacon laveur); réaction avec le formaldéhyde et la pararosaniline pour donner l'acide sulphonique rouge-violet; dosage photométrique	UE = procédure de mesurage de référence; DL = 0,2 µg SO <sub>2</sub> ; s = 0,03 mg/m <sup>3</sup> à 0,5 mg/m <sup>3</sup>
SO <sub>2</sub>	Méthode au gel de silice	Elimination des substances gênantes à l'aide de H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> concentré; adsorption sur gel de silice; désorption thermique dans un flux de H <sub>2</sub> et réduction à H <sub>2</sub> S; réaction au bleu de molybdène; dosage photométrique	DL = 0,3 µg SO <sub>2</sub> ; s = 0,03 mg/m <sup>3</sup> à 0,5 mg/m <sup>3</sup>
NO <sub>2</sub>	Méthode de Saltzman	Absorption dans une solution réactive tout en formant un colorant azoïque rouge (flacon laveur); dosage photométrique	Etalonnage au nitrate de sodium; DL = 3 µg/m <sup>3</sup>
O <sub>3</sub>	Méthode à l'iodure de potassium	Formation d'iodure à partir d'une solution aqueuse d'iodure de potassium (flacon laveur); dosage photométrique	DL = 20 µg/m <sup>3</sup> ; rel. s = ± 3,5% à 390 µg/m <sup>3</sup>
F <sup>-</sup>	Méthode aux grains d'argent; variante 1	Prélèvement avec un préséparateur de poussière; enrichissement de F <sup>-</sup> sur des grains d'argent enrobés de carbonate de sodium; élution et mesurage à l'aide d'une chaîne d'électrodes au fluorure de lanthane à ions sensibles	Inclusion d'une portion indéterminée d'immissions de fluorure en particules
F <sup>-</sup>	Méthode aux grains d'argent; variante 2	Prélèvement à l'aide d'un filtre à membrane chauffé; enrichissement de F <sup>-</sup> sur des grains d'argent enrobés de carbonate de sodium; dosage par la méthode électrochimique (variante 1) ou photométrique (alizarine-complexone)	Risques de trouver des valeurs inférieures à cause de la sorption partielle des immissions de fluorure gazeux sur le filtre à membrane; DL = 0,5 µg/m <sup>3</sup>
Cl <sup>-</sup>	Méthode au rhodanure de mercure	Absorption dans une solution d'hydroxyde de sodium 0,1 N (flacon laveur); réaction au rhodanure de mercure et aux ions de Fe(III) pour former un complexe de fer thiocyanate; dosage photométrique	DL = 9 µg/m <sup>3</sup>
Cl <sub>2</sub>	Méthode au méthyle-orange	Réaction de blanchiment avec une solution de méthyle-orange (flacon laveur); dosage photométrique	DL = 0,015 µg/m <sup>3</sup>
NH <sub>3</sub>	Méthode à l'indophénol	Absorption dans H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> dilué (appareil à impact/flacon laveur); conversion avec du phénol et de l'hypochlorure en teinture d'indophénol; dosage photométrique	DL = 3 µg/m <sup>3</sup> (appareil à impact); inclusion partielle de NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> - composés et amines
NH <sub>3</sub>	Méthode de Nessler	Absorption dans H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> dilué (appareil à impact/flacon laveur); distillation et réaction aux réactifs de Nessler, dosage photométrique	DL = 2,5 µg/m <sup>3</sup> (appareil à impact); inclusion partielle de NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> - composés et amines
H <sub>2</sub> S	Méthode au bleu de molybdène	Absorption comme sulfure d'argent sur des perles de verre traitées au sulfate d'argent et au sulfate d'hydrogène potassium (tube de sorption); libéré sous forme de sulfure d'hydrogène et conversion en bleu de molybdène; dosage photométrique	DL = 0,4 µg/m <sup>3</sup>
H <sub>2</sub> S	Méthode au bleu de méthylène	Absorption dans une suspension d'hydroxyde de cadmium avec formation de CdS; conversion en bleu de méthylène; dosage photométrique	DL = 0,3 µg/m <sup>3</sup>

DL = seuil de détection; s = écart-type; rel. s = écart-type relatif.

Enfin, il faut signaler la procédure à la fumée noire pour la mesure des SPM. Originaires de Grande-Bretagne, elle a été incorporée dans les directives de l'Union européenne pour le SO<sub>2</sub> et les poussières en suspension. Avec cette méthode, on mesure le noircissement du filtre avec un photomètre réfléxi après l'échantillonnage. Les valeurs de fumée noire ainsi obtenues par photométrie sont converties en unités gravimétriques (µg/m<sup>3</sup>) à l'aide d'une courbe d'étalonnage. Comme cet étalonnage dépend dans une large mesure de la composition de la poussière, spécialement de sa teneur en suie, la conversion en unités gravimétriques est problématique.

Aujourd'hui, les composés métalliques sont souvent dosés d'office dans les échantillons d'immissions de poussières en suspension. En général, la collecte des poussières en suspension sur les filtres est suivie d'une dissolution chimique des poussières retenues, étant donné que les étapes finales les plus courantes de

l'analyse présupposent la conversion des composés métalliques et métalloïdes dans une solution aqueuse. En pratique, les méthodes de loin les plus importantes sont la spectroscopie à absorption atomique (AAS) et la spectroscopie d'émission optique à plasma inductif (ICP-OES). Les autres procédures de dosage des composés métalliques dans les poussières en suspension sont l'analyse par fluorescence X, la polarographie et l'analyse par activation des neutrons. Bien que l'on mesure depuis maintenant plus de 10 ans les composés métalliques en tant que composants des SPM dans l'air à l'extérieur sur certains sites de mesurage, d'importantes questions n'ont pas encore trouvé de réponse. L'échantillonnage classique effectué par séparation des poussières en suspension sur les filtres suppose que la séparation des composés de métaux lourds sur le filtre soit complète. Or, on trouve des indications plus anciennes qui en font douter. En tout état de cause, les résultats sont très hétérogènes.

Tableau 55.4 • Procédures automatisées de mesure des gaz inorganiques

Matière	Principe de mesure	Commentaires
SO <sub>2</sub>	Réaction par conductométrie de SO <sub>2</sub> avec H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> en H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> dilué; mesurage de la conductivité accrue	Exclusion des interférences avec un filtre sélectif (KHSO <sub>4</sub> /AgNO <sub>3</sub> )
SO <sub>2</sub>	Fluorescence UV; excitation des molécules de SO <sub>2</sub> par rayons UV (190-230 nm); mesurage du rayonnement de fluorescence	Il faut éliminer les interférences (par exemple, les hydrocarbures) par filtration
NO/NO <sub>2</sub>	Chimiluminescence; réaction de NO avec O <sub>3</sub> en NO <sub>2</sub> ; détection du rayonnement de chimiluminescence avec photomultiplicateur	NO <sub>2</sub> n'est mesurable qu'indirectement; emploi de convertisseurs pour réduire NO <sub>2</sub> en NO; mesurage de NO et NO <sub>x</sub> (= NO + NO <sub>2</sub> ) dans des canaux séparés
CO	Absorption infrarouge non dispersive; mesurage de l'absorption IR avec un détecteur spécifique par rapport à la cellule de référence	Référence: a) cellule avec N <sub>2</sub> ; b) air ambiant après élimination de CO; c) élimination optique de l'absorption de CO (corrélation gaz/filtre)
O <sub>3</sub>	Absorption UV; lampe Hg à basse pression comme source de rayonnement (253,7 nm); enregistrement de l'absorption UV conformément à la loi de Lambert-Beer; détecteur: photodiode à vide, valve photosensible	Référence: air ambiant après élimination de l'ozone (par exemple, Cu/MnO <sub>2</sub> )
O <sub>3</sub>	Chimiluminescence; réaction de O <sub>3</sub> avec l'éthylène en formaldéhyde; détection du rayonnement de chimiluminescence avec photomultiplicateur	Bonne sélectivité; l'éthylène est nécessaire comme gaz réactif

Un autre problème tient au fait que l'on ne peut distinguer les différentes formes de composés métalliques, ou les composés simples des divers éléments, dans l'analyse réalisée à l'aide des procédures classiques de mesure. Si, dans de nombreux cas, on peut faire des dosages totaux adéquats, il serait souhaitable de procéder à une différenciation plus poussée pour certains métaux particulièrement cancérigènes (As, Cd, Cr, Ni, Co, Be). Il y a souvent de grandes différences dans les effets cancérigènes des éléments et de leurs composés (par exemple, composés du chrome dans les niveaux d'oxydation III et VI — seuls ceux du niveau VI sont cancérigènes). En pareil cas, il serait souhaitable de mesurer séparément les divers composés (analyse par substance). En dépit de l'importance de ce problème, on commence seulement à faire l'analyse par substance dans la technique de mesure.

#### Le mesurage des particules en suspension et des composés métalliques dans les SPM

Il existe deux méthodes fondamentalement différentes pour recueillir les retombées de poussières:

- prélèvement dans des récipients de collecte;
- prélèvement sur des surfaces adhésives.

Une méthode répandue de mesure des retombées de poussières (dépôt de poussières) est la procédure Bergerhoff. Elle consiste

à recueillir la totalité des précipitations atmosphériques (dépôts secs et humides) pendant  $30 \pm 2$  jours dans des récipients à environ 1,5 à 2 m au-dessus du sol (dépôt brut). Les récipients de collecte sont ensuite transportés au laboratoire et préparés (filtrage, évaporation de l'eau, séchage, pesée). Le résultat est calculé

Tableau 55.5 • Procédures les plus importantes de mesure pour les particules en suspension (SPM)

Procédure	Principe de mesure	Commentaires
Appareil à petits filtres	Prélèvements non fractionnés; débit d'air 2,7-2,8 m <sup>3</sup> /h; diamètre du filtre 50 mm; analyse gravimétrique	Maniement facile; horloge de commande; appareil fonctionnant avec préséparateur PM-10
Appareil LIB	Prélèvements non fractionnés; débit d'air 15-16 m <sup>3</sup> /h; diamètre du filtre 120 mm; analyse gravimétrique	Séparation de grandes quantités de poussière; avantageux pour l'analyse des composants de la poussière; horloge de commande
Echantillonneur à grand volume	Inclusion de particules atteignant jusqu'à 30 µm de diamètre environ; débit d'air de 100 m <sup>3</sup> /h environ; diamètre du filtre 257 mm; analyse gravimétrique	Séparation de grandes quantités de poussière, avantageux pour l'analyse des composants de la poussière; niveau de bruit relativement élevé
FH 62 I	Appareil de mesure radio-métrique en continu; prélèvements non fractionnés; débit d'air 1 ou 3 m <sup>3</sup> /h; relevé de la masse de poussières retenue sur un dispositif de filtrage en mesurant l'atténuation du rayonnement β (krypton 85) lors du passage à travers un filtre exposé (chambre d'ionisation)	Étalonnage gravimétrique par exposition de filtres isolés à la poussière; l'appareil fonctionne aussi avec un préséparateur PM-10
Mesureur de poussières BETA F 703	Appareil de mesure radio-métrique en continu des poussières; prélèvements non fractionnés; débit d'air 3 m <sup>3</sup> /h; relevé de la masse de poussières retenue sur un dispositif de filtrage en mesurant l'atténuation du rayonnement β (carbone 14) lors du passage à travers un filtre exposé (tube compteur Geiger Müller)	Étalonnage gravimétrique par exposition de filtres isolés à la poussière; l'appareil fonctionne aussi avec un préséparateur PM-10
TEOM 1400	Appareil de mesure de la poussière en continu; prélèvements non fractionnés; débit d'air 1 m <sup>3</sup> /h; poussière recueillie sur un filtre qui fait partie d'un système vibrant auto-résonant, dans un courant latéral (3 l/min); relevé de la diminution de la fréquence par l'accroissement des dépôts de poussière sur le filtre	Le rapport entre la diminution de la fréquence et la masse de la poussière doit être déterminé par étalonnage

sur la base de la surface du récipient de collecte et de la durée d'exposition en grammes par m<sup>2</sup> et par jour (g/m<sup>2</sup>j). Le seuil relatif de détection est de 0,035 g/m<sup>2</sup>j.

Parmi les autres procédures de collecte des retombées, on peut citer le système Liesegang-Löbner et les méthodes qui recueillent la poussière déposée sur des feuilles adhésives.

Tous les résultats des mesurages des retombées de poussière sont des valeurs relatives qui dépendent de l'appareil utilisé, étant donné que la séparation est fonction des conditions d'écoulement au voisinage du dispositif mais aussi d'autres paramètres. Les écarts entre les valeurs obtenues avec les différentes procédures peuvent atteindre 50%.

La composition de la poussière déposée a également son importance, notamment les teneurs en plomb, en cadmium et en autres composés métalliques. Les procédures d'analyse utilisées sont fondamentalement les mêmes que pour la poussière en suspension.

### Le mesurage des matières spéciales sous forme de poussières

Les matières spéciales sous forme de poussières sont notamment l'amiante et la suie. Il est important de recueillir les fibres en tant que polluants atmosphériques, car l'amiante est classé comme cancérigène avéré. Les fibres d'un diamètre  $D \leq 3 \mu\text{m}$  et d'une longueur  $L \geq 5 \mu\text{m}$ , avec  $L:D \geq 3$ , sont considérées comme cancérigènes. Les procédures de mesurage des matières fibreuses consistent à compter, sous le microscope, les fibres qui ont été retenues sur des filtres. Seules les méthodes faisant appel à des microscopes électroniques peuvent être envisagées dans le cas de l'air extérieur. Les fibres sont séparées sur des filtres poreux revêtus d'or. Avant d'être évalué dans un microscope électronique à balayage, l'échantillon est libéré des substances organiques par incinération par torche à plasma directement sur le filtre. Les fibres sont comptées sur une partie de la surface du filtre choisie au hasard et sont classées d'après leur géométrie et leur type. À l'aide d'une analyse par rayons X à dispersion d'énergie (EDXA), les fibres d'amiante, celles de sulfate de calcium et d'autres fibres inorganiques peuvent être différenciées sur la base de leur composition en éléments. Toute cette procédure est extrêmement coûteuse et exige le plus grand soin pour donner des résultats fiables.

La suie sous forme de particules émises par les moteurs diesel doit être prise en considération, étant donné qu'elle a également été classée parmi les matières cancérigènes. En raison de sa composition changeante et complexe et du fait que plusieurs de ses composants sont également émis par d'autres sources, il n'existe pas de procédure de mesurage propre à la suie du diesel. Néanmoins, si l'on veut une indication concrète sur les concentrations dans l'air ambiant, la suie est définie classiquement comme un carbone élémentaire, faisant partie du carbone total. Elle est mesurée après prélèvement et une étape d'extraction et de désorption thermique. On détermine ensuite la teneur en carbone par combustion dans un flux d'oxygène et par titrage coulométrique ou détection IR non dispersive du dioxyde de carbone formé lors de ce processus.

En principe, pour la suie, on utilise aussi l'æthalomètre et la sonde photoélectrique de mesurage des concentrations en aérosols.

### Le mesurage des dépôts humides

Avec les dépôts secs, les dépôts humides dans la pluie, la neige, le brouillard et la rosée constituent les modes les plus importants de pénétration des matières nocives en provenance de l'air dans le sol, l'eau ou les végétaux.

Pour distinguer clairement les dépôts humides dans la pluie et la neige (brouillard et rosée soulèvent des problèmes spéciaux) du dépôt total (dépôt brut, voir ci-dessus «Le mesurage des particules en suspension et des composés métalliques dans les SPM») et des

Tableau 55.6 • Procédures de mesurage à longue distance

Procédure	Application	Avantages, inconvénients
Spectroscopie à infrarouge transformée de Fourier (FTIR)	Gamme spectrale IR (environ 700-3 000 cm <sup>-1</sup> ), trajectoire lumineuse de plusieurs centaines de mètres. Observe les sources diffuses de surface; mesure les différents composés organiques	+ Système à multicomposants + LD: quelques ppb - Coûteux
Spectroscopie d'absorption optique différentielle (DOAS)	Trajectoire lumineuse jusqu'à plusieurs km. Mesure SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , benzène, HNO <sub>3</sub> ; observe les sources alignées et de surface; utilisée dans les réseaux de mesurage	+ Facile à manier + Essai de fonctionnement réussi + Système multicomposants - LD: élevée par mauvaise visibilité (brouillard, par exemple)
Spectroscopie d'absorption laser à longue distance (TDLAS)	Zone de recherche, dans les cuvettes à basse pression pour OH <sup>-</sup>	+ Sensibilité élevée (à ppt) + Mesure les composés à l'état de traces instables - Coût élevé - Difficile à manier
Absorption différentielle LIDAR (DIAL)	Observe les sources de surface; mesure des émissions concernant une grande superficie	+ Mesure la distribution spatiale + Mesure les endroits inaccessibles (traînés de gaz de fumée) - Coûteux - Spectre limité de composants (SO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> )

LIDAR (Light Detection and Ranging) = Détection et spectre de la lumière; DIAL (Differential Absorption LIDAR) = Absorption différentielle LIDAR.

dépôts secs, on se sert pour les prélèvements de collecteurs de précipitations dont l'ouverture est couverte lorsqu'il ne pleut pas (échantillonneur réservé aux matières humides). Dans ces appareils, qui fonctionnent généralement selon le principe des variations de conductivité, le couvercle s'ouvre lorsqu'il commence à pleuvoir et se referme lorsque la pluie cesse.

Les échantillons sont transférés par un entonnoir (surface à l'air libre d'environ 500 cm<sup>2</sup> ou davantage) dans un récipient obscurci et, si possible, isolé (en verre ou en polyéthylène pour les composants inorganiques exclusivement).

En général, on peut analyser l'eau recueillie pour en connaître les composants inorganiques sans préparer l'échantillon. L'eau doit être centrifugée ou filtrée si elle est visiblement trouble. La conductivité, le pH et les anions (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>) et cations (Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, etc.) importants sont mesurés de façon systématique. Les composés instables à l'état de traces et les états intermédiaires comme H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ou HSO<sub>3</sub><sup>-</sup> sont également mesurés à des fins de recherche.

Pour l'analyse, les procédures suivies sont celles dont on dispose en général pour les solutions aqueuses, comme la conductométrie pour la conductivité, les électrodes pour les valeurs du pH, la spectroscopie par adsorption atomique pour les cations (voir ci-dessus «Le mesurage des matières spéciales sous forme de poussières») et, de plus en plus, la chromatographie à échange d'ions avec la détection par conductivité pour les anions.

Les composés organiques sont extraits de l'eau de pluie à l'aide, par exemple, du dichlorométhane, ou en sont aspirés avec de

l'argon et adsorbés avec des tubes Tenax (seulement pour les matières très volatiles). Les matières sont ensuite soumises à une analyse chromatographique en phase gazeuse (voir ci-après «Les procédures de mesurage des polluants atmosphériques organiques»).

Les dépôts secs sont directement fonction des concentrations dans l'air ambiant. Les différences de concentration des matières nocives transportées par l'air dans la pluie sont cependant relativement faibles, de sorte que, pour mesurer les dépôts secs, on peut se servir de réseaux à maillage large. A titre d'exemple, on peut citer le réseau de mesurage EMEP en Europe, formé d'environ 90 stations qui recueillent les données concernant les ions de sulfate et de nitrate, certains cations et le pH des précipitations. Il existe aussi de vastes réseaux de mesurage en Amérique du Nord.

### Les procédures de mesurage optique à longue distance

Alors que les méthodes décrites jusqu'à présent ne prélèvent la pollution de l'air qu'à un seul point, les procédures de mesurage optique à longue distance le font de manière intégrée sur des trajectoires de lumière de plusieurs kilomètres ou en déterminent la distribution spatiale. Elles utilisent les caractéristiques d'absorption des gaz dans l'atmosphère dans la gamme spectrale UV, visible ou IR et reposent sur la loi de Lambert-Beer, selon laquelle le produit de la trajectoire de la lumière et de la concentration est proportionnel à l'extinction mesurée. En changeant la longueur d'onde de l'émetteur et du récepteur de l'installation de mesurage, plusieurs composants peuvent être mesurés parallèlement ou successivement avec un seul dispositif.

Les systèmes indiqués au tableau 55.6 sont les plus employés dans la pratique.

### Les procédures de mesurage des polluants atmosphériques organiques

Le mesurage de la pollution atmosphérique contenant des composants organiques est compliqué principalement par l'éventail des matières entrant dans cette catégorie. On trouve plusieurs centaines de composants aux caractéristiques toxicologiques, chimiques et physiques très différentes sous le titre général de «polluants atmosphériques organiques» dans les registres des émissions et les plans de qualité de l'air des zones surpeuplées.

En raison principalement des grandes différences d'impact potentiel, la collecte des divers composants pertinents a de plus en plus remplacé les procédures par sommation que l'on utilisait précédemment (par exemple, détecteur à ionisation de flamme (DIF), procédure du carbone total), dont les résultats ne peuvent pas être évalués sur le plan toxicologique. La méthode DIF a cependant conservé une certaine importance en liaison avec une courte colonne séparatrice pour isoler le méthane, qui n'est pas très réactif photochimiquement, et comme moyen de recueillir les composés organiques volatils précurseurs (COV) pour la formation de photo-oxydants.

La nécessité fréquente de séparer les mélanges complexes des composés organiques en leurs différents composants fait de leur mesurage un travail qui relève pratiquement de la chromatographie appliquée. Les procédures chromatographiques sont les méthodes de choix lorsque les composés organiques sont suffisamment stables, thermiquement et chimiquement. Pour les matières organiques comportant des groupes fonctionnels réactifs, on continue d'utiliser des procédures distinctes qui font appel aux caractéristiques physiques de ces groupes fonctionnels ou à des réactions chimiques qui les détectent.

A titre d'exemple, on citera l'utilisation d'amines pour convertir les aldéhydes en hydrazones, suivie de la mesure photométrique, la dérivation avec la 2,4-dinitrophénylhydrazine et la séparation

de la 2,4-hydrazone qui s'est formée, ou la formation de colorants azoïques avec la *p*-nitroaniline pour déceler les phénols et crésols.

Parmi les procédures chromatographiques, la chromatographie en phase gazeuse (CPG) et la chromatographie en phase liquide à haute performance (CLHP) sont les plus fréquemment employées pour séparer les mélanges souvent complexes. Pour la chromatographie en phase gazeuse, on emploie presque exclusivement de nos jours des colonnes séparatrices d'un diamètre très étroit (environ 0,2 à 0,3 mm et d'une longueur de 30 à 100 m environ), appelées colonnes capillaires à haut pouvoir de résolution (CCHR). Il existe une série de détecteurs pour trouver les différents composants après la colonne de séparation, comme le DIF cité plus haut, le DCE (détecteur à capture d'électrons) (en particulier pour les substitués électrophiles comme l'halogène), le PID (détecteur à ionisation photoélectrique) particulièrement sensible aux hydrocarbures aromatiques et autres systèmes par  $\pi$ -électrons et le DTI, détecteur thermoionique spécialement conçu pour les composés azotés et phosphorés. La CLHP utilise des détecteurs spéciaux à flux continu qui sont conçus, par exemple, pour la cuvette à flux continu d'un spectromètre UV.

Il est particulièrement efficace, mais aussi fort coûteux, d'employer un spectromètre de masse comme détecteur. En fait, certaines identifications, surtout pour les mélanges inconnus de composés, ne sont souvent possibles que par le spectre de masse du composé organique. L'information qualitative du temps de rétention (temps pendant lequel la matière reste dans la colonne contenue dans le chromatogramme avec les détecteurs classiques) est complétée à l'aide de la détection spécifique de chaque composant par les fragmentogrammes de masse à haute sensibilité de détection.

La procédure d'échantillonnage doit être établie avant l'analyse proprement dite. Le choix de la méthode de prélèvement est déterminé principalement par la volatilité, mais aussi par la gamme de concentrations attendue, la polarité et la stabilité chimique. En outre, pour les composés non volatils, il faut choisir entre les mesures de concentration et les mesures de dépôt.

Le tableau 55.7 donne un aperçu des procédures courantes de surveillance continue de l'air pour l'analyse chromatographique des composés organiques, avec des exemples d'application.

Le mesurage des dépôts de composés organiques de faible volatilité (par exemple, dibenzodioxines et dibenzofurannes (PCDD/PCDF), hydrocarbures polycycliques aromatiques (HPA)) gagne en importance du point de vue de l'impact sur l'environnement. Etant donné que les aliments sont la principale source d'absorption par l'être humain, les matières en suspension dans l'air transférées dans les végétaux alimentaires revêtent une grande importance. On sait toutefois que le transfert des matières sous forme de dépôts particuliers est moins important que les dépôts secs de composés quasi gazeux.

Pour mesurer les dépôts totaux, on utilise les dispositifs normalisés pour la précipitation des poussières (procédure Bergerhoff, par exemple), qui ont été légèrement modifiés et obscurcis pour les protéger contre la pénétration d'une lumière intense. D'importants problèmes techniques, comme la remise en suspension de particules déjà séparées, l'évaporation ou même la décomposition photolytique, font maintenant l'objet de recherches systématiques afin d'améliorer les procédures d'échantillonnage des composés organiques, lesquelles ne sont pas encore optimales.

### Les investigations olfactométriques

Les investigations olfactométriques sur les immissions sont utilisées dans la surveillance pour quantifier les plaintes concernant des odeurs et pour établir la pollution de niveau initial dans les procédures d'autorisation. Elles servent principalement à déterminer si les odeurs existantes ou prévues doivent être considérées comme significatives.

Tableau 55.7 • Aperçu des procédures courantes de mesurage de la qualité de l'air par chromatographie des composés organiques (avec des exemples d'applications)

Groupe de matières	Gamme de concentrations	Prélèvements, préparation	Etape analytique finale
Hydrocarbures C <sub>1</sub> -C <sub>9</sub>	µg/m <sup>3</sup>	Mousse gazeuse (prélèvement rapide), seringue étanche au gaz, piège froid avant la colonne capillaire (ciblage), désorption thermique	CPG/DIF
Hydrocarbures à faible point d'ébullition, hydrocarbures halogénés extrêmement volatils	ng/m <sup>3</sup> -µg/m <sup>3</sup>	Cylindre d'acier de haute qualité évacué et passivé (aussi pour les mesurages d'air pur) Expédition des échantillons par circuits de gaz, piège froid, désorption thermique	CPG/DIF/DCE/DIP
Composés organiques dans la plage des points d'ébullition C <sub>6</sub> -C <sub>30</sub> (60-350 °C)	µg/m <sup>3</sup>	Adsorption sur charbon actif, a) désorption avec CS <sub>2</sub> ; b) désorption avec solvants; c) analyse de l'espace libre	CPG capillaire/DIF
Composés organiques dans la plage 20-300 °C des points d'ébullition	ng/m <sup>3</sup> -µg/m <sup>3</sup>	Adsorption sur des polymères organiques (par exemple, Tenax) ou sur un filtre à charbon actif (carbopack), désorption thermique avec piège froid avant la colonne capillaire (ciblage) ou extraction par solvants	CPG capillaire/ DIF/DCE/SM
Modification pour les composés à bas points d'ébullition (à partir de -120 °C)	ng/m <sup>3</sup> -µg/m <sup>3</sup>	Adsorption sur des polymères refroidis (tube thermogradient), refroidi à -120 °C, emploi du carbopack	CPG capillaire/ DIF/DCE/SM
Composés organiques à points d'ébullition élevés partiellement attachés aux particules (spécialement HAP, PCB, PCDD/PCDF), grands volumes de prélèvements	fg/m <sup>3</sup> -ng/m <sup>3</sup>	Prélèvements sur filtres (par exemple, petit appareil à filtre ou échantillonneur à grand volume) avec ensuite cartouches de polyuréthane pour la portion gazeuse, désorption par solvants du filtre et du polyuréthane, diverses phases de purification et de préparation, pour HAP aussi sublimation	CPG capillaire — GCMS (PCDD/PCDF), CPG capillaire-DIF ou SM (HAP), CLHP, détecteur à fluorescence (HAP)
Composés organiques à points d'ébullition élevés (spécialement PCDD, PCDF, PBDD, PBDF), faibles volumes d'échantillonnage	fg/m <sup>3</sup> -ng/m <sup>3</sup>	Adsorption sur polymères organiques (par exemple, cylindre de mousse polyuréthane) avec filtres préalables (par exemple, fibres de verre) ou adsorption inorganique (par exemple, gel de silice), extraction par solvants, diverses phases de purification et de préparation (y compris chromatographie multicolonne), dérivation pour les chlorophénols	CCHR/DCE
Composés organiques à points d'ébullition élevés attachés aux particules, par exemple, composants d'aérosols organiques, échantillons de dépôts	ng/m <sup>3</sup> aérosol ng-µg/g pg-ng/m <sup>2</sup> jour	Séparation des aérosols sur filtres à fibres de verre (par exemple, échantillonneur à grand ou faible volume) ou collecte de poussières sur surfaces normalisées, extraction par solvants (pour les dépôts aussi de l'eau filtrée restante), diverses phases de purification et de préparation	CCHR/SM CLHP (pour HAP)

CPG = chromatographie en phase gazeuse; GCMS = CPG/spectroscopie de masse; DIF = détecteur à ionisation de flamme; CCHR/DCE = CPG/DCE à haut pouvoir de résolution; DCEH = détecteur à capture d'électrons; CLHP = chromatographie en phase liquide à haute performance; DIP = détecteur à ionisation photoélectrique; SM = spectroscopie de masse.

En principe, on peut différencier trois approches méthodologiques:

- mesurage de la concentration de l'émission (nombre d'unités d'odeur) à l'aide d'un olfactomètre et modélisation subséquente de la dispersion;
- mesurage des différents composants (par exemple, NH<sub>3</sub>) ou des mélanges de composés (par exemple, chromatographie en phase gazeuse des gaz provenant des décharges), s'ils sont suffisamment caractéristiques de l'odeur;
- détermination des odeurs au moyen d'inspections.

La première possibilité combine le mesurage des émissions avec la modélisation et, à vrai dire, n'entre pas dans le cadre de la

surveillance de la qualité de l'air. Dans la troisième méthode, c'est le nez de l'humain qui sert de détecteur avec une précision sensiblement réduite par rapport aux méthodes physico-chimiques.

Des précisions relatives aux inspections, aux plans de mesurage et à l'évaluation des résultats sont données, par exemple, dans la réglementation sur la protection de l'environnement de certains Länder d'Allemagne.

### Les procédures concernant les mesurages de présélection

On utilise parfois des procédures simplifiées de mesurage pour les études préparatoires (de présélection). Il s'agit notamment d'échantillonneurs passifs, de tubes d'essai et de procédures biologiques.

Avec les échantillonneurs passifs (diffusifs), la matière objet de l'essai est recueillie selon des procédés à écoulement libre comme la diffusion, l'imprégnation ou l'adsorption dans des collecteurs de forme simple (tubes, plaques) et enrichie dans des filtres imprégnés, tamis ou autres milieux d'adsorption. L'échantillonnage actif (aspiration de l'échantillon d'air à travers une pompe) n'a donc pas lieu. La quantité de matière enrichie, dosée analytiquement en fonction d'un temps d'exposition défini, est convertie en unités de concentration sur la base des lois physiques (diffusion, par exemple) en prenant en compte la durée de la collecte et des paramètres géométriques du collecteur. Cette méthode était utilisée à l'origine dans le domaine de la santé au travail (échantillonnages individuels) et du mesurage de l'air à l'intérieur des locaux, mais elle l'est de plus en plus pour contrôler les concentrations de polluants dans l'air ambiant. On en trouve un aperçu dans Brown, 1993.

On se sert souvent de tubes indicateurs pour l'échantillonnage et les analyses préparatoires rapides des gaz. On aspire un certain volume d'air à travers un tube de verre rempli d'un réactif d'adsorption qui correspond à l'objectif de l'essai. Le contenu du tube change de couleur selon la concentration de la matière à doser qui est présente dans l'air étudié. On utilise souvent de petits tubes d'essai pour la surveillance sur le lieu du travail ou comme procédure rapide en cas d'accidents, comme les incendies. Ils ne sont pas employés pour les mesurages courants des concentrations de polluants dans l'air ambiant du fait que leurs seuils de détection sont généralement trop élevés et leur sélectivité trop limitée. Il existe des tubes indicateurs pour un grand nombre de matières dans diverses gammes de concentration.

Parmi les procédures biologiques, deux méthodes se sont imposées pour la surveillance courante. Avec la procédure normalisée d'exposition des lichens, on détermine le taux de mortalité du lichen sur une durée d'exposition de 300 jours. Selon une autre procédure, l'herbe de prairie française est exposée pendant

14 ± 1 jours. On détermine ensuite le volume de la croissance. Ces deux procédures servent à évaluer sommairement les effets des concentrations de polluants atmosphériques.

### Les réseaux de surveillance de la qualité de l'air

On utilise de par le monde les types les plus variés de réseaux de surveillance de la qualité de l'air. Il faut établir une distinction entre les réseaux de mesurage composés de stations automatiques commandées par ordinateur (récipients de mesure) et les réseaux virtuels, qui ne font que définir les emplacements pour divers types de mesurage des concentrations des polluants atmosphériques sous la forme d'une grille préalablement définie. Les types de réseaux et leur rôle ont été décrits plus haut.

### Les réseaux de surveillance continue

Les réseaux de mesurage fonctionnant en continu sont constitués de stations automatiques et servent principalement à surveiller la qualité de l'air dans les zones urbaines. On y mesure les polluants atmosphériques comme le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), les poussières, le monoxyde d'azote (NO), le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>), le monoxyde de carbone (CO), l'ozone (O<sub>3</sub>) et, dans une certaine mesure, la somme des hydrocarbures (méthane libre, C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>) ou divers composants organiques (benzène, toluène, xylènes, par exemple). En outre, selon les besoins, on inclut les paramètres météorologiques comme la direction du vent, sa vitesse, la température de l'air, l'humidité relative, les précipitations, le rayonnement global ou le bilan radiatif.

Les appareils de mesurage utilisés dans les stations consistent généralement en un analyseur, une unité d'étalonnage et un dispositif électronique de commande et de direction qui surveille l'ensemble de l'équipement et contient une interface normalisée pour la collecte des données. Outre les valeurs mesurées, l'appareil fournit des «signaux de situation» sur les erreurs et l'état de fonctionnement. L'étalonnage des dispositifs fait l'objet d'une vérification automatique par ordinateur à intervalles réguliers.

En règle générale, les stations de mesurage sont reliées au moyen de lignes fixes de transmission des données, de liaisons téléphoniques ou d'autres systèmes de transfert de données à un ordinateur (ordinateur de traitement, poste de travail ou PC, selon la portée du système), qui reçoit, traite et affiche les résultats. Les ordinateurs du réseau et, si nécessaire, un personnel spécialement formé effectuent une surveillance continue pour s'assurer que les valeurs seuils ne sont pas dépassées. On peut ainsi déceler à tout moment les situations critiques. C'est très important, surtout pour surveiller les cas de smog massif en hiver et en été (photo-oxydants) et pour donner au public des informations à jour.

### Les réseaux pour le mesurage des échantillons aléatoires

Outre le réseau de mesurage télémétrique, d'autres systèmes sont utilisés à des degrés divers pour surveiller la qualité de l'air. A titre d'exemple, on citera les réseaux (partiellement automatisés à l'occasion) qui déterminent:

- les dépôts de poussières et leurs composants;
- la poussière en suspension (SPM) et ses composants;
- les hydrocarbures et les hydrocarbures chlorés;
- les matières organiques faiblement volatiles (dioxines, furannes, biphényles polychlorés).

On a classé comme cancérigènes une série de substances mesurées de cette manière, notamment les composés du cadmium, les HPA et le benzène. Il est donc particulièrement important de les surveiller.

A titre d'exemple d'un programme complet, le tableau 55.8 indique sommairement la surveillance de la qualité de l'air faite systématiquement en Rhénanie-du-Nord-Westphalie, qui, avec 18 millions d'habitants, est le Land le plus peuplé d'Allemagne.

Tableau 55.8 • Surveillance systématique de la qualité de l'air en Rhénanie-du-Nord-Westphalie (Allemagne)

Systèmes de mesurage en continu	Systèmes de mesurage partiellement automatisés	Systèmes de mesurage discontinu/mesurages à multicomposants
Dioxyde de soufre	Composition des SPM:	Benzène et autres hydrocarbures
Monoxyde d'azote	Plomb	
Dioxyde d'azote	Cadmium	Hydrocarbures halogénés
Monoxyde de carbone	Nickel	Dépôts de poussières et leurs composants
Particules en suspension (SPM)	Cuivre	Suie
	Fer	
Ozone	Arsenic	Biphényles polychlorés
Hydrocarbures	Béryllium	Dibenzodioxines polyhalogénées et dibenzofurannes (PCDD/PCDF)
Direction du vent	Benzo[a]pyrène	
Vitesse du vent	Benzo[e]pyrène	
Température de l'air	Benzo[a]anthracène	
Pression de l'air	Dibenzo[a,h]anthracène	
Humidité relative	Benzo[ghi]pérylène	
Bilan radiatif	Coronène	
Précipitations		