

● LA LUTTE CONTRE LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

John Elias

La gestion de la pollution atmosphérique

Le gestionnaire d'un système de lutte contre la pollution atmosphérique a pour mission de s'assurer que des concentrations excessives de polluants n'atteignent pas de cibles vulnérables: individus, végétaux, animaux et matières. Dans tous les cas, il faut se préoccuper des éléments les plus sensibles de chacun de ces groupes. Les polluants peuvent consister en gaz, vapeurs, aérosols ou encore être des substances biodangereuses. Un système bien conçu empêchera les cibles de recevoir une concentration nocive de polluant.

La plupart des systèmes de lutte contre la pollution atmosphérique font appel à un ensemble de procédés, habituellement une combinaison de moyens de prévention technique et de mesures organisationnelles. Pour les sources importantes ou complexes, on peut ne pas se limiter à un seul type de moyen de prévention technique.

Dans l'idéal, les mesures appropriées seront choisies en fonction du problème à résoudre.

- Qu'est-ce qui est émis, en quelle concentration?
- Quelles sont les cibles? Quelle est la plus vulnérable?
- Quels sont les niveaux d'exposition acceptables à court terme?
- Quelles combinaisons de méthodes de mesurage faut-il choisir pour s'assurer que les niveaux admissibles d'exposition à court terme et à long terme ne sont pas dépassés?

Le tableau 55.9 décrit les étapes de ce processus.

Certaines autorités se sont acquittées d'une partie de ce travail en fixant des normes fondées sur la concentration maximale d'un contaminant que peut recevoir une cible vulnérable. Avec ce type de normes, le gestionnaire ne doit pas s'occuper des étapes 2 et 3 puisque l'organisme de réglementation l'a déjà fait. Dans ce système, il doit seulement fixer la norme pour les émissions non réglementées de chaque polluant (étape 1) et décider des mesures nécessaires pour respecter cette norme (étape 4).

En disposant de normes de qualité de l'air, les organes de réglementation peuvent mesurer l'exposition individuelle et déterminer si quelqu'un est exposé à des niveaux potentiellement nuisibles. Il est admis que les normes fixées dans ces conditions sont suffisamment basses pour protéger le groupe cible le plus vulnérable, mais cette hypothèse n'est pas toujours valable. Comme le montre le tableau 55.10, les normes courantes de qualité de l'air varient largement. Pour le dioxyde de soufre, elles se situent dans une fourchette de 30 à 140 µg/m³. Pour les matières moins communément réglementées, les écarts peuvent être plus larges encore (1,2 à 1,718 µg/m³), comme on le voit au tableau 55.11 pour le benzène. Il n'y a pas lieu de s'en étonner puisque les considérations économiques interviennent autant que la toxicologie dans la définition des normes. Si une norme n'a pas été fixée à un niveau suffisamment bas pour protéger les populations vulnérables, personne n'y trouve son compte. Les populations exposées ont une fausse impression de sécurité et peuvent courir des risques à leur insu. L'émetteur peut avoir l'impression, au début, qu'il a bénéficié d'une norme peu contraignante, mais si les effets sur la collectivité obligent l'entreprise à redéfinir ses dispositifs antipollution ou à en installer de nouveaux, les coûts pourraient être plus élevés que si elle l'avait fait correctement dès le départ.

Il arrive que cette approche par étape dans le choix des mesures antipollution soit court-circuitée et que les organes de réglementation comme les concepteurs optent directement pour une «solution universelle». L'une de ces solutions est ce que l'on ap-

Tableau 55.9 • Etapes du choix des mesures antipollution

Étape 1: définir les émissions	Il faut d'abord déterminer ce que la cheminée rejettera. Toutes les émissions potentiellement toxiques doivent être prises en compte. Il faut ensuite estimer pour chaque matière la quantité rejetée. Sans ces informations, le gestionnaire ne peut commencer à formuler un programme antipollution.
Étape 2: définir les groupes cibles	Il faut identifier tous les groupes vulnérables: êtres humains, animaux, plantes et matériaux. Dans chaque cas, il faut identifier le membre le plus vulnérable de chaque groupe, comme les asthmatiques à proximité d'une usine rejetant des isocyanates.
Étape 3: déterminer les niveaux d'exposition admissibles*	Il faut fixer un niveau admissible d'exposition pour le groupe cible le plus sensible. Si le polluant est une matière aux effets cumulatifs, comme un cancérigène, il faut fixer des niveaux d'exposition à long terme (annuels). Si le polluant a des effets à court terme, comme un agent irritant ou sensibilisant, il faut fixer un niveau d'exposition à court terme ou même de pointe**.
Étape 4: choisir les mesures de réglementation	L'étape 1 identifie les émissions et l'étape 3 fixe les niveaux admissibles d'exposition. Dans l'étape 4, on s'assure que chaque polluant ne dépasse pas les niveaux admissibles. En cas de dépassement, il faut ajouter de nouvelles mesures de réglementation et vérifier à nouveau les niveaux d'exposition. Ce processus continue jusqu'à ce que toutes les expositions se situent au niveau admissible ou au-dessous. La modélisation de la dispersion peut servir à évaluer les expositions pour les usines futures ou à faire l'essai de solutions de rechange pour les installations existantes.

* Lorsqu'on fixe les niveaux d'exposition dans l'étape 3, il ne faut pas oublier qu'il s'agit d'expositions totales et non seulement de celles qui proviennent de l'usine. Une fois le niveau admissible établi, il faut soustraire les niveaux de fond et les apports d'autres usines pour déterminer le volume maximal que l'usine peut émettre sans dépasser le niveau d'exposition admissible. Si on ne le fait pas et que trois usines par exemple soient autorisées à émettre le volume maximal, les groupes cibles seront exposés à un niveau triple du niveau admissible.

** Certaines matières comme les cancérigènes n'ont pas de niveau au-dessous duquel elles n'auront pas d'effets nocifs. Par conséquent, aussi longtemps que certaines de ces matières seront relâchées dans l'environnement, il y aura un certain risque pour les populations cibles. En pareil cas, il n'est pas possible de fixer un niveau sans effets (autre que zéro). Il faut au contraire fixer un niveau admissible de risque. D'ordinaire, il se situe dans la fourchette de 1 résultat nocif pour 100 000 à 1 000 000 de personnes exposées.

pelle la meilleure technique de maîtrise disponible (MTMD). On suppose qu'en utilisant la meilleure combinaison d'épurateurs, de filtres et de bonnes méthodes de travail pour une source d'émission, on obtiendra un niveau d'émission suffisamment bas pour protéger le groupe cible le plus vulnérable. Bien souvent, le niveau d'émission obtenu sera inférieur au minimum requis pour protéger ce groupe. De cette façon, on devrait éliminer toutes les expositions inutiles. On trouvera au tableau 55.12 des exemples de la MTMD.

La MTMD ne garantit pas en soi des niveaux de réduction appropriés. Bien que ce soit le meilleur système de maîtrise fondé sur des mesures d'épuration des gaz et de bonnes pratiques opératoires, la MTMD peut ne pas suffire si la source est une grande usine ou si elle est située à proximité d'une cible sensible. La meilleure technique de maîtrise disponible doit être mise à

Tableau 55.10 • Eventail des normes de qualité de l'air pour un contaminant communément réglementé (dioxyde de soufre)

Pays et territoires	Normes de qualité pour l'exposition à long terme au dioxyde de soufre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Allemagne	140
Australie	50
Canada	30
Finlande	40
Hongrie	70
Taiwan, Chine	133

l'épreuve pour s'assurer qu'elle est vraiment suffisante. Il faut vérifier les normes d'émission ainsi obtenues pour voir si elles ne resteraient pas nocives malgré tout, même avec les meilleures mesures d'épuration des gaz. Si elles le sont encore, il faudra peut-être envisager d'autres solutions de base, comme le choix de procédés ou de matières plus sûrs, ou la réimplantation de l'usine dans une zone moins sensible.

Une autre «solution universelle», qui évite certaines des étapes, est celle des normes d'efficacité à la source. De nombreuses autorités fixent des normes d'émission à ne pas dépasser. Celles-ci reposent sur les émissions à la source. D'ordinaire, cela donne de bons résultats, mais, tout comme la MTMD, ces normes peuvent ne pas être fiables. Les niveaux devraient être suffisamment bas pour contenir les émissions maximales à un niveau assez faible pour protéger les groupes cibles vulnérables contre les émissions typiques. Toutefois, tout comme dans le cas de la MTMD, cela ne suffira pas toujours à protéger tout le monde lorsque les sources d'émission sont importantes ou situées près de populations vulnérables. En pareil cas, il faut d'autres procédures pour garantir la sécurité de tous les groupes cibles.

La MTMD et les normes d'émission ont un défaut fondamental. Elles supposent que si certains critères sont satisfaits à l'usine, les groupes cibles seront automatiquement protégés. Ce n'est pas nécessairement vrai, mais lorsqu'un système de ce genre a acquis force de loi, ses effets sur la cible deviennent secondaires par rapport au respect de la législation.

Tableau 55.11 • Eventail des normes américaines de qualité de l'air pour un contaminant moins couramment réglementé (benzène)

Ville/Etat	Norme de qualité (moyenne sur 24 heures) pour le benzène ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Caroline du Nord	2,1
Connecticut	53,4
Massachusetts	1,2
Michigan	2,4
Nevada	254
New York	1 718
Philadelphie	1 327
Virginie	300

Les niveaux ont été normalisés sur une durée moyenne de 24 heures pour faciliter les comparaisons. (D'après Calabrese et Kenyon, 1991.)

Tableau 55.12 • Exemples choisis de la meilleure technique de maîtrise disponible (MTMD) indiquant la méthode utilisée et son rendement estimatif

Processus	Polluants	Méthode	Rendement estimatif
Assainissement du sol	Hydrocarbures	Oxydant thermique	99
Chaudière de récupération d'une usine de papier kraft	Particules	Précipitateur électrostatique	99,68
Production de silice fumée	Monoxyde de carbone	Bonne pratique	50
Peinture des automobiles	Hydrocarbures	Brûleurs de postcombustion de four	90
Four à arc électrique	Particules	Filtres à manches	100
Raffinerie de pétrole, craquage catalytique	Particules respirables	Cyclone + épurateur Venturi	93
Incinérateur médical (hospitalier)	Chlorure d'hydrogène	Laveur + épurateur à sec	97,5
Chaudière à charbon	Dioxyde de soufre	Séchage par pulvérisation + absorption	90
Élimination des déchets par déshydratation et incinération	Particules	Cyclone + condenseur + épurateur Venturi + laveur	95
Usine d'asphalte	Hydrocarbures	Oxydant thermique	99

La MTMD tout comme les normes d'émission à la source ou les critères de conception devraient être utilisés en tant que critères minimaux pour les mesures antipollution. Si la MTMD ou les critères d'émission protègent les cibles vulnérables, ils peuvent être appliqués tels quels; sinon il faut recourir à d'autres mesures organisationnelles.

Les mesures antipollution

Ces mesures peuvent se diviser en deux types fondamentaux — technique et organisationnel. Les mesures techniques sont définies ici comme les équipements installés sur une source d'émission pour abaisser les concentrations de contaminants dans le flux gazeux à un niveau qui soit acceptable pour la collectivité et qui protège le groupe le plus sensible. Les mesures organisationnelles sont définies comme les autres dispositifs antipollution.

Les mesures techniques

Les systèmes d'épuration des gaz sont placés à la source, avant la cheminée, pour éliminer les contaminants du flux gazeux avant de le lâcher dans l'atmosphère. Le tableau 55.13 résume les différentes catégories de systèmes d'épuration des gaz.

L'épurateur de gaz fait partie d'un ensemble complexe formé de hottes, de conduits, de ventilateurs, de laveurs et de cheminées. La conception, le fonctionnement et l'entretien de chacun de ces éléments influent sur la performance de tous les autres et du système dans son ensemble.

Il convient de noter que le rendement du système varie largement pour chaque type d'épurateur en fonction de sa conception, de l'énergie utilisée et des caractéristiques du flux gazeux et du contaminant. Par conséquent, les rendements don-

Tableau 55.13 • Méthodes d'épuration des gaz par élimination des vapeurs, particules et gaz nocifs des émissions industrielles

Méthode Gaz/vapeurs	Exemples	Description	Efficacité
Condensation	Condenseurs par contact Condenseurs de surface	La vapeur est refroidie et condensée en un liquide. Cela est inefficace et est utilisé comme prétraitement avec d'autres méthodes.	+80% pour les concentrations >2 000 ppm
Absorption	Laveurs (à garniture ou à plaque)	Le gaz ou la vapeur sont recueillis dans un liquide.	82-95% pour les concentrations <100 ppm 95-99% pour les concentrations >100 ppm
Adsorption	Carbone Alumine Gel de silice Tamis moléculaire	Le gaz ou la vapeur sont recueillis sur un solide.	+90% pour les concentrations <1 000 ppm +95% pour les concentrations >1 000 ppm
Incinération	Flammes Incinérateur Incinérateur catalytique	Un gaz ou une vapeur inorganique sont oxydés en étant portés à une température élevée et maintenus à cette température pendant une durée suffisante.	Non recommandé pour des concentrations <2 000 ppm +80% pour des concentrations >2 000 ppm
Particules			
Séparateurs inertiels	Cyclones	Les gaz chargés de particules sont forcés de changer de direction. L'inertie contraint les particules à sortir du flux gazeux. Cela est inefficace et est utilisé comme prétraitement avec d'autres méthodes.	70-90%
Laveurs	Venturi Filtre humidifié Laveur à plateau ou à tamis	Les gouttelettes liquides (eau) recueillent les particules par impact, interception et diffusion. Les gouttelettes et les particules sont ensuite séparées du flux gazeux.	Pour les particules de 5 µm, 98,5% à 17 cm CE; +99,99 % à 130 cm CE Pour les particules de 1 µm, 45% à 17 cm CE; 99,95 à 130 cm CE
Précipitateurs électrostatiques	A plaques et fils A plaques planes Tubulaires Humides	Les forces électriques servent à entraîner les particules hors du flux gazeux vers les plaques de collecte.	95-99,5% pour les particules de 0,2 µm 99,25-99,9% (au moins) pour les particules de 10 µm
Filtres	Filtres à manches	Un tissu poreux retient les particules du flux gazeux. Le dépôt poreux de poussières qui se forme sur le tissu sert ensuite lui-même de filtre.	99,9% pour les particules de 0,2 µm 99,5% pour les particules de 10 µm

nés à titre d'exemple au tableau 55.13 ne sont que des approximations. La variation du rendement est illustrée par les laveurs au tableau 55.13. Le rendement de collecte d'un laveur varie entre 98,5% pour des particules de 5 µm et 45% pour des particules de 1 µm pour la même perte de charge au droit du laveur (hauteur d'eau de 17 cm dans la jauge de pression d'eau (CE)). Pour une particule de même dimension, 1 µm, l'efficacité varie entre 45% pour une hauteur d'eau de 17 cm et 99,95% pour une hauteur d'eau de 130 cm. Par conséquent, les épurateurs de gaz doivent être adaptés au flux en question. Il n'est pas recommandé d'utiliser des dispositifs génériques.

L'élimination des déchets

Lorsqu'on choisit et conçoit un système d'épuration des gaz, il faut veiller avec soin à l'élimination sans danger des matières recueillies. Comme le montre le tableau 55.14, certains procédés produisent de grandes quantités de contaminants. Si la plupart de ces contaminants sont recueillis par l'équipement d'épuration des gaz, l'élimination des déchets dangereux peut soulever un problème.

Dans certains cas, les déchets contiennent des produits utiles susceptibles d'être recyclés, comme les métaux lourds provenant d'une fonderie ou les solvants d'une fabrique de peinture. Les déchets peuvent servir de matière première dans un autre procédé

industriel, tel le dioxyde de soufre extrait de l'acide sulfurique qui sert à la fabrication d'engrais.

Lorsque les déchets ne peuvent être ni recyclés, ni réutilisés, l'élimination n'est pas toujours simple. Non seulement leur volume peut poser problème, mais ils sont parfois dangereux en eux-mêmes. Ainsi, quand l'acide sulfurique récupéré d'une chaudière ou d'une fonderie ne peut être réutilisé, il faudra lui faire subir de nouveaux traitements pour le neutraliser avant de l'éliminer.

La dispersion

La dispersion peut réduire la concentration d'un polluant à la cible. Il ne faut pas oublier pourtant que la dispersion ne réduit pas la quantité totale de matières émises par une usine. Une cheminée élevée permet seulement au panache de se disperser et d'être dilué avant d'atteindre le niveau du sol, où il existe sans doute des cibles vulnérables. Si le polluant est essentiellement une nuisance, comme une odeur, la dispersion peut ne pas être acceptable. Si la matière est rémanente ou cumulative, comme les métaux lourds, la dilution ne sera peut-être pas la réponse au problème de pollution atmosphérique.

La dispersion devrait être utilisée avec prudence. Il faut tenir compte des conditions météorologiques locales et des conditions à la surface du sol. Dans les climats plus froids, par exemple, parti-

Tableau 55.14 • Exemples de taux d'émission non contrôlés pour quelques procédés industriels

Source industrielle	Taux d'émission
Four électrique de 100 tonnes	257 tonnes/an de matières particulaires
Turbine à gaz/fioul de 440 MW	202 kg/h de SO ₂
Incinérateur de 41,7 tonnes/h	94 kg/h de NO _x
Couche claire sur 100 camions/jour	1 723 kg/semaine de matières organiques

culièrement avec couverture de neige, il peut y avoir fréquemment des inversions de température qui peuvent emprisonner les polluants à proximité du sol, donnant lieu à des expositions anormalement élevées. De même, si l'usine est implantée dans une vallée, les panaches peuvent monter et descendre le long de celle-ci, ou rester bloqués par les collines avoisinantes, si bien qu'ils ne s'évalent pas et ne se dispersent pas comme prévu.

Les mesures organisationnelles de prévention

Outre les systèmes techniques, il est un autre groupe de mesures à prendre en considération dans la conception d'ensemble d'un système de lutte contre la pollution atmosphérique. Pour l'essentiel, elles font partie des instruments fondamentaux de l'hygiène industrielle.

La substitution

L'une des méthodes d'hygiène les plus employées pour réduire les dangers environnementaux sur le lieu de travail consiste à remplacer une matière ou une méthode dangereuse par une autre qui l'est moins. S'il est possible de le faire et si l'on évite des émissions nocives, on n'a plus à se poser de questions sur le type ou l'efficacité des mesures de lutte. Il est préférable en effet d'éviter le problème plutôt que de chercher à corriger une première décision qui était mauvaise. A titre d'exemple, on citera l'emploi de combustibles plus propres, la pose de bâches sur les matières stockées en vrac et la réduction des températures dans les séchoirs.

Cette règle s'applique aux achats peu importants aussi bien qu'aux principaux critères de conception de l'usine. Si l'on utilise uniquement des matières ou des méthodes qui ne nuisent pas à l'environnement, il n'y aura aucun risque, ni à l'intérieur, ni à l'extérieur. En revanche, quand on a fait le mauvais choix, le reste du programme consistera à essayer de remédier à cette décision première. Si l'on utilise un produit ou un procédé bon marché, mais dangereux, on devra peut-être recourir à des procédures et matériels spéciaux de manipulation, ainsi qu'à des méthodes spéciales d'élimination. L'article bon marché peut alors se révéler coûteux à utiliser et à éliminer, alors qu'une matière ou une méthode plus sûre, mais plus chère, aurait peut-être été plus économique à long terme.

La ventilation localisée

Des mesures doivent être prises pour tous les problèmes recensés qui n'ont pu être évités par la substitution de matières ou de méthodes plus sûres. Les émissions prennent naissance à chaque poste de travail et non à la cheminée. Un système de ventilation bien conçu qui capte et maîtrise les émissions à la source aidera à protéger la collectivité. Les hottes et conduits du système de ventilation font partie du dispositif total de lutte contre la pollution atmosphérique.

Il est préférable d'opter pour une ventilation localisée. Un tel système ne dilue pas les contaminants et fournit un flux gazeux concentré qu'il est plus facile d'épurer avant son rejet dans l'environnement. L'équipement d'épuration des gaz est plus efficace s'il traite un air où les concentrations de contaminants sont plus élevées. Ainsi, une hotte de captage au-dessus du chenal de coulée d'un haut fourneau empêchera les contaminants de se propager dans l'environnement et dirigera les fumées vers le système d'épuration des gaz. Le tableau 55.13 montre que l'efficacité des épurateurs par absorption et adsorption augmente avec la concentration du contaminant, et que les épurateurs par condensation ne sont pas recommandés pour de faibles niveaux de concentration (< 2 000 ppm).

Si les polluants ne sont pas captés à la source et peuvent s'échapper par les fenêtres et les ouvertures de ventilation, ils se transforment en fuites et émissions fugaces non maîtrisées. Dans certains cas, ces émissions peuvent avoir un impact important sur le voisinage immédiat.

L'isolement

L'isolement — l'implantation de l'usine à l'écart des cibles vulnérables — peut constituer une bonne méthode de lutte contre la pollution lorsque les dispositifs antipollution intégrés ne suffisent pas en eux-mêmes. Ce peut être le seul moyen d'atteindre un niveau admissible de protection lorsque la meilleure technique de maîtrise disponible (MTMD) doit être utilisée. Si, après application des meilleurs dispositifs disponibles, un groupe cible est encore en danger, il faut envisager de trouver un autre site dépourvu de populations sensibles.

Tel que présenté ci-dessus, l'isolement est un moyen de séparer une installation donnée de cibles vulnérables. Un autre système d'isolement est celui du zonage utilisé par les pouvoirs locaux pour séparer certaines catégories d'industries des cibles vulnérables. Une fois les industries séparées des populations cibles, il ne faudrait pas permettre à la population de se réinstaller à proximité d'une usine. Bien que cette méthode semble aller de soi, elle ne se pratique pas aussi souvent qu'il le faudrait.

Les méthodes de travail

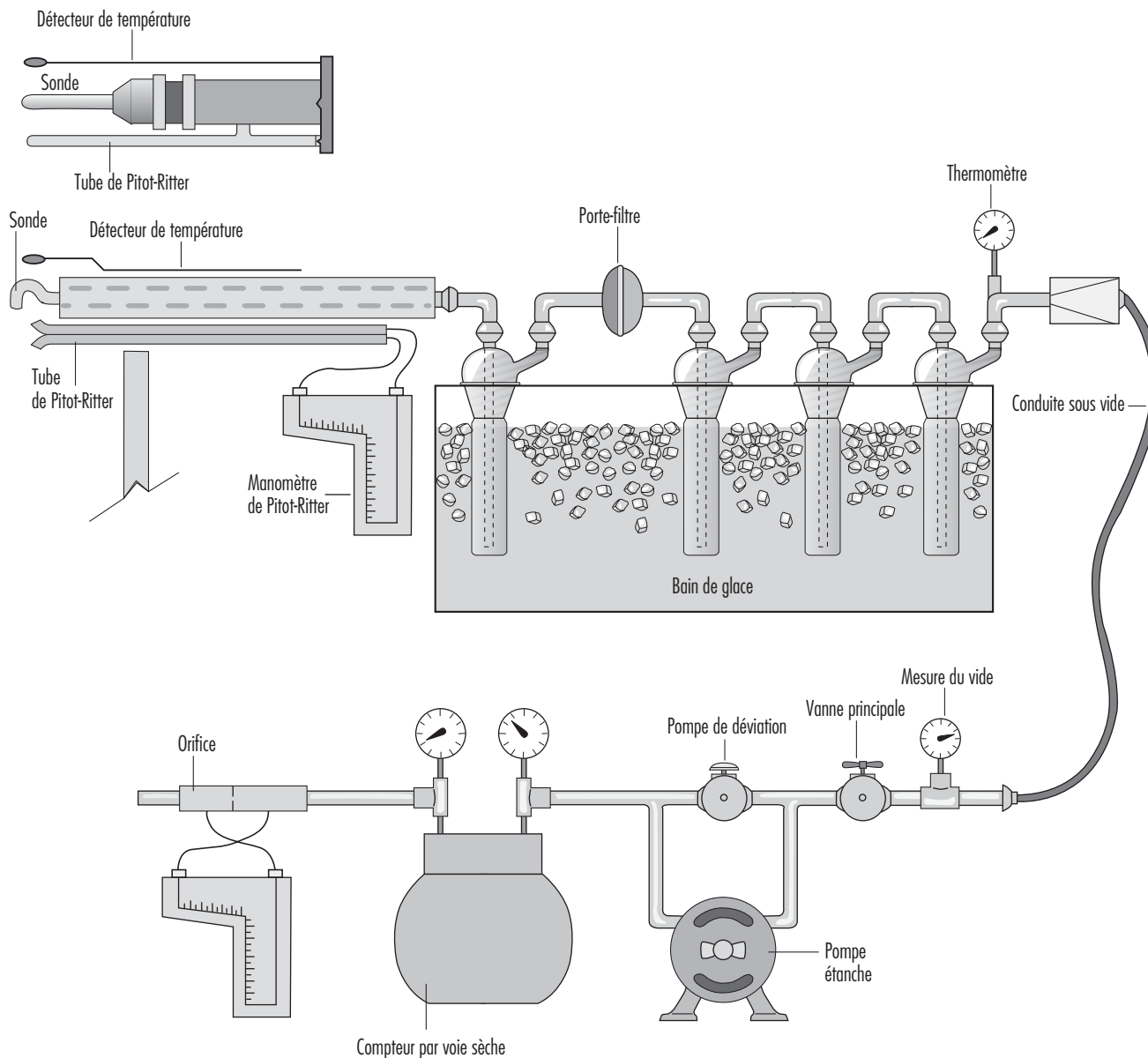
Il faut adopter des méthodes de travail qui garantissent que le matériel est utilisé correctement et en sécurité, sans risque pour les travailleurs ni pour l'environnement. Les systèmes antipollution complexes doivent être correctement entretenus et utilisés s'ils doivent remplir leur fonction. Un autre facteur important est celui de la formation du personnel; celui-ci doit apprendre à utiliser et à entretenir le matériel installé pour réduire ou éliminer la quantité de matières dangereuses rejetée sur le lieu du travail ou à l'extérieur. Dans certains cas, la MTMD s'en remet aux bonnes pratiques pour garantir des résultats acceptables.

La surveillance en temps réel

Le système fondé sur la surveillance en temps réel n'est pas populaire et n'est pas utilisé de façon courante. Selon cette méthode, on peut combiner l'émission en continu et la surveillance météorologique avec la modélisation de la dispersion pour prédire les expositions sous le vent. Lorsque les expositions prévues approchent les niveaux tolérables, cette information sert à réduire les cadences de production et les émissions. Il s'agit d'une méthode peu efficace, mais elle peut représenter un procédé provisoire acceptable de lutte pour une installation existante.

L'inverse consiste à avertir le public lorsque les conditions sont telles que des concentrations excessives de contaminants pourraient se produire, afin que la population puisse prendre les dispositions voulues. Ainsi, si l'on signale que les conditions atmosphériques rendent excessifs les niveaux de dioxyde de soufre sous le vent d'une fonderie, les personnes vulnérables comme les asthma-

Figure 55.5 • Diagramme d'un échantillonneur isocinétique pour le dioxyde de soufre



tiques sauront qu'elles ne doivent pas sortir. Là encore, cela peut offrir une mesure provisoire acceptable en attendant la mise en place de dispositifs antipollution permanents.

On a parfois recours à la surveillance atmosphérique et météorologique en temps réel pour éviter ou atténuer des cas de forte pollution lorsqu'il peut y avoir de multiples sources. S'il apparaît évident que les niveaux de pollution risquent de devenir excessifs, on peut restreindre l'emploi des voitures personnelles et interrompre l'activité des principales entreprises industrielles émettrices.

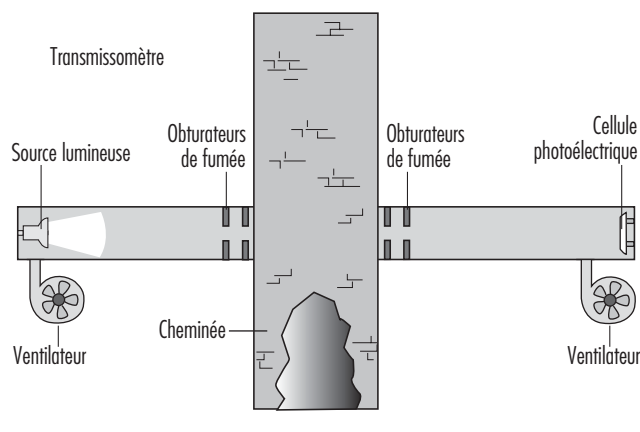
L'entretien, l'ordre et la propreté

Dans tous les cas, l'efficacité des dispositifs antipollution dépend d'un bon entretien; le matériel doit fonctionner comme prévu. En plus des dispositifs eux-mêmes, les procédés de fabrication qui peuvent donner lieu à des émissions doivent être utilisés correctement. A titre d'exemple d'un procédé industriel, on peut citer un

séchoir de copeaux de bois dont le dispositif de contrôle de la température est défaillant; si le séchoir fonctionne à une température trop élevée, il émettra davantage de matières et, peut-être, des matières d'un type différent, arrachées au bois en train de sécher. Pour un épurateur de gaz, un exemple d'entretien qui influerait sur les émissions serait celui d'un filtre à manches défectueux dont les sacs seraient troués, laissant ainsi passer les poussières.

Les travaux de maintenance jouent aussi un rôle important dans la réduction des émissions totales. Les poussières qui ne sont pas enlevées rapidement à l'intérieur de l'usine peuvent être remises en suspension et présenter un risque pour le personnel. Si elles sont transportées à l'extérieur de l'usine, elles sont un risque pour la collectivité. Des matières en vrac non couvertes, des déchets végétaux ou la poussière soulevée par les véhicules peuvent permettre aux polluants d'être entraînés par le vent vers la collectivité. Pour ré-

Figure 55.6 • Transmissomètre simple pour mesurer les particules dans une cheminée



duire les émissions totales, il est important de nettoyer les cours d'usine et d'utiliser des conteneurs ou des sites de stockage appropriés. Il ne suffit pas de bien concevoir un système, encore faut-il l'utiliser correctement si l'on veut protéger la collectivité.

Un exemple parlant de mauvais entretien serait celui d'une installation de récupération du plomb dans laquelle les poussières de plomb s'échapperaient du convoyeur jusqu'à former un tas si haut qu'elles finiraient par s'écouler par une fenêtre cassée pour être transportées par le vent.

Le matériel pour le prélèvement d'échantillons des émissions

Les prélèvements à la source peuvent être effectués pour plusieurs raisons:

- *Pour caractériser les émissions.* Il faut savoir ce qui est émis pour concevoir un système rationnel de lutte contre la pollution de l'air. Il faut connaître non seulement le volume des gaz, mais la quantité, la nature et, dans le cas des particules, la répartition granulométrique des matières émises. Les mêmes informations sont nécessaires pour inventorier les émissions totales dans le voisinage.
- *Pour tester l'efficacité du matériel.* Une fois le dispositif antipollution acheté, il faut le tester pour s'assurer qu'il remplit bien ses fonctions.
- *Pour perfectionner le dispositif antipollution.* Lorsque les émissions sont continuellement surveillées, les données peuvent servir à perfectionner le système de lutte contre la pollution de l'air ou le fonctionnement de l'usine elle-même.
- *Pour savoir si les normes sont respectées.* Lorsque des normes réglementaires comprennent des limites d'émission, l'échantillonnage permet de savoir si ces normes ont été respectées ou non.

Le type de système d'échantillonnage utilisé dépendra de la raison pour laquelle les échantillons sont prélevés, du coût, de la technique disponible et de la formation du personnel.

Les émissions visibles

Si l'on veut réduire l'effet de souillure dû à l'air, améliorer la visibilité ou empêcher l'introduction d'aérosols dans l'atmosphère, on peut fonder les normes sur les émissions visibles.

Les émissions visibles sont composées de petites particules ou de gaz colorés. Plus un panache est opaque et plus il y a de matières rejetées. Cette caractéristique est visible à l'œil nu et des observateurs entraînés peuvent évaluer les niveaux des émissions.

Il y a plusieurs avantages à employer cette méthode pour évaluer les émissions:

- elle ne nécessite pas un matériel coûteux;
- une personne peut faire un grand nombre d'observations par jour;
- les opérateurs des usines peuvent évaluer rapidement et à peu de frais les effets des changements de procédés;
- les usines qui ne respectent pas les normes peuvent être identifiées sans qu'il faille longuement vérifier la source;
- les émissions douteuses peuvent être localisées et leur niveau réel peut alors être déterminé par la vérification de leur source, comme on le verra ci-après.

L'échantillonnage par prélèvement dans la cheminée

Une méthode beaucoup plus rigoureuse consiste à prélever un échantillon du flux gazeux dans la cheminée et à l'analyser. Bien que cela paraisse simple, l'application est délicate.

L'échantillon devrait être prélevé de façon isocinétique, spécialement lorsqu'il s'agit de prélever des particules. Dans ce procédé, l'échantillon est aspiré dans la sonde de prélèvement à la même vitesse que celle à laquelle la matière se meut dans la cheminée ou le conduit. Pour ce faire, on mesure la vitesse du flux gazeux à l'aide d'un tube de Pitot-Ritter et on ajuste ensuite le débit d'échantillonnage pour que l'échantillon pénètre dans la sonde à la même vitesse. C'est indispensable pour le prélèvement d'échantillons de particules, étant donné que les particules plus grandes et plus lourdes ne suivront pas un changement de direction ou de vitesse, si bien que la concentration de celles-ci dans l'échantillon ne sera pas représentative du flux gazeux, et l'échantillon sera inexact.

On voit à la figure 55.5 un échantillonneur isocinétique pour le dioxyde de soufre. Ce n'est pas un instrument simple et il faut un opérateur bien formé pour que l'échantillon soit convenablement prélevé. Si l'on veut prélever autre chose que le dioxyde de soufre, on peut retirer le dispositif d'impact et le bain de glace et insérer l'élément de collecte approprié.

Cette méthode d'échantillonnage, spécialement sous la forme isocinétique, peut être très précise et adaptable, et elle a plusieurs usages:

- c'est une méthode d'échantillonnage reconnue qui offre des contrôles de qualité appropriés et peut donc servir à déterminer le respect des normes;
- par la précision qu'elle peut atteindre, elle convient aux essais de performance des nouveaux équipements antipollution;
- comme les échantillons peuvent être prélevés et analysés dans des conditions de laboratoire strictement contrôlées pour un grand nombre de composants, elle se prête à la caractérisation du flux gazeux.

Un système d'échantillonnage simplifié et automatisé peut être relié à un analyseur en continu des gaz (capteurs électrochimiques, photométriques dans l'ultraviolet ou à ionisation de flamme) ou à un analyseur de particules (néphélomètre) pour surveiller continuellement les émissions. On peut ainsi obtenir une documentation des émissions et connaître instantanément l'état de fonctionnement du dispositif antipollution.

L'échantillonnage in situ

On peut également mesurer les émissions dans la cheminée. La figure 55.6 représente un appareil simple mesurant la transmissivité du flux gazeux et les matières présentes dans ce flux. Dans cet appareil, un faisceau lumineux est projeté à travers la cheminée vers une cellule photoélectrique. Les particules ou les gaz colorés absorberont une partie de la lumière. Plus il y a de matières et plus la lumière sera absorbée.

A l'aide de sources de lumière différentes et de détecteurs comme les rayons ultraviolets (UV), on peut déceler les gaz trans-

parents à la lumière visible. Ces dispositifs peuvent être adaptés à des gaz déterminés et peuvent alors mesurer les concentrations de gaz dans un flux de déchets.

Le système de surveillance in situ a l'avantage, par rapport au procédé par prélèvement, de pouvoir mesurer les concentrations dans l'ensemble de la cheminée ou du conduit, alors que l'autre méthode ne les mesure qu'au point où l'échantillon a été prélevé. Elle peut donc introduire une erreur importante si le flux gazeux n'est pas homogène. En revanche, le prélèvement dans la cheminée permet d'utiliser un plus grand nombre de méthodes d'analyse et peut donc être employé dans des applications plus nombreuses elles aussi.

Etant donné que la méthode in situ donne une lecture en continu, elle peut servir à documenter les émissions ou à procéder au réglage fin du système d'exploitation.

● LA LUTTE CONTRE LA POLLUTION DE L'EAU

Herbert C. Preul

Le présent article vise à donner au lecteur un aperçu des techniques actuellement disponibles pour lutter contre la pollution de l'eau, en s'appuyant sur l'exposé des tendances et des faits présentés par Hespagnol et Helmer dans le chapitre n° 53, «Les risques pour la santé liés à l'environnement». Les sections qui suivent sont consacrées, la première à «La lutte contre la pollution des eaux de surface», et la seconde à «La lutte contre la pollution des eaux souterraines».

La lutte contre la pollution des eaux de surface

La définition de la pollution de l'eau

Par pollution de l'eau, on entend un état qualitatif d'impureté ou de manque de propreté des eaux hydrologiques d'une certaine région, comme un bassin versant. Cet état résulte d'un événement ou processus qui réduit l'utilité des eaux du globe, spécialement en ce qui concerne la santé de l'être humain et les effets sur l'environnement. Le processus de pollution signifie une perte de pureté par contamination, qui implique en outre l'intrusion d'une source extérieure, en tant que cause, ou le contact avec cette source. Par altération, on entend des niveaux extrêmement faibles de pollution des eaux, comme au moment où elles commencent à devenir moins propres. Le mot souillure désigne le résultat de la pollution et indique une violation ou une dégradation.

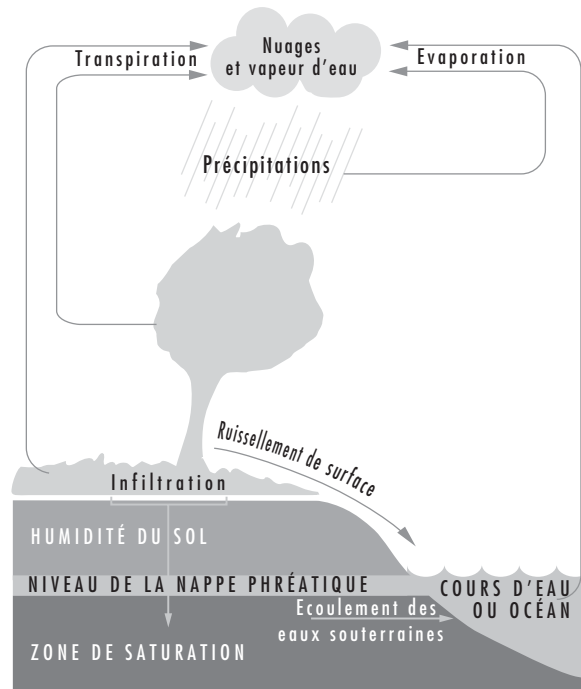
Les eaux hydrologiques

Les eaux naturelles de la planète peuvent être considérées comme un système en circulation continue ainsi que le montre la figure 55.7, qui fournit une illustration graphique des eaux dans le cycle hydrologique, comprenant les eaux superficielles et les eaux souterraines.

En tant que référence de qualité, l'eau distillée (H_2O) représente l'état de pureté le plus élevé. Les eaux du cycle hydrologique peuvent être considérées comme naturelles, mais elles ne sont pas pures. Elles sont polluées par les activités de la nature et celles des humains. La dégradation naturelle peut être le résultat d'une myriade de sources — faune, flore, éruptions volcaniques, éclairs causant des incendies, etc. — et, du point de vue scientifique, cet état est considéré comme le niveau de base.

La pollution anthropique perturbe l'équilibre naturel par l'addition des déchets issus de diverses sources. Les polluants sont introduits dans les eaux du cycle hydrologique en n'importe quel point. Ainsi, les précipitations atmosphériques (pluies) peuvent

Figure 55.7 • Le cycle hydrologique



être contaminées par les polluants de l'air; les eaux superficielles sont polluées du fait du ruissellement en provenance des bassins hydrographiques; les eaux usées sont parfois rejetées dans les fleuves et les cours d'eau; enfin, les eaux souterraines peuvent être polluées par infiltration et contamination du sous-sol.

La figure 55.8 montre comment se répartissent les précipitations. La pollution se superpose à ces eaux et peut donc être considérée comme un état de l'environnement non naturel ou non équilibré. Le processus de pollution peut se produire dans les eaux de n'importe quelle partie du cycle hydrologique et c'est à la surface de la terre qu'il est le plus apparent sous la forme de ruissellement en provenance des bassins versants vers les fleuves et les cours d'eau. La pollution des eaux souterraines a pourtant elle aussi un grand impact sur l'environnement; elle sera examinée dans la section suivante.

Les sources de pollution des eaux dans le bassin versant

Les bassins versants sont le domaine d'origine de la pollution des eaux de surface. Un bassin versant est défini comme une aire dans laquelle les eaux hydrologiques tombent, s'accumulent, sont utilisées, évacuées et, en fin de compte, déversées dans les fleuves et les cours d'eau ou autres masses d'eau. Il se compose d'un réseau de drainage qui aboutit au ruissellement ou à la collecte dans un fleuve ou un cours d'eau. Les bassins versants des grands cours d'eau sont habituellement appelés bassins hydrographiques. La figure 55.9 représente le cycle hydrologique d'un bassin versant régional. Pour une région, l'évacuation des diverses eaux peut se représenter sous la forme d'une équation simple, à savoir l'équation fondamentale de l'hydrologie proposée par Viessman, Lewis et Knapp (1989):

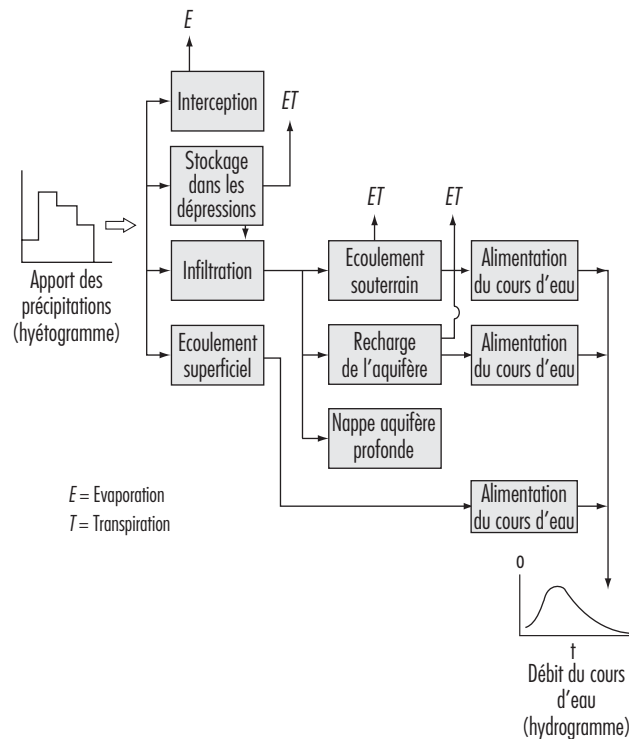
$$P - R - G - E - T = \pm S$$

dans laquelle:

P = précipitations (pluie, neige, grêle)

R = ruissellement ou écoulement à la surface du bassin versant

Figure 55.8 • Distribution des précipitations



$G = \text{eaux souterraines}$
 $E = \text{évaporation}$
 $T = \text{transpiration}$
 $S = \text{accumulation en surface}$
 Les unités caractéristiques sont des mm/an.

Les précipitations sont considérées comme la forme de départ du bilan hydrologique. Le terme de ruissellement est synonyme d'écoulement. L'accumulation se réfère aux réservoirs ou systèmes de rétention qui recueillent l'eau, comme les barrages construits sur les cours d'eau. Les eaux souterraines se réunissent en un réseau d'accumulation et peuvent s'écouler d'un endroit à un autre; il peut s'agir de flux entrants ou de flux sortants par rapport aux cours d'eau de la surface. L'évaporation est un phénomène de surface et la transpiration est associée à la transmission en provenance des biotes.

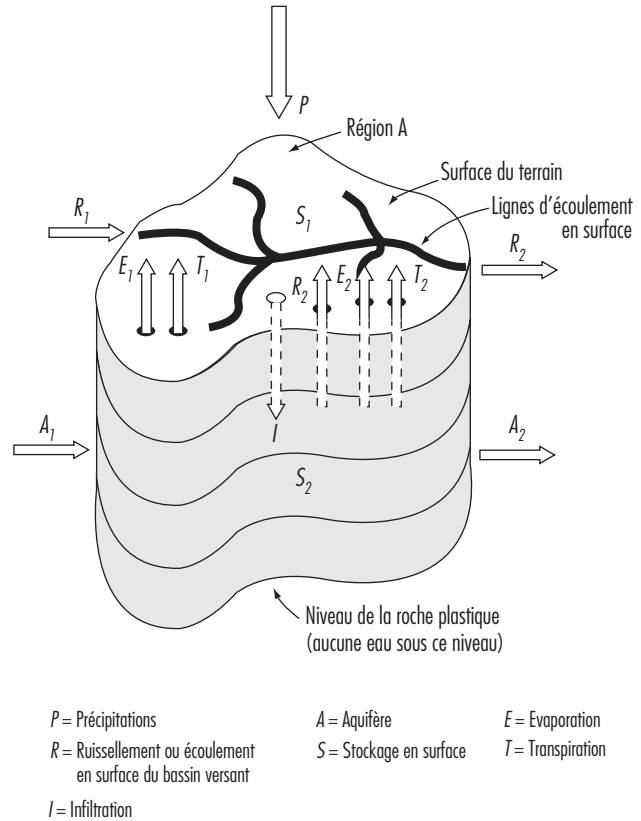
Bien que l'étendue des bassins hydrographiques soit très variable, certains systèmes de drainage sont classés, sur le plan de la pollution des eaux, comme urbains ou non urbains (agricoles, ruraux, non aménagés). La pollution à l'intérieur de ces systèmes de drainage provient des sources ci-après:

Sources ponctuelles: déchets rejetés dans une masse d'eau réceptrice à un emplacement déterminé, en un point comme un tuyau d'égout ou un type quelconque d'exutoire d'un réseau concentré.

Sources non ponctuelles (dispersées): pollution pénétrant dans une masse d'eau réceptrice à partir de sources dispersées dans le bassin hydrographique; un exemple typique est celui du drainage dans un cours d'eau des eaux de ruissellement provenant des pluies non recueillies. On les appelle parfois aussi eaux «diffuses», mais l'expression «dispersées» est considérée comme plus descriptive.

Sources intermittentes: pollution provenant d'un point ou d'une source qui rejette des effluents dans certaines circonstances, comme en cas de surcharge; un exemple caractéristique est celui du déversoir des égouts lors de pluies abondantes.

Figure 55.9 • Cycle hydrologique régional



Les polluants de l'eau dans les fleuves et les rivières

Lorsque des matières nocives provenant des sources précitées sont rejetées dans les cours d'eau ou autres masses d'eau, elles entrent dans la catégorie des polluants classés et décrits précédemment. Les polluants ou contaminants qui pénètrent dans une masse d'eau peuvent en outre être subdivisés comme suit:

- **polluants dégradables (non persistants):** impuretés qui finissent par se décomposer en substances inoffensives ou qui peuvent être extraites par des méthodes de traitement, à savoir certaines matières organiques et substances chimiques, eaux usées domestiques, effets de la chaleur, nutriments végétaux, la plupart des bactéries et virus, certains sédiments;
- **polluants non dégradables (persistants):** impuretés qui persistent dans l'eau et dont la concentration ne diminue pas, sauf si elles sont diluées ou bien extraites par traitement, c'est-à-dire certaines substances chimiques organiques et inorganiques, les sels, les matières colloïdales en suspension;
- **polluants dangereux entraînés par l'eau:** formes complexes de matières nocives, y compris les métaux en traces toxiques, certains composés inorganiques et organiques;
- **polluants radionucléides:** matières qui ont été exposées à une source radioactive.

Les réglementations de lutte contre la pollution de l'eau

Les réglementations de lutte contre la pollution de l'eau qui sont d'application générale sont d'ordinaire édictées par les organismes du gouvernement national, tandis que les règles plus détaillées le sont par l'Etat, la province, la ville, les services des eaux, les services de la conservation, les commissions d'assainissement et d'autres organes. Au niveau de la nation et de l'Etat (ou de la

province), cette tâche est habituellement du ressort de l'organisme de protection de l'environnement et du ministère de la Santé (Environmental Protection Agencies (EPA)). Dans l'examen des règlements ci-après, la présentation et certains passages s'inspirent des normes de qualité de l'eau actuellement en vigueur dans l'Etat de l'Ohio aux Etats-Unis.

Les désignations d'utilisation en fonction de la qualité de l'eau

Le but ultime de la lutte contre la pollution de l'eau est de réduire à zéro le rejet de polluants, mais il n'est généralement pas possible d'atteindre complètement cet objectif en raison de son coût. La méthode adoptée de préférence consiste à imposer des limitations aux rejets de déchets de manière à protéger raisonnablement la santé humaine et l'environnement. Bien que ces normes puissent varier fortement selon les juridictions, on prend généralement comme base la désignation de l'utilisation de masses d'eau déterminées, comme on le verra brièvement ci-dessous.

L'approvisionnement en eau comprend:

- *le système public de distribution d'eau de consommation:* eau qui peut être consommée par l'humain une fois traitée par les moyens classiques;
- *la distribution pour l'agriculture:* eau convenant à l'irrigation et au bétail, sans traitement;
- *l'approvisionnement de l'industrie et du commerce:* eau convenant aux usages industriels et commerciaux, avec ou sans traitement.

Les eaux utilisées pour les activités récréatives comprennent:

- *les eaux de baignade:* celles qui se prêtent à la natation pendant certaines saisons et dont la qualité est approuvée en même temps que les conditions et installations de protection;
- *les eaux de contact primaire:* celles qui se prêtent pendant certaines saisons à des activités récréatives entraînant le contact complet du corps comme la natation, le canoë et la plongée sous-marine et dont la qualité présente un risque minimal pour la santé publique;
- *les eaux de contact secondaire:* celles qui se prêtent pendant certaines saisons à des activités récréatives entraînant le contact partiel du corps (marcher dans l'eau par exemple) et qui présentent un risque minimal pour la santé publique du fait de la qualité de l'eau.

Les ressources publiques en eau sont définies comme les masses d'eau qui se trouvent dans les parcs, les zones humides, les zones protégées de la faune et de la flore sauvages, les rivières à l'état sauvage, celles qui présentent un intérêt pour le tourisme ou les loisirs et les lacs du domaine public, ainsi que les eaux d'une importance exceptionnelle sur le plan récréatif ou écologique.

Les habitats de la faune et de la flore aquatiques

Les désignations varient selon les climats, mais elles se rapportent aux conditions nécessaires à la vie de certains organismes aquatiques dans les masses d'eau, spécialement les diverses espèces de poissons. Les désignations de l'utilisation dans un climat tempéré, telles que définies dans la réglementation de l'Agence de protection de l'environnement (EPA) pour l'Etat de l'Ohio, sont indiquées ci-après, sans être précisées davantage:

- eaux chaudes;
- eaux moyennement chaudes;
- eaux chaudes dans des conditions exceptionnelles;
- eaux chaudes modifiées;
- eaux saisonnièrement salmonifères;
- eaux froides;
- eaux de ressources limitées.

Les critères de lutte contre la pollution des eaux

Les eaux naturelles et les eaux usées sont caractérisées par leur composition physique, chimique et biologique. Les principales propriétés physiques et les composants chimiques et biologiques des eaux usées et de leurs sources forment une longue liste qui figure dans le manuel de Metcalf and Eddy, Inc. (1991). Les méthodes analytiques utilisées pour ces définitions sont données dans un ouvrage largement utilisé publié par l'Association américaine de santé publique (American Public Health Association (APHA)) sous le titre *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1995).

Chaque masse d'eau définie devrait faire l'objet d'une réglementation comportant des critères fondamentaux et des critères numériques plus précis comme on le verra brièvement plus loin.

Critères de base pour l'absence de pollution. Dans la mesure du possible, toutes les masses d'eau devraient satisfaire aux cinq critères fondamentaux ci-après:

1. être libres de matières solides en suspension ou d'autres substances pénétrant dans les eaux par suite d'activités humaines et qui s'y déposent sous forme de boues putrides ou désagréables pour une autre raison, ou qui ont une influence néfaste sur les organismes aquatiques;
2. être libres de débris flottants, d'huile, de mousse et d'autres matières flottantes pénétrant dans les eaux par suite d'activités humaines en quantités suffisantes pour être déplorables ou pour causer une détérioration;
3. être libres de matières pénétrant dans l'eau par suite d'activités humaines et produisant une couleur, une odeur ou un autre état à un degré suffisant pour créer une nuisance;
4. être libres de substances pénétrant dans l'eau par suite d'activités humaines, dans des concentrations toxiques ou nocives pour l'être humain, la faune et la flore ou les organismes aquatiques et qui deviennent rapidement létales dans la zone de brassage;
5. être libres de nutriments pénétrant dans l'eau sous l'effet d'activités humaines, dans des concentrations entraînant une croissance des herbes aquatiques et des algues qui en font une nuisance.

Les critères de qualité de l'eau consistent en limites numériques et en directives pour le contrôle des composants chimiques, biologiques et toxiques présents dans les masses d'eau.

Comme il y a aujourd'hui plus de 70 000 composés chimiques en usage, il est pratiquement impossible de définir des mesures de réglementation pour chacun d'eux. On peut cependant fixer des critères pour les substances chimiques en se fondant sur des limites, établies en fonction de trois grandes catégories de consommation et d'exposition:

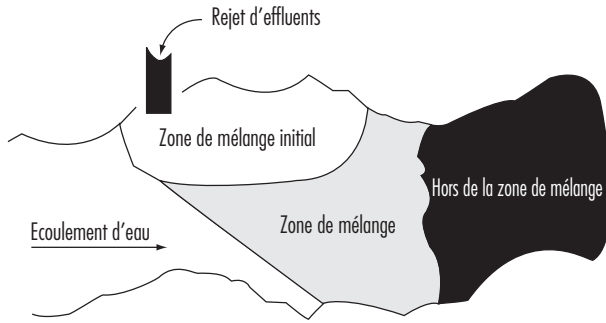
Catégorie 1: les critères chimiques de protection de la santé de l'être humain sont d'importance primordiale et devraient être fixés conformément aux recommandations des organes gouvernementaux de la santé, de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et des organismes de recherche reconnus dans ce domaine.

Catégorie 2: les critères chimiques de contrôle de l'eau destinée à l'agriculture devraient reposer sur des études et des recommandations scientifiques reconnues qui protègent les cultures et le bétail contre les effets nocifs de l'irrigation des champs et de la consommation d'eau par le bétail.

Catégorie 3: les critères chimiques de protection des organismes aquatiques devraient reposer sur des études scientifiques reconnues concernant la sensibilité de ces espèces à des substances chimiques déterminées et tenir compte de la consommation par l'humain de poissons et de produits de la mer.

Les critères applicables aux rejets d'eaux usées concernent les limites imposées aux polluants présents dans ces effluents et cons-

Figure 55.10 • Zones de mélange



Source: State of Ohio, 1995.

tituent une autre méthode de réglementation. Ils peuvent être fixés en fonction des désignations d'utilisation des masses d'eau et dans le cadre des catégories de critères chimiques ci-dessus.

Les critères biologiques reposent sur les conditions d'habitat des masses d'eau qui sont nécessaires aux organismes aquatiques.

La teneur en matières organiques des eaux usées et des eaux naturelles

La teneur brute en matières organiques est extrêmement importante pour définir le pouvoir de pollution des eaux usées et des eaux naturelles. On a généralement recours pour ce faire à trois essais en laboratoire:

La demande biochimique en oxygène (DBO): la demande biochimique sur cinq jours (DBO5) est le paramètre le plus largement employé; il sert à mesurer la quantité d'oxygène dissous utilisée par les micro-organismes pour décomposer pendant cette période les matières organiques par oxydation biologique.

La demande chimique en oxygène (DCO): ce paramètre sert à mesurer les matières organiques des déchets municipaux et industriels qui contiennent des composés toxiques pour la vie biologique; il mesure la quantité d'oxygène consommée par l'oxydation d'une quantité équivalente de matières organiques.

Le carbone organique total (COT): cet essai s'applique spécialement aux faibles concentrations de matières organiques dans l'eau; c'est une mesure de la quantité de matières organiques qui sont oxydées pour former du dioxyde de carbone.

La réglementation antidégradation

Cette réglementation offre une autre solution pour empêcher la pollution de l'eau de progresser au-delà de certaines limites. A titre d'exemple, on citera les trois niveaux de protection contre la dégradation définis dans les normes de qualité de l'eau de l'EPA de l'Etat de l'Ohio:

Niveau 1: les utilisations existantes doivent être maintenues et protégées. Aucune autre dégradation de la qualité de l'eau n'est autorisée si elle peut gêner les utilisations désignées existantes.

Niveau 2: il faut ensuite maintenir une qualité de l'eau meilleure que celle qui est indispensable pour protéger les utilisations, sauf s'il est attesté qu'une qualité inférieure est nécessaire pour des raisons économiques ou sociales importantes, qui sont déterminées par le directeur de l'EPA.

Niveau 3: enfin, il faut maintenir et protéger la qualité des eaux qui constituent les ressources hydriques. Leur qualité ambiante existante ne peut ni être dégradée par aucune substance jugée toxique ni gêner aucune utilisation désignée. Des charges accrues de polluants ne pourront être rejetées dans les masses d'eau que si elles n'ont pas pour effet d'abaisser la qualité existante.

Les zones de mélange des polluants rejetés dans l'eau et la modélisation de la charge autorisée de matières

Les zones de mélange sont les étendues d'une masse d'eau qui permettent aux eaux usées, traitées ou non traitées qui y sont déversées d'atteindre des conditions stables, comme le montre la figure 55.10 pour un cours d'eau. Les effluents se trouvent d'abord dans un état transitoire, puis se diluent progressivement par rapport à leur concentration à la source pour atteindre l'état de l'eau du récepteur. Ces zones ne doivent pas être considérées comme un lieu de traitement et elles peuvent être délimitées et soumises à des restrictions bien précises. En général, les zones de mélange ne doivent pas:

- gêner la migration, la survie, la reproduction ou la croissance des organismes aquatiques;
- inclure des zones de frai ou d'alevinage;
- comporter des points de prélèvement pour le réseau de distribution d'eau;
- inclure des zones de baignade;
- s'étendre sur plus de la moitié de la largeur d'un cours d'eau;
- s'étendre sur plus de la moitié de la section transversale de l'embouchure d'un cours d'eau;
- s'étendre en aval sur une distance supérieure au quintuple de la largeur du cours d'eau.

Les études sur les concentrations autorisées d'eaux usées pour éviter l'eutrophisation (définie ci-après) ont pris de l'importance en raison du coût élevé de la lutte contre les nutriments contenus dans les eaux usées déversées. Ces études utilisent généralement des modèles informatisés pour simuler la qualité de l'eau dans un courant, particulièrement en ce qui concerne les nutriments sous forme d'azote et de phosphore, qui influent sur la dynamique de l'oxygène dissous. Le modèle QUAL2E de l'EPA, aux Etats-Unis, décrit par Brown et Barnwell (1987) est un exemple typique de ces outils classiques. Un instrument plus récent proposé par Taylor (1995) est le modèle OMNI diurne (OMNI Diurnal Model (ODM)) qui comporte une simulation de l'impact des plantes aquatiques sur les nutriments dans le cours d'eau et la dynamique de l'oxygène dissous.

Les dérogations prévues

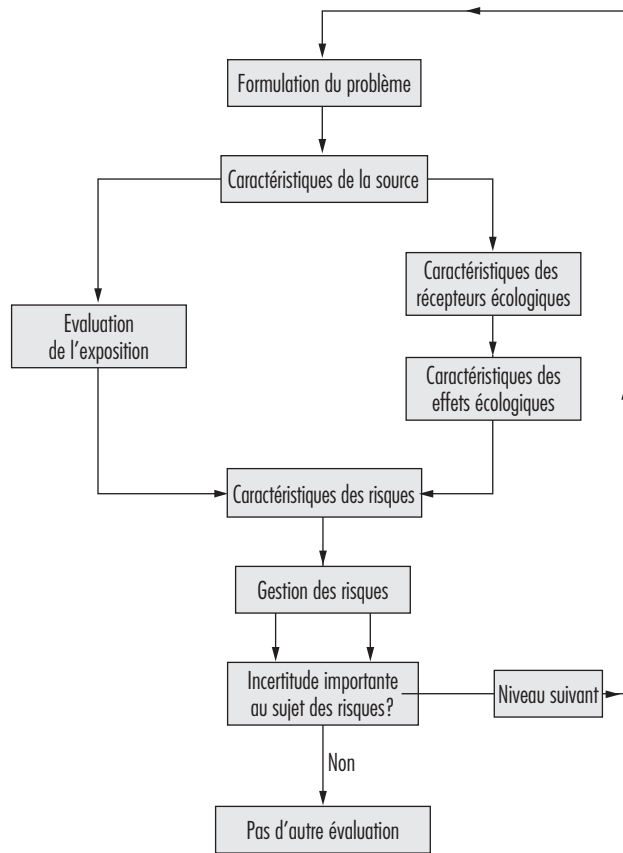
Toutes les réglementations de lutte contre la pollution de l'eau sont imparfaites et doivent donc comprendre des dispositions qui permettent d'y déroger lorsque certaines circonstances empêchent de s'y conformer immédiatement ou intégralement.

L'évaluation et la gestion des risques concernant la pollution de l'eau

Les mesures antipollution décrites ci-dessus sont caractéristiques des approches utilisées dans le monde entier par les pouvoirs publics pour obtenir le respect de normes de qualité et imposer des limites au rejet des eaux usées. En général, ces réglementations ont été établies sur la base de considérations sanitaires et de recherches scientifiques; en cas d'incertitude quant aux effets possibles, on applique souvent des coefficients de sécurité. L'application de certaines de ces réglementations peut s'avérer peu rationnelle et excessivement coûteuse pour la société et les entreprises privées. On cherche donc de plus en plus à allouer plus efficacement les ressources pour atteindre une meilleure qualité de l'eau. Comme on l'a vu précédemment dans l'examen des ressources hydrologiques, la pureté parfaite n'existe pas, même dans les eaux à l'état naturel.

Une démarche qui gagne en popularité consiste à évaluer et à gérer les risques écologiques pour fixer des règles antipollution. Ce principe repose sur une analyse des coûts et avantages écologiques du respect des normes ou limites. Parkhurst (1995) propose de recourir à l'évaluation des risques écologiques pour faciliter la définition des limites de la pollution de l'eau, particulièrement en

Figure 55.11 • Méthodes d'évaluation des risques pour différents niveaux successifs d'analyse. Niveau 1: présélection; niveau 2: quantification des risques pouvant être importants; niveau 3: quantification des risques sur des sites déterminés



ce qui concerne la protection des organismes aquatiques. Ces méthodes d'évaluation des risques peuvent servir à estimer les effets écologiques des concentrations chimiques dans un large éventail de cas de pollution des eaux de surface, notamment:

- la pollution par des sources ponctuelles;
- la pollution par des sources non ponctuelles;
- les sédiments contaminés présents dans les cours d'eau;
- les emplacements de déchets dangereux par rapport aux masses d'eau;
- l'analyse des critères existants de lutte contre la pollution de l'eau.

La méthode envisagée comporte trois étapes, comme l'indique la figure 55.11 qui en donne une illustration.

La pollution des eaux des lacs et des réservoirs

Les lacs et les réservoirs assurent le stockage de l'eau apportée par le bassin versant et peuvent avoir de longs temps de résidence par rapport au flux qui entre et sort rapidement d'un tronçon de rivière. Ils revêtent donc une importance spéciale pour la rétention de certains composants, en particulier les nutriments comprenant des formes d'azote et de phosphore qui favorisent l'eutrophisation. Celle-ci est un processus de vieillissement naturel dans

lequel l'eau s'enrichit organiquement, ce qui aboutit à la prolifération des plantes aquatiques indésirables comme les algues, la jacinthe d'eau, etc. L'eutrophisation tend à réduire la faune et la flore aquatiques et a des effets nocifs sur l'oxygène dissous. Les sources de nutriments, d'origine naturelle ou humaine, peuvent toutes deux faciliter ce processus, comme le montre Preul (1974) à la figure 55.12, où l'on trouve une liste schématique des sources et réservoirs de nutriments du lac Sunapee, dans l'Etat du New Hampshire, aux Etats-Unis.

On peut évidemment chercher à connaître l'état d'eutrophisation des lacs et des réservoirs en y prélevant des échantillons que l'on analysera. Les études analytiques commencent d'ordinaire par un bilan de base des nutriments comme celui-ci:

$$\text{nutriments entrant dans le lac} = \text{nutriments sortant du lac} + \text{nutriments retenus dans le lac}$$

Ce bilan de base peut être élargi par l'inclusion des diverses sources, comme on le voit à la figure 55.12.

Le temps de résidence est une indication des divers paramètres de la rétention d'un système lacustre donné. Les lacs peu profonds comme le lac Erié ont des temps de résidence relativement brefs et connaissent une eutrophisation prononcée parce qu'ils sont souvent plus propices à la croissance des plantes aquatiques. Les lacs profonds comme le lac Tahoe et le lac Supérieur ont de très longs temps de résidence, qui sont généralement caractéristiques des lacs à eutrophisation minimale parce qu'ils n'ont pas été surchargés jusqu'à présent et parce que leur grande profondeur n'est pas propice à une croissance étendue des plantes aquatiques, exception faite de l'épilimnion (couche supérieure). Les lacs de cette catégorie sont généralement considérés comme oligotrophiques, du fait qu'ils sont relativement pauvres en nutriments et donnent lieu à une prolifération aquatique minimale, par exemple celle des algues.

Il est intéressant de comparer les temps de résidence de certains grands lacs des Etats-Unis indiqués par Pecor (1973) à l'aide de la formule suivante:

$$\text{temps de résidence du lac [TRL]} = \frac{\text{volume de stockage du lac}}{\text{débit de l'exutoire}}$$

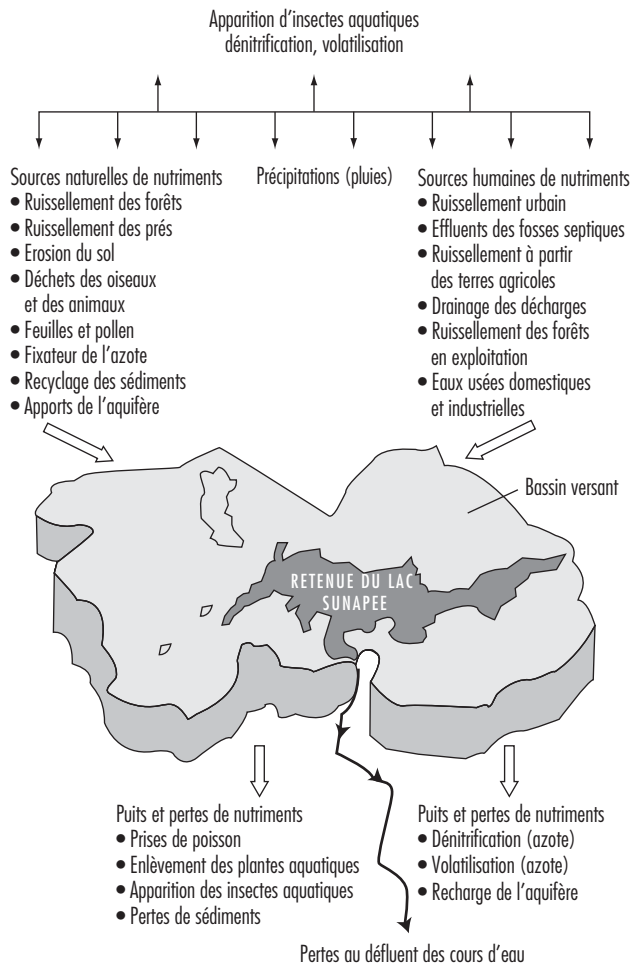
Voici certains exemples: lac Wabesa (Michigan), TRL = 0,3 an; lac Houghton (Michigan), 1,4 an; lac Erié, 2,6 ans; lac Supérieur, 191 ans; lac Tahoe, 700 ans.

Bien que le rapport entre le processus d'eutrophisation et la teneur en nutriments soit complexe, le phosphore est généralement reconnu comme le nutriment limitatif. Se fondant sur une situation de mélange complet, Sawyer (1947) signale que les algues tendent à proliférer si les valeurs d'azote dépassent 0,3 mg/litre et celles de phosphore 0,01 mg/litre. Dans les lacs et réservoirs à stratification thermique, les faibles niveaux d'oxygène dissous dans l'hypolimnion sont les premiers signes d'eutrophisation. Vollenweider (1968, 1969) a calculé les niveaux de concentration critiques en phosphore total et azote total pour un certain nombre de lacs en se fondant sur les concentrations en nutriments, les profondeurs moyennes et les niveaux trophiques. A titre de comparaison des travaux réalisés sur cette question, citons Dillon (1974) qui a publié une étude critique du modèle de bilan des nutriments proposé par Vollenweider et d'autres modèles du même ordre. Il existe aussi des modèles informatisés plus récents pour simuler les cycles azote/phosphore en fonction de la température.

La pollution des eaux des estuaires

L'estuaire est la voie de passage intermédiaire des eaux entre l'embouchure d'un fleuve et la côte. Cette voie est formée d'un chenal d'embouchure qui reçoit l'eau venue d'amont (eau douce) et la déverse en aval dans l'eau de mer (eau salée) du cours inférieur dont le niveau change constamment. Les estuaires sont

Figure 55.12 • Liste schématique des sources et puits de nutriments (azote et phosphore) du lac Sunapee, New Hampshire (États-Unis)



continuellement influencés par les fluctuations dues aux marées et ils forment l'une des masses d'eau les plus complexes sur le plan de la lutte contre la pollution de l'eau. Ils ont pour caractéristiques dominantes une salinité variable, une «langue» salée ou interface entre l'eau salée et l'eau douce et, souvent, de vastes étendues aquatiques peu profondes et troubles qui recouvrent des replats boueux et des marais saumâtres. Les nutriments leur sont fournis essentiellement par l'eau d'amont et se combinent au milieu marin pour donner naissance à une production prolifique de biotes et d'organismes marins. Les fruits de mer récoltés dans les estuaires sont particulièrement appréciés.

Sous l'angle de la pollution des eaux, les estuaires sont d'une complexité qui varie avec chacun d'eux et exigent généralement des enquêtes spéciales faisant appel à de vastes études sur le terrain et à la modélisation informatisée. Pour en savoir davantage, on se reportera à Reish, 1979, au sujet de la pollution marine et estuarienne, et à Reid et Wood, 1976, quant à l'écologie des eaux intérieures et des estuaires.

La pollution de l'eau dans les milieux marins

On peut considérer les océans comme le récepteur ou réservoir ultime, puisque les déchets charriés par les cours d'eau finissent

par être rejetés dans le milieu marin. Même si les océans sont de vastes étendues d'eau salée à capacité d'assimilation apparemment illimitée, la pollution tend à dégrader leur littoral et elle perturbe en outre la faune et la flore marines.

Les sources de polluants du milieu marin comprennent un grand nombre de celles que l'on trouve dans les eaux usées d'origine continentale, auxquelles s'ajoutent les sources liées à l'exploitation des mers. Une liste partielle en est donnée ci-après:

- eaux usées et boues domestiques, déchets industriels, déchets solides, déchets rejetés par les navires;
- déchets des pêcheries, sédiments et nutriments provenant des cours d'eau et du ruissellement terrestre;
- rejets d'hydrocarbures, déchets de la prospection et de l'extraction pétrolière en mer, opérations de dragage;
- chaleur, déchets radioactifs, substances chimiques, pesticides et herbicides rejetés.

Chacune de ces sources nécessite un traitement spécial et des méthodes particulières de lutte. Le déversement des eaux usées municipales et des boues d'égout dans l'océan par les exutoires est sans doute la principale source de pollution marine.

Pour connaître l'état actuel de la question, le lecteur se reportera au livre de Bishop (1983) sur la pollution des mers et les moyens de lutter contre elle.

Les techniques de réduction de la pollution engendrée par le déversement des eaux usées

L'épuration à grande échelle des eaux usées est généralement réalisée par les municipalités, les agences de bassin, l'industrie, les entreprises commerciales et diverses commissions de lutte contre la pollution. Nous nous attacherons ici à décrire les méthodes actuelles de traitement des eaux usées municipales et à donner ensuite quelques précisions sur celui des déchets industriels et sur les méthodes plus perfectionnées.

Dans l'ensemble, tous les procédés de traitement des eaux usées appartiennent à l'un des trois types ci-après: physique, chimique ou biologique, et l'on peut employer un ou plusieurs d'entre eux pour obtenir l'effluent voulu. Cette classification, très utile pour comprendre les méthodes de traitement des eaux usées, est présentée au tableau 55.15.

Les méthodes actuelles de traitement des eaux usées

Nous n'en examinerons que quelques-unes, notre intention étant de donner un aperçu des méthodes de traitement actuellement

Tableau 55.15 • Classification générale des opérations et procédés de traitement des eaux usées

Opérations physiques	Procédés chimiques	Procédés biologiques
Mesure des débits	Précipitation	Processus aérobie
Tri/dessablage	Neutralisation	Processus anaérobie
Brassage	Adsorption	Combinaisons aérobie-anaérobie
Flottation	Désinfection	
Sédimentation	Oxydation chimique	
Flottation	Réduction chimique	
Filtration	Incinération	
Séchage	Echange d'ions	
Distillation	Electrodialyse	
Centrifugation		
Réfrigération		
Osmose inverse		

utilisées dans le monde plutôt que de décrire en détail leur conception. Pour en savoir davantage sur ce dernier point, on consultera Metcalf and Eddy, Inc., 1991.

Les eaux usées municipales mélangées en quantité variable à des déchets industriels ou commerciaux sont épurées dans des systèmes qui procèdent d'ordinaire aux traitements primaire, secondaire et tertiaire, comme suit:

Système de traitement primaire: prétraitement → décantation primaire → désinfection (chloration) → effluents

Système de traitement secondaire: prétraitement → décantation primaire → installation biologique → décantation secondaire → désinfection (chloration) → envoi des effluents au récepteur

Système de traitement tertiaire: prétraitement → décantation primaire → installation biologique → décantation secondaire → installation de traitement tertiaire → désinfection (chloration) → envoi des effluents au récepteur

La figure 55.13 présente le schéma d'un système classique d'épuration des eaux usées. On trouvera ci-après un aperçu des procédés mentionnés ci-dessus.

Le traitement primaire

Le traitement primaire des eaux usées municipales, y compris les eaux usées domestiques mélangées dans une certaine mesure à des effluents industriels ou commerciaux, a principalement pour objectif d'éliminer les solides en suspension et de clarifier les eaux pour qu'elles se prêtent à un traitement biologique. Après un traitement tel que tri, dessablage et dilacération, le principal procédé de sédimentation primaire est la décantation des eaux usées brutes dans de grands bassins pendant une période pouvant atteindre plusieurs heures. Ce procédé extrait de 50 à 75% du total des solides en suspension, soutirés sous forme de boues qui seront soumises à un traitement distinct. L'eau décantée est alors dirigée vers un traitement secondaire. Dans certains cas, on peut utiliser des produits chimiques pour améliorer le rendement du traitement primaire.

Le traitement secondaire

La partie du contenu organique des eaux usées en suspension fine ou en solution qui ne peut être extraite par le procédé primaire fait l'objet d'un traitement secondaire. Les systèmes généralement acceptés et couramment utilisés pour ce traitement sont les lits bactériens, les dispositifs de contact tels que les disques biologiques verticaux rotatifs, les bassins à boues activées, les étangs d'aération et les méthodes d'épandage sur les terres, y compris les terres humides. Tous ces systèmes font appel à des processus biologiques, sous une forme ou une autre. Les plus courants d'entre eux sont brièvement examinés ci-après.

Systèmes à biomasse fixée. Les lits bactériens sont l'une des formes les plus anciennes de cette méthode de traitement secondaire et sont encore largement employés en liaison avec certains procédés améliorés d'épandage. Par ce traitement, les effluents provenant des bassins primaires sont répandus uniformément sur un lit de matériaux tels que cailloux ou éléments en plastique synthétique. On obtient une répartition uniforme en arrosant le lit par un dispositif rotatif de tuyaux perforés qui tournent de façon intermittente ou continue au-dessus du lit, en fonction du procédé désiré. Selon le taux de concentration en matières organiques et la charge hydraulique, les filtres percolateurs peuvent extraire jusqu'à 95% des matières organiques, habituellement déterminées comme demande biologique en oxygène (DBO). Il existe de nombreux autres systèmes plus récents à disques biologiques qui peuvent assurer une épuration du même ordre; certaines de ces méthodes présentent des avantages particuliers, intéressants lorsqu'il existe des facteurs limitatifs, comme la place disponible, le climat, etc. Il convient de noter qu'un bassin secondaire de

décantation est nécessaire pour compléter le processus. On en soutire la boue biologique ou secondaire, tandis que l'eau décantée est rejetée en tant qu'effluent secondaire.

Boues activées. C'est le procédé biologique le plus courant. Les effluents qui ont subi le traitement primaire s'écoulent dans un bassin contenant déjà une biomasse en suspension appelée boue activée. Ce mélange ou «matières en suspension de la liqueur mixte», est laissé en contact pendant une période qui varie de plusieurs heures à 24 heures ou davantage, selon les résultats désirés. Pendant cette période, le mélange est fortement aéré et agité pour favoriser l'activité biologique aérobie. En fin de processus, une partie du mélange est soutirée et remise en circulation en tête de bassin pour entretenir l'activation biologique. Une décantation secondaire suit le passage par les boues activées, et les eaux décantées se déversent sous forme d'effluents. Grâce à ce processus, on peut extraire jusqu'à 95% de la DBO des affluents.

Le traitement tertiaire

Un troisième niveau de traitement peut avoir lieu s'il faut parvenir à une élimination plus complète des polluants. En général, il prend la forme de filtration sur sable, dans des bassins de stabilisation, par épandage sur les terres et les terres humides et par d'autres systèmes qui stabilisent davantage les effluents secondaires.

La désinfection des effluents

D'ordinaire, il faut procéder à une désinfection pour réduire à des niveaux acceptables les concentrations en bactéries et en pathogènes. L'addition de chlore, le dioxyde de chlore, l'ozone et les rayonnements ultraviolets sont les moyens les plus couramment employés.

L'efficacité générale des installations de traitement des eaux usées

Les eaux usées contiennent une grande variété de composants qui sont généralement subdivisés en solides en suspension et matières en solution, en composants inorganiques et en composés organiques.

L'efficacité d'un système de traitement se mesure d'après le pourcentage d'élimination de ces composants. Les paramètres de mesure courants sont les suivants:

- *DBO:* demande biologique en oxygène, mesurée en mg/litre;
- *DCO:* demande chimique en oxygène, mesurée en mg/litre;
- *TSS:* total des solides en suspension, mesuré en mg/litre;
- *TSD:* total des solides dissous, mesuré en mg/litre;

Figure 55.13 • Schéma du traitement classique des eaux usées

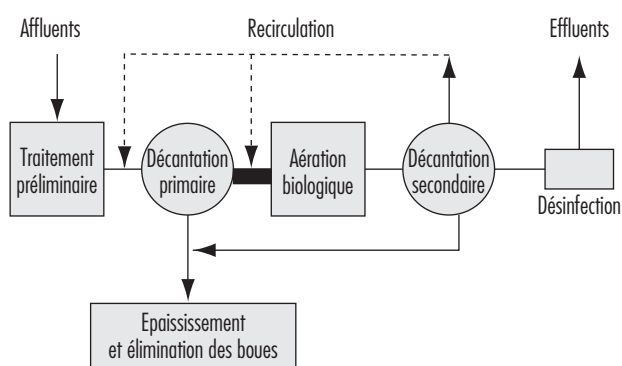
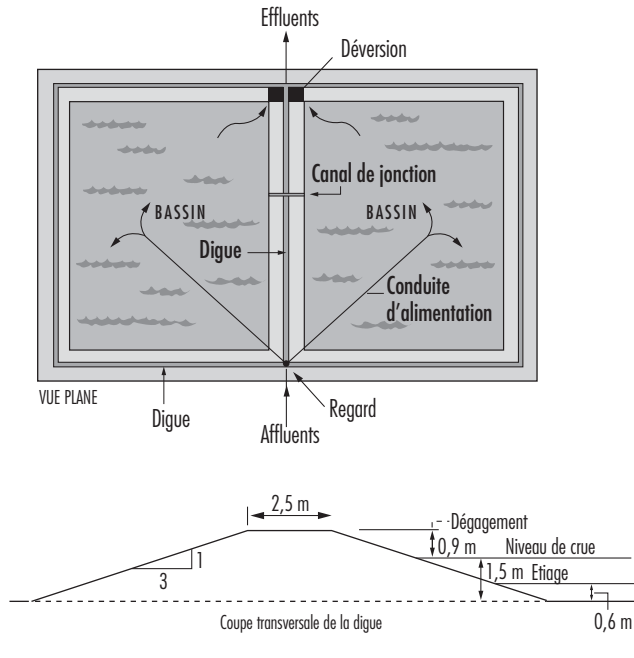


Figure 55.14 • Bassin de stabilisation à deux compartiments: coupe transversale



- *formes azotées*: nitrate et ammoniac, mesurés en mg/litre (le nitrate est particulièrement important en tant que nutriment dans le phénomène de l'eutrophisation);
- *phosphate*: mesuré en mg/litre (également très important comme nutriment dans l'eutrophisation);
- *pH*: degré d'acidité, mesuré selon une échelle allant de 1 (le plus acide) à 14 (le plus alcalin);
- *comptage des colibacilles*: mesuré comme le nombre le plus probable par 100 ml (*Escherichia* et les colibacilles fécaux sont les indicateurs les plus courants).

Le traitement des eaux résiduaires industrielles

Les types de déchets industriels

Les rejets industriels (non ménagers) sont nombreux et d'une composition très variée; ils peuvent être très acides ou très alcalins et exigent souvent une analyse approfondie en laboratoire. Un traitement spécialisé peut s'imposer pour les rendre inoffensifs avant leur rejet. La toxicité revêt une grande importance dans l'évacuation des eaux résiduaires industrielles.

Les principales sources de rejets industriels sont: les papeteries, abattoirs, brasseries, tanneries, industries alimentaires, conserveries, industries chimiques et pétrolières, textiles, sucreries, blanchisseries, production de viandes et volailles, élevages de porcs, et bien d'autres. Pour choisir la méthode de traitement, il faut commencer par une étude des rejets industriels, qui donnera des indications sur les variations des apports et les caractéristiques des matières rejetées. Les caractéristiques des rejets indésirables données par Eckenfelder (1989) peuvent se résumer comme suit:

- substances organiques solubles entraînant une diminution de l'oxygène dissous dans l'eau;
- solides en suspension;
- matières organiques en traces;
- métaux lourds, cyanures et matières organiques toxiques;
- couleur et turbidité;

- azote et phosphore;
- substances réfractaires résistant à la biodégradation;
- huiles et matières flottantes;
- matières volatiles.

L'EPA, aux Etats-Unis, a défini en outre une liste de substances chimiques toxiques, organiques et inorganiques, qui font l'objet de limitations spéciales dans l'octroi des permis de rejet. Cette liste comprend plus de 100 composés; elle est trop longue pour être reproduite ici, mais elle peut être obtenue auprès de l'EPA.

Les méthodes de traitement

Le traitement des effluents industriels est plus spécialisé que celui des déchets ménagers; lorsqu'ils se prêtent à l'épuration biologique, ils sont toutefois traités selon des méthodes semblables à celles décrites précédemment (traitement biologique secondaire/tertiaire) pour les systèmes municipaux.

Les bassins de stabilisation des effluents sont une méthode courante de traitement des eaux usées organiques lorsqu'on dispose d'assez de terrain. Les bassins à écoulement continu sont généralement classés en fonction de leur activité bactérienne en bassins aérobies, facultatifs ou anaérobies. Les bassins aérés sont alimentés en oxygène au moyen de systèmes d'aération par diffusion ou mécanique.

Les figures 55.14 et 55.15 présentent des schémas de bassins de stabilisation des déchets.

La prévention de la pollution et la réduction des rejets au minimum

Si l'on analyse les effluents industriels à leur source, au niveau des opérations et procédés de fabrication à l'usine, on peut souvent agir de manière à empêcher le rejet d'importantes quantités de polluants.

Les techniques de recyclage jouent un rôle important dans les programmes de prévention de la pollution. Un exemple classique est celui du plan de recyclage des eaux usées rejetées par une tannerie de cuir, publié par Preul (1981), qui comprenait la récupération/réutilisation du chrome, ainsi que le recyclage complet de toutes les eaux usées de la tannerie, de sorte qu'aucun effluent n'était déversé dans les cours d'eau, sauf en cas d'urgence. Le schéma de ce système est indiqué à la figure 55.16.

Pour trouver des exemples plus récents et novateurs de cette technique, le lecteur est invité à se reporter à une publication de la Water Environment Federation (1995) sur la prévention de la pollution et la réduction des rejets.

Les méthodes perfectionnées de traitement des eaux usées

Il existe un certain nombre de méthodes perfectionnées pour obtenir un meilleur degré d'élimination des constituants des polluants, selon les besoins. En voici une énumération générale:

Figure 55.15 • Types de lagunes d'aération: schéma

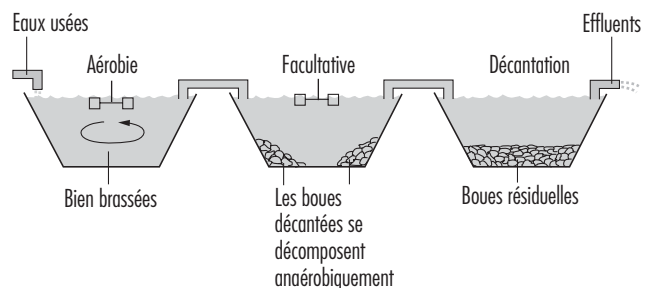
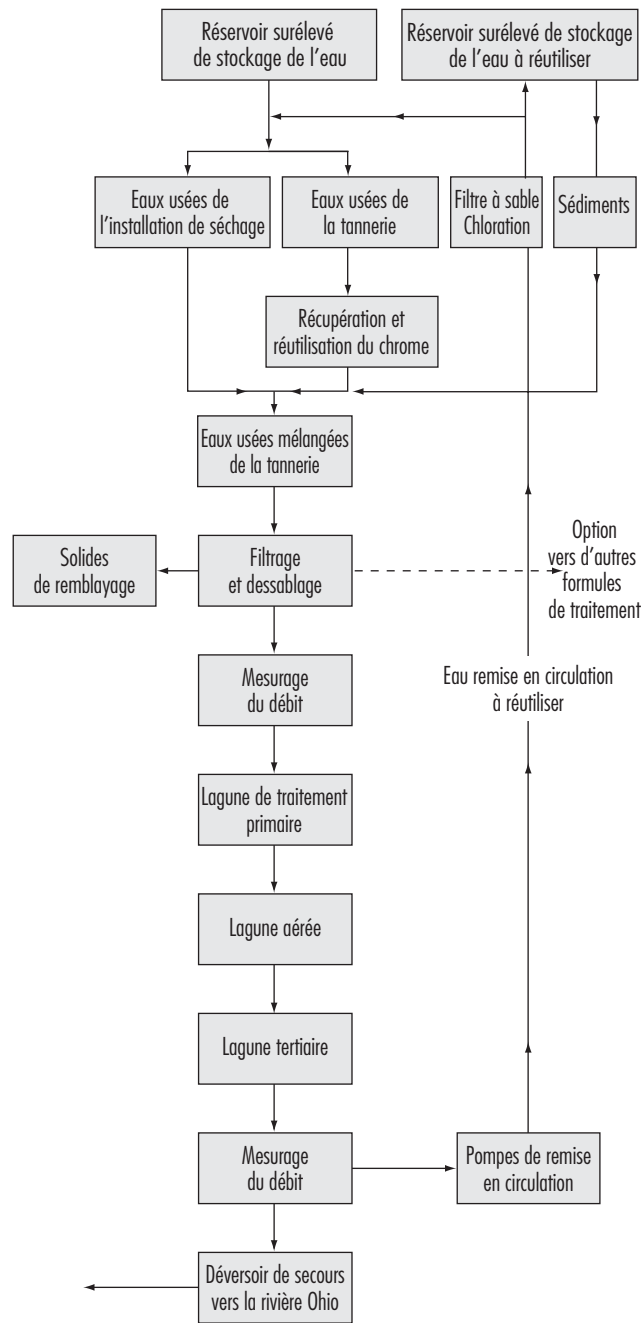


Figure 55.16 • Diagramme de flux d'un système de recyclage des eaux usées d'une tannerie



- filtration (sur sable et milieux multiples);
- précipitation chimique;
- adsorption sur charbon actif;
- électrodialyse;
- distillation;
- nitrification;
- récolte des algues;
- valorisation des effluents;
- microtamisage;
- strippage de l'ammoniaque;

- osmose inverse;
- échange d'ions;
- épandage sur les terres;
- dénitrification;
- zones humides.

Le choix du procédé qui convient le mieux à une situation donnée doit être fait en fonction de la qualité et de la quantité des eaux usées brutes, des exigences des eaux réceptrices et, bien entendu, des coûts. Pour avoir plus de précisions, se reporter à Metcalf and Eddy, Inc., 1991, qui contient un chapitre sur les techniques avancées de traitement des eaux usées.

Etude de cas du traitement perfectionné des eaux usées

L'étude de cas du Projet de régénération des eaux usées dans la région de Dan, décrit dans l'article suivant du présent chapitre, offre un excellent exemple de méthode novatrice de traitement et de valorisation des eaux usées.

La pollution thermique

La pollution thermique est une forme de rejet industriel, défini comme une augmentation ou une réduction nocive des températures normales de l'eau dans les eaux réceptrices causée par l'évacuation de la chaleur provenant des installations techniques. Les industries grandes productrices de rejets thermiques sont les centrales fonctionnant aux combustibles fossiles (pétrole, gaz et charbon) et les centrales nucléaires, les aciéries, les raffineries de pétrole, les usines chimiques, les papeteries, les distilleries et les blanchisseries. Particulièrement préoccupantes sont les centrales électriques qui fournissent l'énergie dans un grand nombre de pays (aux Etats-Unis, par exemple, à raison d'environ 80%).

L'impact des rejets thermiques sur les eaux réceptrices

L'influence sur la capacité d'autoépuration naturelle

- La chaleur augmente l'oxydation biologique.
- La chaleur diminue la teneur de saturation en oxygène de l'eau et réduit le taux de réoxygénation naturelle.

Figure 55.17 • Echange thermique aux frontières d'une masse d'eau réceptrice

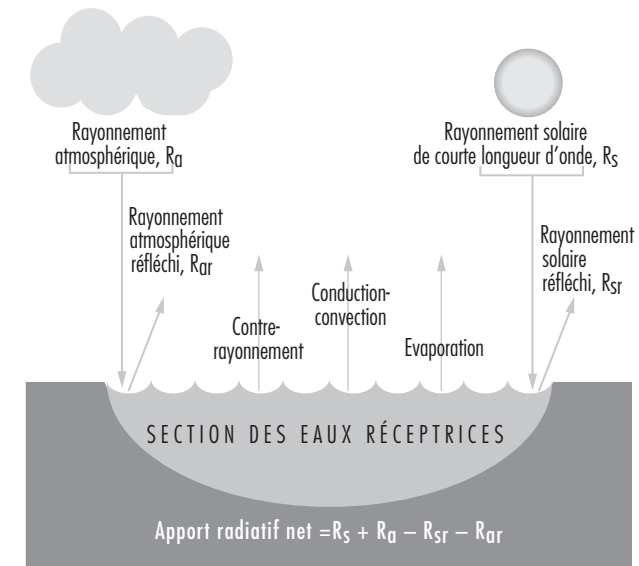
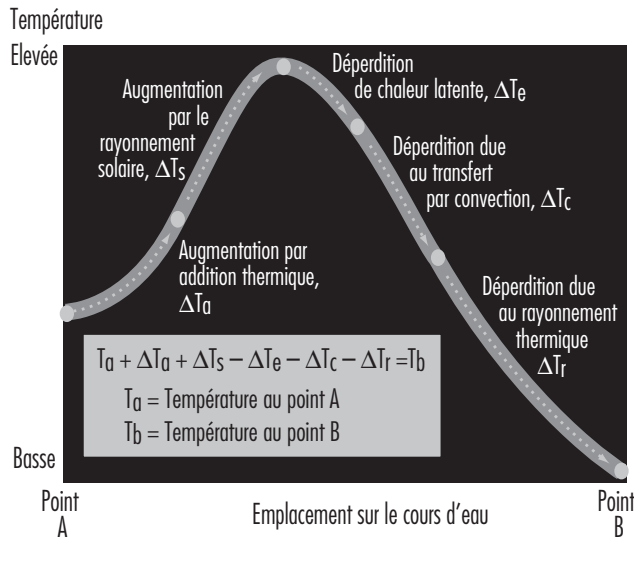


Figure 55.18 • Capacité d'un cours d'eau à recevoir de la chaleur



- L'effet net de la chaleur est généralement nocif pendant les mois chauds de l'année.
- L'effet en hiver peut être bénéfique dans les climats froids, où la glace se brise et où une aération de surface est offerte aux poissons et aux organismes aquatiques.

L'influence sur les organismes aquatiques

Un grand nombre d'espèces ont des limites de tolérance à la température et doivent être protégées, particulièrement dans les tronçons d'une rivière ou d'une masse d'eau influencés par la chaleur. Ainsi, les cours d'eau froids ont habituellement les types les plus nobles de poissons pêchés pour le sport, comme la truite et le saumon, tandis que les eaux chaudes abritent généralement des bancs de poissons communs et que certaines espèces, comme la perche et le brochet, se nourrissent dans les eaux à température intermédiaire.

L'analyse thermique des eaux réceptrices

La figure 55.17 illustre les diverses formes d'échanges naturels de chaleur aux limites d'un milieu aquatique récepteur. Lorsque la chaleur est rejetée dans une eau réceptrice comme celle d'une rivière, il est important d'analyser la capacité qu'a cette rivière de recevoir de la chaleur supplémentaire. Le profil de température d'une rivière peut se calculer en établissant un bilan thermique analogue à celui qui sert à calculer la courbe d'affaissement de l'oxygène dissous. Les principaux facteurs de ce bilan sont indiqués à la figure 55.18 pour un tronçon de cours d'eau entre les points A et B. Il faut calculer séparément chacun des facteurs en fonction de certaines variables thermiques. Comme dans le cas de l'oxygène dissous, le bilan est simplement la somme des apports et des pertes de température pour un tronçon donné. On trouve d'autres méthodes analytiques plus complexes dans les publications sur la question. Les résultats fournis par le calcul du bilan thermique peuvent être utilisés pour déterminer les limites à imposer aux rejets thermiques et, éventuellement, certaines restrictions d'usage à imposer au milieu aquatique considéré.

La lutte contre la pollution thermique

Les principales méthodes sont :

- amélioration de l'efficacité du fonctionnement des centrales électriques;
- utilisation de tours de refroidissement;
- utilisation de bassins isolés de refroidissement;
- prise en considération d'autres méthodes de production d'électricité comme l'énergie hydraulique.

Lorsque les conditions physiques sont favorables et en respectant certaines limites de l'environnement, on devrait envisager de substituer l'énergie hydroélectrique à celle qui provient des combustibles fossiles ou du nucléaire. Les centrales hydroélectriques ne rejettent ni chaleur, ni eaux usées qui sont sources de pollution.

La lutte contre la pollution des eaux souterraines

L'importance des eaux souterraines

Etant donné que l'eau consommée dans le monde provient en grande partie des aquifères, il est très important de protéger ces sources d'approvisionnement. On estime que plus de 95% de l'eau douce disponible sur la planète est souterraine; aux Etats-Unis, 50% environ de l'eau de boisson provient de puits, selon l'enquête géologique américaine (US Geological Survey) de 1984. Etant donné que la pollution et les mouvements des eaux souterraines sont de nature subtile et invisible, on accorde parfois à l'analyse et à la maîtrise de cette forme de dégradation moins d'attention qu'à celle des eaux de surface, qui est beaucoup plus évidente.

Les sources de pollution souterraine

La figure 55.19 décrit le cycle hydrologique avec les sources de contamination des eaux souterraines qui l'affectent. Une liste complète des sources possibles de pollution souterraine serait très longue; nous n'indiquerons ci-après que les plus évidentes :

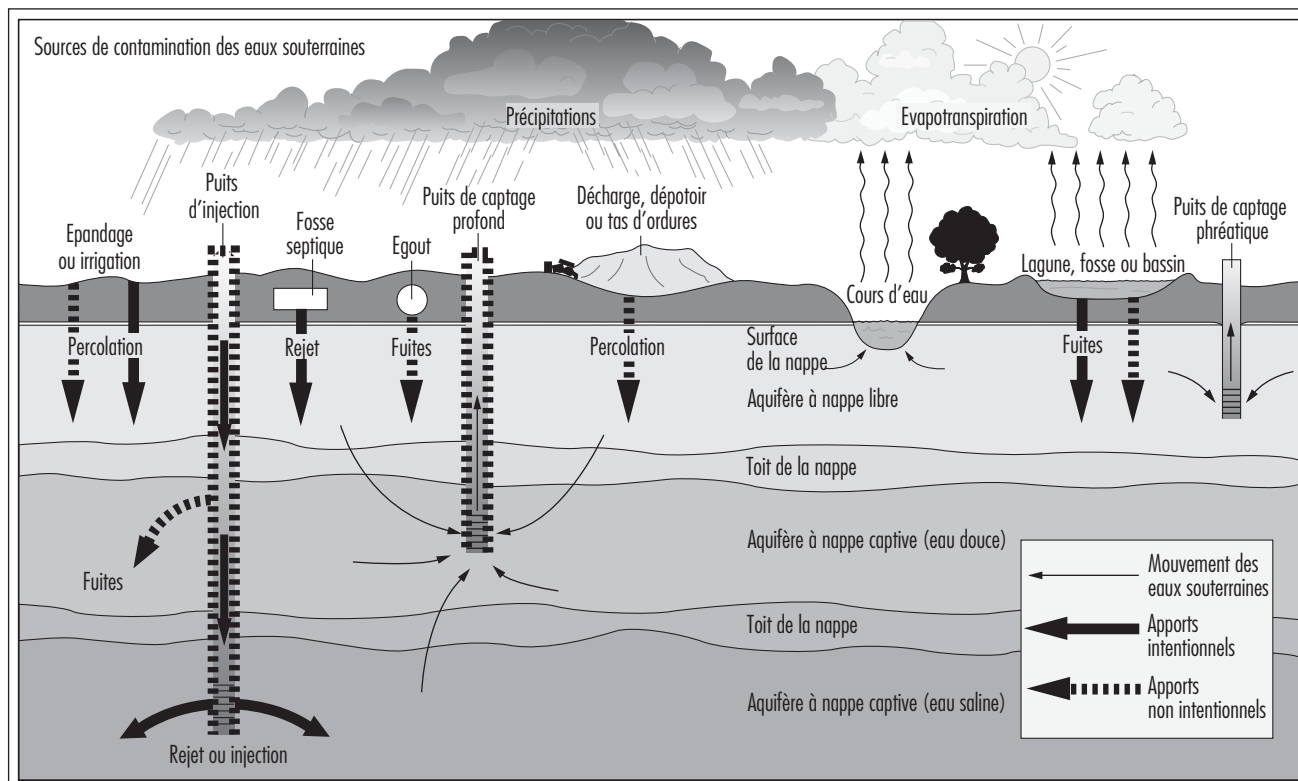
- rejets industriels;
- cours d'eau pollués en contact avec les aquifères;
- industries extractives;
- élimination de déchets solides et dangereux;
- réservoirs de stockage en sous-sol (par exemple, pour le pétrole);
- systèmes d'irrigation;
- réalimentation artificielle;
- envahissement par les eaux de mer;
- déversements;
- bassins pollués à fond perméable;
- puits d'injection;
- champs d'épandage septiques et puits d'infiltration;
- forages inconsiderés de puits;
- travaux agricoles;
- sels de déneigement des routes.

Les polluants de contamination du sous-sol peuvent en outre se classer comme suit :

- composants chimiques indésirables (liste non exclusive) — organiques et inorganiques (par exemple, chlorures, sulfates, fer, manganèse, sodium, potassium);
- dureté totale et somme des solides dissous;
- composants toxiques (liste non exclusive) — nitrates, arsenic, chrome, plomb, cyanures, cuivre, phénols, mercure dissous;
- caractéristiques physiques indésirables — goût, couleur, odeur;
- pesticides et herbicides — hydrocarbures chlorés et autres;
- matières radioactives — diverses formes de radioactivité;
- agents biologiques — bactéries, virus, parasites, etc.;
- acides (faible pH) ou caustiques (pH élevé).

Parmi les substances ci-dessus, les nitrates revêtent une importance particulière pour les eaux souterraines comme pour les eaux

Figure 55.19 • Cycle hydrologique et sources de contamination des eaux souterraines



de surface. Dans les approvisionnements en eau souterraine, ils peuvent causer une maladie appelée méthémoglobinémie (cyanose des nourrissons). Ils peuvent en outre avoir des effets nocifs d'eutrophisation des eaux de surface; ces nitrates se retrouvent dans une vaste gamme de ressources en eau, comme le signale Preul (1991). Preul (1964, 1967, 1972) et Preul et Schroeffer (1968) ont également parlé de la migration souterraine de l'azote et d'autres polluants.

La migration souterraine de la pollution

Les écoulements des eaux souterraines sont excessivement lents et subtils en comparaison de ceux des eaux de surface dans le cycle hydrologique. Pour se faire une idée simple du cheminement des eaux souterraines ordinaires dans des conditions d'écoulement idéales et stables, on peut utiliser la loi de Darcy qui est une méthode élémentaire d'évaluation du mouvement des eaux souterraines avec des nombres de Reynolds (R) peu élevés:

$$V = K(dh/dl)$$

dans laquelle:

V = vitesse des eaux souterraines dans l'aquifère, en m/jour

K = coefficient de perméabilité de l'aquifère

(dh/dl) = gradient hydraulique représentant la force imprimant le mouvement.

L'eau souterraine ordinaire (H_2O) est généralement le fluide porteur de la migration des polluants en sous-sol et l'on peut calculer qu'elle se déplace à une vitesse conforme aux paramètres de la loi de Darcy. Toutefois, le débit ou la vitesse d'un polluant tel qu'une substance chimique organique ou inorganique peut varier sous l'effet de processus d'advection et de dispersion hydro-

dynamique. Certains ions se déplacent plus lentement ou plus rapidement que la vitesse générale d'écoulement des eaux souterraines par suite des réactions avec le milieu de l'aquifère, de sorte que l'on peut les classer en «réactifs» ou «non réactifs». Les réactions revêtent généralement les formes suivantes:

- réactions physiques entre le polluant et l'aquifère ou le liquide transporteur;
- réactions chimiques entre le polluant et l'aquifère ou le liquide transporteur;
- actions biologiques sur le polluant.

Voici des exemples de polluants réactifs et non réactifs du sous-sol:

- polluants réactifs — chrome, ions d'ammonium, calcium, sodium, fer, etc.; cations en général; composants biologiques; composants radioactifs;
- polluants non réactifs — chlorures, nitrates, sulfates, etc.; certains anions; certains pesticides et herbicides.

Au premier abord, on pourrait penser que les polluants réactifs sont les plus nocifs, mais ce n'est pas toujours le cas du fait que les réactions bloquent ou retardent les déplacements des concentrations de polluants, alors que les migrations de polluants non réactifs peuvent se faire en grande partie sans obstacle. Il existe maintenant certains produits «doux» pour le ménage et l'agriculture qui se dégradent biologiquement après un certain temps et évitent par conséquent de contaminer les eaux souterraines.

La régénération des aquifères

Il va de soi que la meilleure stratégie est de prévenir la pollution du sous-sol; toutefois, il faut généralement l'apparition d'un phé-

nomène pour que l'on découvre que les eaux souterraines sont polluées de façon incontrôlée, par exemple à la suite de plaintes émanant des utilisateurs de l'eau des puits dans la région. Malheureusement, au moment où le problème est reconnu, les dommages peuvent déjà être graves et il faut trouver un remède. La régénération peut exiger de vastes études hydrogéologiques sur le terrain avec des analyses en laboratoire d'échantillons d'eau pour déterminer l'étendue des concentrations de polluants et le profil de leurs migrations. Souvent, les puits existants peuvent servir aux premiers échantillonnages, mais dans les cas graves, il faudra peut-être faire de nombreux forages et prélever de nombreux échantillons d'eau. On peut alors analyser ces données pour établir la situation actuelle et prévoir l'avenir. L'analyse du cheminement de la contamination des eaux souterraines est un domaine spécialisé qui exige souvent le recours à des modèles informatisés pour mieux comprendre la dynamique du phénomène et pouvoir faire des prévisions sous diverses contraintes. Les publications contiennent à cette fin un certain nombre de modèles informatisés à deux et trois dimensions. Le lecteur se reportera à l'ouvrage de Freeze et Cherry (1987) s'il souhaite trouver des approches analytiques plus détaillées.

La prévention de la pollution

La prévention de la pollution est la meilleure méthode de protection des ressources en eaux souterraines. Bien que les normes de l'eau potable s'appliquent généralement à l'utilisation des eaux souterraines, il faut protéger les eaux non traitées de la contamination. Les organismes gouvernementaux, comme les ministères de la Santé, les organismes responsables des ressources naturelles et les agences de protection de l'environnement, sont habituellement chargés de ces activités. La lutte contre la pollution des eaux souterraines vise généralement à protéger les aquifères et à prévenir la pollution.

Pour prévenir la pollution, il faut des mesures d'aménagement du territoire sous la forme de zonage et d'autres réglementations. Les lois peuvent viser à empêcher certaines utilisations, spécialement dans le cas de sources ponctuelles ou d'activités qui pourraient causer une pollution. Le zonage est un instrument de protection des eaux souterraines d'une grande efficacité au niveau local. Les programmes de protection des aquifères et de la zone située autour du champ de captage des puits sont examinés ci-après en tant qu'exemples éminents de prévention.

Un programme de protection de l'aquifère suppose la délimitation de la nappe et de ses zones de recharge. Les aquifères peuvent être captifs ou non captifs et devront donc être analysés par un hydrogéologue qui déterminera à quel type ils appartiennent. La plupart des grands aquifères sont généralement bien connus dans les pays développés, mais d'autres régions peuvent exiger des recherches sur le terrain et une analyse hydrogéologique. L'élément capital d'un programme de protection de l'aquifère contre la dégradation de la qualité de l'eau réside dans la réglementation de l'utilisation des terres situées au-dessus de la nappe et de ses zones de recharge.

La protection de la zone située autour du champ de captage d'un puits est une approche plus précise et plus limitée qui s'applique à la zone de recharge de ce puits. Le gouvernement fédéral des États-Unis exige maintenant, par les amendements apportés en 1986 à la loi américaine de 1984 sur l'eau potable (Safe Drinking Water Act (SDWA)), que des zones précises soient délimitées en amont du champ de captage pour les puits publics. La zone de protection en tête du champ de captage des pluies est définie dans cette loi comme «la zone en surface et sous la surface entourant un puits ou un champ de captage de puits qui alimente un réseau public de distribution d'eau, à travers laquelle il est raisonnablement probable que des contaminants se déplaceront en direction de ce puits ou de ce champ de captage et l'atteindront». L'objectif

principal de ce programme tel qu'esquissé par l'EPA (EPA, 1987) est de délimiter les zones de protection des puits sur la base des critères choisis, de l'exploitation des puits et de considérations hydrogéologiques.

LE PROJET DE RÉGÉNÉRATION ET DE VALORISATION DES EAUX USÉES DE LA RÉGION DE DAN: UNE ÉTUDE DE CAS

Alexander Donagi

La conception

Le système de valorisation des eaux usées municipales de la région de Dan est le plus grand dispositif de ce genre au monde. Il consiste en installations de traitement (et de recharge dans les eaux souterraines) des eaux usées municipales de la zone métropolitaine de la région de Dan — une agglomération de 8 villes centrées autour de Tel-Aviv, en Israël, regroupant une population d'environ 1,5 million d'habitants. Ce projet a été conçu dans le but de collecter, traiter et évacuer les eaux usées municipales. Après un séjour relativement long dans l'aquifère, les effluents régénérés sont pompés pour être utilisés sans restriction dans l'agriculture, irriguant la région aride du Néguev dans la partie méridionale d'Israël. Un schéma général du projet est donné à la figure 55.20. Celui-ci a été établi dans les années soixante et a été continuellement étendu. A l'heure actuelle, on collecte et traite environ 110 millions de m³ par an. D'ici à quelques années, au stade final, on traitera de 150 à 170 millions de m³ par an.

On sait que les installations de traitement des eaux usées créent une multitude de problèmes pour l'environnement et la santé des travailleurs. Le projet de la région de Dan est unique en son genre et revêt un intérêt pour tout le pays; il permet de réaliser des économies considérables sur les ressources en eau, a une grande efficacité de traitement et produit de l'eau à peu de frais, sans présenter de risques excessifs pour les travailleurs.

Tout au long de la conception, de l'installation et de l'exploitation normale du projet, on a tenu compte avec soin des exigences relatives à l'assainissement de l'eau et à l'hygiène du travail. Toutes les précautions voulues ont été prises pour que les eaux usées récupérées soient pratiquement aussi sûres que de l'eau potable ordinaire au cas où les gens viendraient à les boire ou à les avaler accidentellement. De même, on s'est soucié comme il convient de réduire au minimum tout risque d'accidents ou d'autres dangers biologiques, chimiques ou physiques auxquels pourraient être exposées les personnes travaillant à l'installation de traitement des eaux usées elle-même ou aux activités liées à l'évacuation et à l'utilisation agricole des eaux régénérées.

Lors de la première étape du projet, les eaux usées ont été traitées biologiquement dans un ensemble de bassins d'oxydation avec recirculation et par un procédé de traitement chimique additionnel au calcaire-magnésium, suivi du séjour des effluents à pH élevé dans des «bassins de polissage». Les effluents partiellement traités ont été rechargés dans l'aquifère régional au moyen des bassins d'épandage sur le site de Soreq.

Dans la deuxième étape, les eaux usées envoyées à l'installation de traitement subissent un processus physique et biologique par un procédé à boues activées avec nitrification-dénitrification. L'effluent secondaire est rechargé dans la nappe souterraine au moyen des bassins d'épandage de Yavneh 1 et Yavneh 2.

L'ensemble du dispositif est formé d'un certain nombre d'éléments qui se complètent mutuellement:

- un ensemble de traitement des eaux usées, formé d'un dispositif à boues activées (installation physique et biologique), qui traite la plupart des effluents, et d'un système de bassins d'oxydation et de polissage servant principalement au traitement des quantités excédentaires d'eaux usées;
- un système de recharge de la nappe souterraine pour les effluents traités, consistant en bassins d'épandage à deux emplacements différents (Yavneh et Soreq) qui sont inondés par intermittence; les effluents absorbés traversent la zone non saturée du sol et une portion de l'aquifère, créant ainsi une zone spéciale qui est consacrée au traitement complémentaire des effluents et au stockage saisonnier, appelé SAT (Soil-Aquifer Treatment);
- des réseaux de puits d'observation (au total, 53 puits), qui entourent les bassins de recharge et permettent de surveiller l'efficacité du processus de traitement;
- des réseaux de puits de récupération (au total, 74 puits actifs en 1993), qui entourent les sites de recharge;
- une conduite spéciale et distincte d'apport de l'eau régénérée en vue de l'irrigation sans conditions restrictives des zones agricoles du Néguev; cette conduite, la «troisième ligne du Néguev», complète le système de distribution de la région, qui comprend deux autres grandes conduites de distribution d'eau douce;
- une installation de chloration des effluents, comprenant actuellement 3 emplacements de chloration (2 autres s'y ajouteront par la suite);
- six réservoirs de régulation le long du système de distribution, qui contrôlent le volume d'eau pompé et consommé le long du réseau;
- un réseau de distribution des effluents, comprenant 13 grands secteurs de pression le long de la conduite principale, qui distribue l'eau traitée aux utilisateurs;
- un système intégré de surveillance qui supervise et gère le fonctionnement intégral du projet.

La description du système de régénération

Le plan général du système de régénération est présenté à la figure 55.20 et le diagramme d'écoulement à la figure 55.21. Le système est formé des ouvrages suivants: installation de traitement des eaux usées, champs de recharge de l'eau, puits de récupération, réseau de transport et de distribution, dispositif de chloration et système intégré de surveillance.

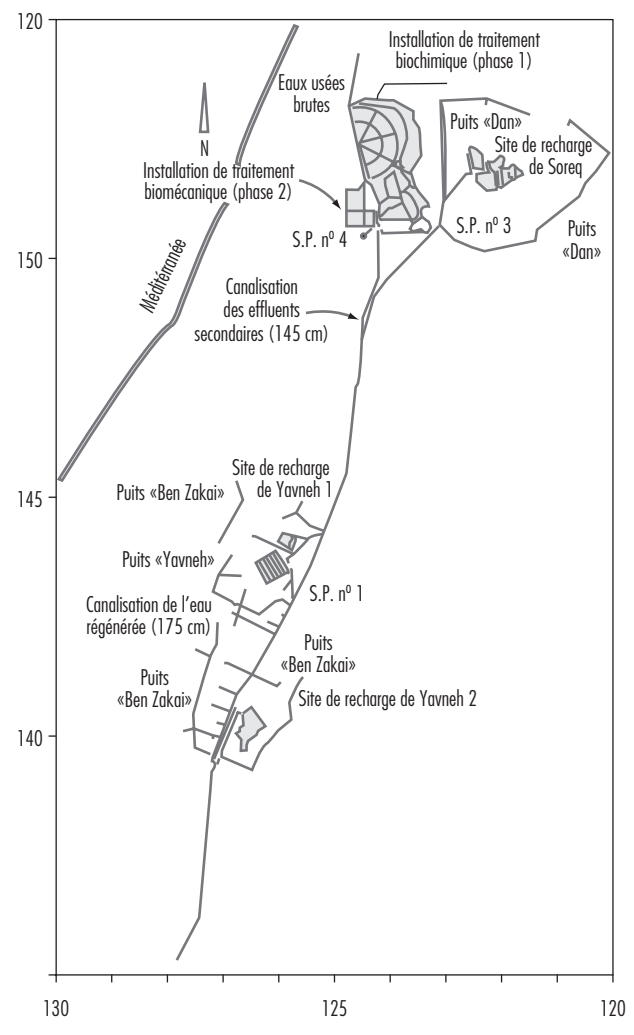
L'installation de traitement des eaux usées

L'installation de la zone de la région métropolitaine de Dan reçoit les eaux de 8 villes de la région et traite aussi une partie de leurs effluents industriels. Elle est située sur les dunes de sable de Rishon-Leziyyon et consiste principalement en un traitement secondaire des effluents par boues activées. Une partie des effluents, surtout lorsque les rejets atteignent un débit de pointe, est traitée dans un autre réseau d'étangs d'oxydation plus ancien qui occupe 120 hectares. Ensemble, les deux réseaux traitent actuellement environ 110 millions de m³ par an.

Les aires de recharge

Les effluents provenant de l'installation de traitement sont pompés vers 3 lieux différents situés dans les dunes de sable de la région, où ils sont épandus sur le sable et s'infiltrent dans l'aquifère pour y être stockés temporairement et y subir un traitement additionnel qui est fonction du temps. Deux des sites d'épandage reçoivent les effluents de l'installation de traitement biomécanique. Ce sont les bassins de Yavneh 1 (24 hectares, à 7 km au sud de l'installation) et de Yavneh 2 (18 hectares, à 10 km au sud de l'installation); le troisième site est réalimenté par les effluents des

Figure 55.20 • Installation de régénération des eaux usées de la région de Dan: plan



étangs d'oxydation, ainsi que par une partie du débit provenant de l'installation de traitement biomécanique, ce qui est nécessaire pour améliorer la qualité des effluents et la porter au niveau requis. Il s'agit du site de Soreq, qui a une superficie d'environ 24 hectares et se trouve à l'est des étangs.

Les puits de récupération

Autour des sites d'alimentation se trouvent des réseaux de puits d'observation qui permettent de repomper l'eau qui a été rechargée. Les 74 puits en exploitation en 1993 n'ont pas tous été actifs pendant toute la durée du projet. En 1993, le réseau des puits a permis de récupérer au total environ 95 millions de m³ d'eau qui ont été pompés dans la troisième conduite du Néguev.

Les réseaux de transport et de distribution

L'eau extraite par pompage des différents puits de récupération est envoyée dans le réseau de transport et de distribution de la troisième conduite. Le réseau de transport se compose de 3 sections d'une longueur totale de 87 km et d'un diamètre variant

