

Texte de la 287^e conférence de l'Université de tous les savoirs donnée le 13 octobre 2000.

POLLUTION ET EPURATION DES EAUX

par Lothaire ZILLIOX

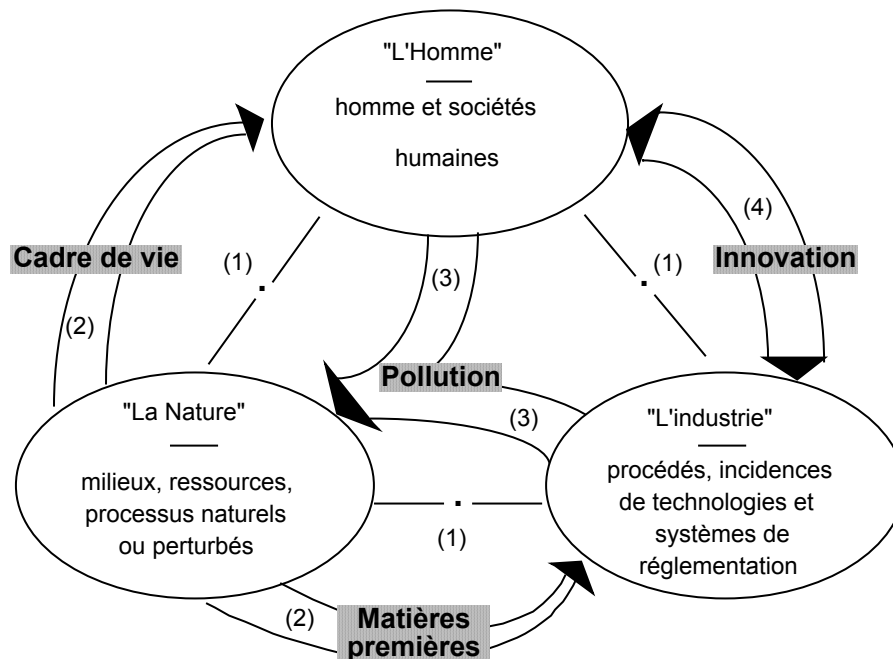
LA QUALITE DE L'EAU, UN ENJEU DURABLE

L'eau est indispensable à la vie. Fragile « miroir de notre avenir »⁽¹⁾, elle est au cœur des préoccupations de toutes les civilisations. Essentielle à de multiples activités humaines (énergétiques, domestiques, industrielles, agricoles) l'eau est une priorité de santé publique.

Les causes majeures des menaces sur les ressources en eau et sur leur qualité ne sont-elles pas à chercher dans les comportements humains et dans la méconnaissance d'innombrables acteurs concernés, plus que dans l'absence de connaissances scientifiques et de solutions techniques ? Les interrogations au sujet de la pollution et de l'épuration des eaux s'inscrivent utilement dans le schéma de la figure 1.

Elle visualise l'interactivité entre Homme et Société, Nature et Système de production, en matière d'environnement-développement.

⁽¹⁾ source : Opération « Europe bleue » du Conseil de l'Europe (1993), 25 ans après la proclamation de la Charte européenne de l'Eau (Strasbourg, 6 mai 1968)



- (1) - **interfaces** instrumentées pour analyses, mesures, modélisations.
- (2) - **apports** (cadre de vie, matières premières,...)
- (3) - **pollution** (effets de comportements, d'activités,...)
- (4) - **innovation** et création de richesse (garanties de la prévention active)

fig. 1

Représentation schématique du champ de recherche, « Environnement-Développement », dans l'optique de la durabilité.

Pour la gestion qualitative de l'eau, les processus de décision qui intégreront au mieux les trois « sphères » – l'Homme, la Nature, l'Industrie - constitueront une avancée dans la prise en compte d'une durabilité à la fois écologique, économique et sociale.

La figure 1 associe dans une même représentation des sujets humains, des êtres de la nature, des objets techniques et des règles juridiques.

Les décisions nécessaires pour gérer l'eau et pour en préserver la qualité devront tenir compte d'une part de l'évolution de la demande sociale et d'autre part de l'évolution de l'offre physique. Côté demande, les besoins en eau sont liés à la croissance démographique, à des facteurs technologiques et à des choix de société, en termes de confort, de santé, de solidarité, voire de survie.

Côté offre, la disponibilité de l'eau dépendra de variations climatiques, d'impacts d'activités humaines sur le régime et la qualité des eaux, ainsi que de l'émergence de techniques nouvelles pour dépolluer, traiter, recycler, comme pour réguler, protéger et épargner l'eau.

De fait, il n'y a pas un problème de l'eau commun à l'ensemble de la planète Terre, mais une grande diversité de problèmes concrets et localisés.

L'HYDROSYSTEME, UNITE DE GESTION

L'hydrosystème continental, schématiquement représenté par la figure 2, servira de support aux éléments développés dans la suite.

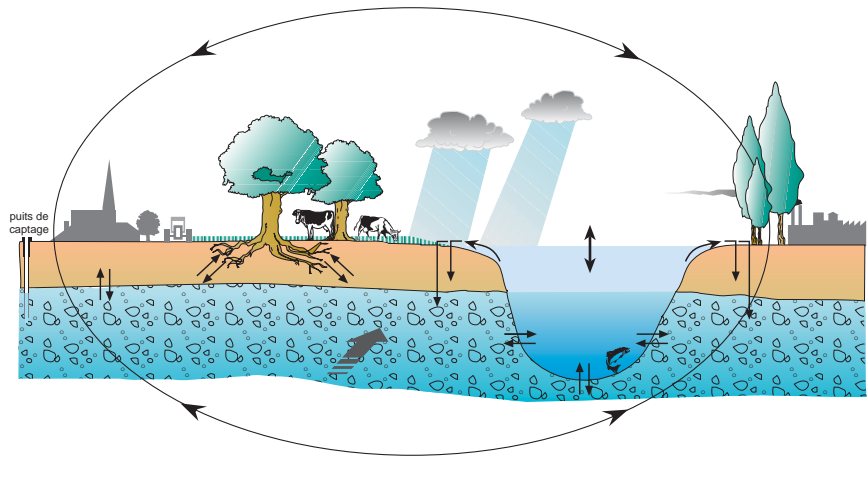


fig. 2

Représentation d'un hydrosystème continental⁽²⁾

Les flèches visualisent des interfaces à fort gradient hydraulique. Ceux-ci peuvent accélérer ou ralentir les polluants transportés par l'eau.

L'eau du système, représentant l'unicité de la ressource de tout bassin fluvial, est répartie dans divers compartiments : l'eau des précipitations, les eaux douces superficielles, l'eau du sol, les eaux souterraines. Les compartiments, naturellement reliés par le cycle de l'eau, forment un système cohérent, qui intègre des éléments naturels et des éléments issus d'activités humaines. L'eau y circule à des vitesses très différentes sur ses parcours aériens, superficiels, ou souterrains. Le rapport des vitesses mesurées dans la nappe alluviale (eau souterraine) aux vitesses relevées dans le cours du fleuve est de l'ordre de 1 à 100 000 : il indique l'importance de l'échelle de temps à prendre en compte dans le transport de polluants dans les compartiments de l'hydrosystème.

La persistance d'une pollution sera liée à la nature et au degré d'intensité de toutes les interrelations au sein de l'hydrosystème. Toute dégradation de l'un des compartiments aura des répercussions sur les autres.

DES SOURCES ET MECANISMES DE POLLUTION DE L'EAU

La notion d'hydrosystème indique bien la nécessité de ne plus dissocier un problème de pollution de l'eau (le « contenu ») de la dégradation du milieu (le « contenant ») à travers lequel circule l'eau (atmosphère, cours d'eau, sols et aquifères).

⁽²⁾ source : Zilliox (L.), « la qualité des eaux continentales », p. 17-22, dans *12 Questions d'actualités sur l'Environnement*, Ministère de l'Environnement, Z'édicions (juin 1996)

Les durées de séjour d'un polluant dans l'hydrosystème varient à l'extrême : quelques jours dans l'atmosphère, quelques semaines dans les rivières, des décennies ou des siècles dans les aquifères. Les durées de renouvellement de l'eau ont un impact certain sur la persistance des pollutions. La détérioration de la qualité des eaux souterraines peut même devenir irréversible.

Pour pouvoir évaluer la progression d'une pollution, il ne suffira pas de connaître le seul « transport » par l'eau. Il faudra prendre en compte les diverses interactions entre le polluant et les milieux traversés dont les effets n'apparaissent que graduellement dans le temps.

Pollutions et origines

La pollution est multiple et on parlera « des pollutions de l'eau ». Elles se distinguent *grosso modo* par leurs causes (accidents, éliminations de déchets et résidus, sollicitations excessives du milieu naturel,...) par leur nature (physique, chimique, bactériologique, radioactive,...) et par leur ampleur (locale ou étendue, occasionnelle ou saisonnière) dans l'espace et dans le temps. Certaines pollutions seront appelées «diffuses» à l'exemple des pollutions par nitrates sur des régions entières.

La pollution se définit selon des situations de référence variées. Pour l'écologue, il s'agit de la dégradation de l'eau par l'introduction d'un agent altérage. Cet agent (biologique, chimique ou physique) provoque, à partir d'une certaine concentration ou intensité, une altération gênante (ou nuisible) de la qualité de l'eau.

Pour l'utilisateur, l'eau est polluée quand sa qualité ne correspond plus aux exigences de certains usages. Dans ses usages l'eau remplit de multiples fonctions (pour la boisson, l'hygiène, l'irrigation, l'agroalimentaire, l'énergie, le transport, les loisirs, etc...).

La pollution atmosphérique issue de sources multiples – usines, chauffage urbain, automobiles...- a un impact sur la qualité des eaux et des sols. La pollution des eaux de surface s'est diversifiée à partir d'activités humaines comme la déforestation (provoquant inondation et érosion), la construction de barrages, la canalisation de rivières, le comblement de zones humides. L'irrigation massive et l'agriculture industrielle ont fait croître la contamination directe des sols et des eaux souterraines. De multiples accidents de transport de produits toxiques, (par route, rail, voies d'eau, conduites enterrées...) provoquent des pollutions de durées aléatoires. La pollution des nappes phréatiques peut résulter d'échanges avec les cours d'eau dégradés et d'affleurement au niveau de sols contaminés.

Tableau I : Principales causes de pollution des eaux ⁽³⁾

TYPE DE POLLUTION	NATURE CHIMIQUE	SOURCE OU AGENT CAUSAL
1- Physique pollution thermique pollution radioactive	rejets d'eau chaude radio-isotopes	centrales électriques installations nucléaires
2- Chimique pollution par les fertilisants pollution par des métaux et métalloïdes toxiques pollution par les insecticides et pesticides pollution par les détergents	nitrates – phosphates mercure, cadmium, plomb, aluminium, arsenic, etc... insecticides, herbicides, fongicides	agriculture (lessives) industrie, agriculture, combustions (pluies acides) agriculture (industrie)

⁽³⁾ source : Ramade (F.) ; « l'eau une ressource menacée » dans le Journal *après-demain*, févr.-mars 1992, Paris.

pollution par les hydrocarbures pollution par des composés organochlorés pollution par les autres composés organiques de synthèse	agents tensioactifs pétrole brut et ses dérivés (carburants p.e.) PCB, insecticides, solvants chlorés très nombreuses molécules (plus de 70 000 !)	effluents domestiques industrie pétrolière, transports industries industries (usages dispersifs pour certains)
3- Organique pollution par matières fermenticides	glucides, lipides, protides	effluents domestiques, agricoles, d'industries agro-alimentaires, du bois (papeteries)
4- Microbiologique pollution par microorganismes	bactéries, virus entériques, champignons	effluents urbains, élevages, secteur agro-alimentaire

Pour la partie apparente du cycle de l'eau, les processus de contamination sont visibles et leurs conséquences généralement détectables. L'entraînement de polluants dans le sol et le sous-sol, constitue le départ de mécanismes plus difficiles à appréhender et dont l'évolution reste cachée. Non visibles, ces pollutions seront détectées avec des retards de plusieurs années. Trop tardives, les actions de dépollution dureront des dizaines d'années, voire au-delà.

Mécanismes de pollution

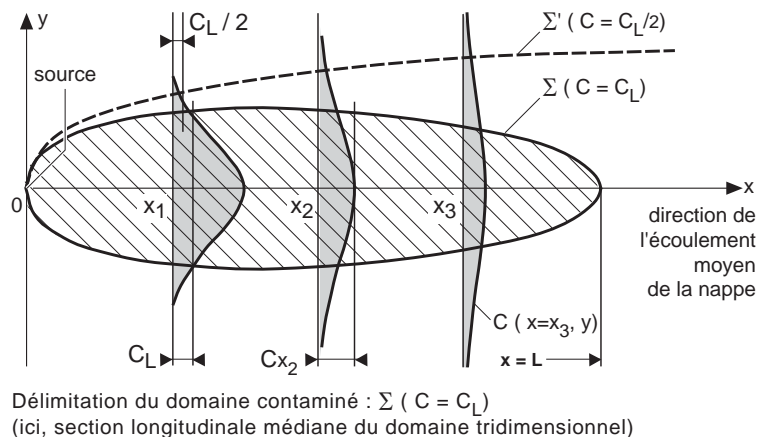
Si l'on prend le cas des produits pétroliers, les carburants et les fiouls de chauffage représentent le plus gros volume de produits organiques journalièrement manipulés et transportés dans les pays industrialisés. De ce fait, ils sont impliqués dans de nombreuses pollutions. Ces produits, globalement non miscibles à l'eau, sont des mélanges complexes de nombreux composés hydrocarbonés. Lors d'un déversement accidentel on distingue trois phases successives :

- le produit s'infiltré dans le sol de couverture perméable de l'aquifère ; la nappe d'eau souterraine est directement atteinte lorsque la quantité déversée est supérieure à celle que le sol et la partie aérée de l'aquifère sont capables de retenir ;
- le produit en contact avec l'eau lui transmet des traces d'hydrocarbures les plus solubles ;
- le transfert d'hydrocarbures, sans cesse réactivé par les mouvements de l'eau, constitue la véritable source de contamination de l'eau entraînant la persistance de la pollution.

Les traces dissoutes sont véhiculées par l'eau souterraine dont la vitesse d'écoulement est de l'ordre de quelques mètres par jour en aquifère poreux (milieu alluvial). Outre le risque de pollution des captages d'eau, l'évaporation d'hydrocarbures dans le sol peut engendrer des risques d'explosion.

Dans le cas de la dispersion d'un polluant miscible à l'eau, une émission locale (fuite d'un réservoir enterré) à débit constant d'un polluant miscible à l'eau provoque dans l'aquifère la dispersion du polluant entraîné par l'eau souterraine. Au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source, le polluant est dilué par le jeu de mécanismes dispersifs et d'effets de mélange dans l'aquifère poreux.

Les concentrations dans l'eau décroissent dans la direction de l'écoulement et s'estompent transversalement. La figure 3 visualise cette évolution.



C_L : Valeur de concentration limite



-  domaine contaminé : $C \geq C_L$
-  profils transversaux des concentrations

fig. 3

Pollution locale d'un aquifère : délimitation du domaine contaminé⁽⁴⁾

Connaissant les vitesses de l'eau dans la direction de l'écoulement, le coefficient de dispersion dans le plan perpendiculaire à l'écoulement, le débit de la source (en masse de contaminant par unité de temps), la variation spatiale de la concentration dans l'eau peut être calculée dans des conditions hydromécaniques de stationnarité.

Si une « norme » définit, pour le polluant concerné, une concentration limite (par exemple une valeur critique à ne pas dépasser au plan de la toxicité), on peut déterminer l'enveloppe frontière de la zone de contamination et savoir ainsi à quelle distance de la source émettrice la pollution s'estompe.

L'hétérogénéité de l'aquifère et les potentialités naturelles de transformation biochimique, (l'activité microbiologique sera d'autant plus efficace que la vitesse de circulation de l'eau sera plus lente) contribueront à déformer, respectivement à réduire, le domaine contaminé dans la réalité. Le modèle présenté en figure 3, fondé sur la seule approche hydrodynamique, se place du côté de la sécurité lorsqu'il s'agit d'évaluer le risque de contamination d'un captage d'eau situé en aval.

LES EAUX PRELEVEES, UTILISEES, EPUREES, DEPOLLUEES

Les eaux « brutes », prélevées dans l'hydrosystème continental (pluies, eaux de surface, nappes) sont de composition très variable. Leur utilisation nécessite souvent une adaptation de leurs

⁽⁴⁾ source : Zilliox (L.), « Porous media and aquifer systems », in *Groundwater ecology*, Academic Press, San Diego, 1994.

caractéristiques physiques, chimiques et biologiques. Tout usage altérant la qualité sera suivi d'une régénération des eaux.

Le rejet d'eau usée ne se fera qu'après un diagnostic de la capacité d'autoépuration du milieu naturel. Une trop forte sollicitation durant les dernières décennies a considérablement amoindri le pouvoir épurateur des milieux réceptacles d'eaux usées.

Les effets de rejets d'eaux insuffisamment épurées s'ajoutent aux impacts des pollutions in situ. La restriction d'usage des eaux prélevées s'en trouve accrue. Seuls des procédés de traitement, fiables mais coûteux, autoriseront le maintien de certains usages de l'eau.

Ces traitements, les techniques d'épuration d'eaux usées et la décontamination de sites pollués, relèvent de technologies évolutives. Celles-ci permettent de réhabiliter le milieu naturel, d'adapter les caractéristiques de l'eau aux divers besoins (industriels, agricoles, domestiques) et de garantir au consommateur l'accès à l'eau potable indispensable à la santé humaine. (L'eau insalubre est le premier « transmetteur » de maladies au monde et tue encore près de 10 000 enfants par jour).

Dans le secteur de l'eau, l'innovation en génie des procédés de traitement et en ingénierie pour les écosystèmes aquatiques, exige un niveau de croissance qui doit générer suffisamment de « richesses » pour la mise en œuvre des technologies. Nombreux sont les pays qui souffrent d'un manque de croissance minimale pour assurer à leur population l'accès à une eau de qualité.

L'eau : origine et composition

Les eaux douces exploitées par l'homme ont pour origine, dans l'hydrosystème continental, le ciel (eaux des précipitations collectées), le territoire, (« eaux de surface », cours d'eau et plans d'eau à l'air libre) et le sous-sol (eaux souterraines contenues dans les aquifères alluviaux ou des roches réservoirs ; ces eaux, protégées des activités en surface, sont captées aux sources naturelles ou par des forages). Elles représentent à peine 0,5 % des ressources de la planète dont 97,5 % sont des eaux de mer salées et 2 % des eaux douces à l'état solide (banquise et glaciers).

La qualité de l'eau se définit par sa composition en sels minéraux et gaz dissous, en microorganismes et matières en suspension. Les composés minéraux en solution proviennent de la constitution des roches traversées. Les gaz dissous sont essentiellement l'oxygène et le gaz carbonique en provenance du milieu ambiant. Les matières en suspension sont d'origine minérale (silice, argiles, oxydes de fer,...) ou organique (bactéries, virus, champignons, matières végétales en décomposition...).

L'eau prélevée : préparation aux usages

Les eaux « brutes » sont préparées pour des usages spécifiques : alimentaires, industriels, agricoles, hospitaliers.

L'eau potable

Sa préparation doit conserver les sels minéraux indispensables à la santé. L'eau de boisson sera dépourvue de matières organiques, de germes pathogènes ; elle sera oxygénée, limpide, inodore, incolore et fraîche (critères comprenant plus de soixante paramètres). Les traitements concernent surtout les eaux de surface. Les eaux souterraines subiront un traitement simplifié ; dans certains cas elles pourront être distribuées en l'état (secteurs de l'aquifère en plaine d'Alsace).

Dans la chaîne de traitement classique, se suivent les étapes de prétraitement (tamisage, dégrillage, avec préozonation ou préchloration), de clarification (floculation, décantation) et d'affinage (stérilisation, filtration sur sable ou charbon actif). Pour maintenir sa qualité potable dans les canalisations du réseau de distribution, une légère chloration achève la préparation.

Une technologie nouvelle est l'utilisation de membranes filtrantes. L'avantage est d'exclure les réactifs chimiques. Les procédés membranaires fonctionnent à la manière d'un tamis aux pores inférieurs au micron. La microfiltration arrête les bactéries, parasites et colloïdes. L'ultrafiltration élimine les virus et macromolécules organiques. La nanofiltration retient les sels dissous et descend avec l'hyperfiltration (ou osmose inverse) à des tailles d'éléments (ions) n'excédant pas le millionième de millimètre.

La composition et les conditions de fabrication d'une membrane permettent de jouer sur la taille des pores, sur sa perméabilité et sur la durée de transfert des molécules à travers la membrane. Les techniques membranaires, grandes consommatrices d'énergie, coûtent encore cher.

Les eaux pour l'industrie

Les processus de fabrication sont tributaires de la qualité de l'eau dans d'innombrables applications. L'eau filtrée permet d'obtenir en papeterie une meilleure qualité de papier. Dans la fabrication de composants électroniques la pureté de l'eau est déterminante pour la performance de produits, tels les « puces ». Le traitement de surface est incontournable dans de nombreuses activités industrielles : les « rinçages de surfaces » nécessitent de l'eau préparée pour éviter corrosion et agressivité. Le goût d'une bière dépend du dosage des sels minéraux dans l'eau utilisée pour sa fabrication. L'industrie pharmaceutique utilise de grandes quantités d'eau ultra-pure : il faut jusqu'à cinq millions de litres pour produire un kilo d'antibiotique.

L'eau pour l'agriculture

L'eau d'irrigation a des effets sur la qualité des plantes et des sols : une eau salée déstabilise le sol, une eau chargée de résidus organiques ou métalliques nuit aux cultures. Certaines régions arides recourent au dessalement d'eau de mer : l'osmose inverse innove par rapport à la distillation.

Les eaux hospitalières

Les membranes permettent de donner à l'eau l'état de pureté nécessaire à son rôle médical. L'eau ultra pure, obtenue par osmose inverse, permet de soigner les plaies des grands brûlés ; en hémodialyse, son rôle est primordial dans le fonctionnement des reins artificiels.

Dans la préparation de l'eau, les procédés sont basés sur des mécanismes aux interfaces liquide-solide. (cf. tableau II)

Tableau II : Les procédés de la technologie pour les eaux⁽⁴⁾

Procédés	Mécanismes physico-chimiques aux interfaces
Floculation (ou coagulation)	Déstabilisation des colloïdes
Filtration et filtration avec floculation	Fixation des particules sur le matériau filtrant
Filtration par membranes	Élimination des colloïdes et des substances macromoléculaires par membranes (osmose inverse)
Flottation	Séparation de matières particulaires à l'aide de bulles d'air et des propriétés hydrophobes de composés
Échange d'ions	Échange d'ions sur des résines synthétiques

⁽⁴⁾ source : Sigg (L.), Behra (P.), W. Stumm (W.), *Chimie des milieux aquatiques..* (3^e éd.), Dunod, Paris, 2000.

Élimination des phosphates	Précipitation chimique, filtration avec floculation
Biofloculation, biofilm	Floculation de microorganismes, par exemple dans les procédés de boues activées ; utilisation de cultures fixées pour la décomposition et la transformation des substances organiques
Sorption sur le charbon actif	Rétention de substances organiques sur le charbon actif

Les eaux résiduaires : épuration d'eaux usées

Les eaux résiduaires comprennent les effluents urbains, (eaux usées domestiques, alimentées par des eaux pluviales chargées de polluants atmosphériques), les effluents industriels aux caractéristiques très variables et les effluents agricoles provenant de cultures (avec utilisation de phytosanitaires), d'élevages (hors-sol), de fabrications agro-alimentaires (fromagères, vinicoles...). Le rejet direct d'eaux résiduaires dans les compartiments de l'hydrosystème aurait une triple répercussion :

- la dégradation de l'écosystème et la destruction des capacités d'autoépuration du milieu mettant la "santé écologique" en péril ;
- la détérioration du plus précieux patrimoine de vie, portant atteinte à la santé humaine ;
- la disparition sectorielle d'une matière première exclusive, ou le surcoût pour l'adapter aux besoins de fabricants et producteurs, menaçant la "santé économique".

Les systèmes d'épuration des eaux usées mettent en œuvre des procédés qui correspondent, à des degrés divers, à ceux utilisés dans la préparation des eaux « brutes ».

C'est le coût de la mise en place et de l'exploitation des stations de traitement d'eaux usées qui reste le facteur limitant.

La filière -dégrillage, floculation, décantation- est utilisée pour la dépollution des rejets urbains. S'y ajoutent, selon la station d'épuration, un traitement secondaire par lits bactériens et des traitements spécifiques (tertiaires), tels ceux qui éliminent l'azote ou le phosphore.

Les industriels mettent de plus en plus en œuvre les procédés de séparation membranaires sur le site même de l'usine. L'agriculture n'est en soi ni plus ni moins polluante que d'autres activités productives, utilisatrices d'eau. Vu son échelle d'exploitation, elle a un rôle crucial à jouer dans la gestion intégrée de l'hydrosystème et doit assumer sa part de l'effort de dépollution des eaux.

L'épuration d'eaux usées bénéficie de la combinaison expérimentale de technologies. L'association du procédé membranaire et du traitement biologique a fait naître les « bioréacteurs à membranes » : l'effluent chargé en matière organique passe dans un bioréacteur contenant des bactéries qui vont digérer la « charge » ; l'eau ainsi traitée traverse ensuite une membrane sélective qui retient les microbes et assure sa désinfection. Ce système permet de recycler les eaux sanitaires épurées d'un immeuble.

Les eaux polluées : action *in situ*

Les stratégies de réhabilitation de sols et aquifères contaminés, de dépollution et de protection d'eaux souterraines, sont une préoccupation majeure dans les pays industrialisés. L'objectif est double : utiliser des technologies d'épuration entraînant un minimum d'effets négatifs pour l'homme et les milieux naturels, et assurer une protection efficace de l'hydrosystème par un aménagement du territoire adapté à la conservation de la qualité de l'eau.

Le champ d'action est vaste et priorité sera donnée aux stratégies préventives. Le tableau III résume les concepts et méthodes d'intervention, plus particulièrement à proximité de captages d'eau potable.

Tableau III : Méthodologie d'action et de contrôle de sites et aquifères pollués ⁽⁵⁾

<p>Mesures préventives : éviter l'émission de polluants dans les sols et aquifères</p>	<ul style="list-style-type: none"> • appliquer la réglementation des périmètres de protection • restreindre l'usage de substances à risque • réguler les manipulations et modes de transport des produits dangereux • interdire la fabrication de certains produits toxiques
<p>Intervention immédiate : minimiser l'infiltration après déversement accidentel</p>	<ul style="list-style-type: none"> • prélever, traiter et mettre en dépôt les sols contaminés
<p>Actions à la source de pollution : éviter la dispersion du contaminant</p>	<ul style="list-style-type: none"> • mesures géotechniques de confinement (parois étanches ...) • mesures hydrauliques (extraire par pompage...) • mesures chimiques et biologiques in situ (fixer par réactifs, dégrader par bactéries...) • mesures par circulation d'air (capter les substances volatiles) • mesures de traitement et de décontamination in situ (épuration localisée)
<p>Traitement des "panaches" de polluants dissous : réduire le domaine contaminé par dispersion à l'aval de la source</p>	<ul style="list-style-type: none"> • mesures hydrauliques (création de barrières hydrodynamiques et pompage des eaux contaminées), combinées avec des traitements biochimiques pour épurer l'eau prélevée
<p>Protection hydraulique des ouvrages de captage d'eaux</p>	<ul style="list-style-type: none"> • gérer le réseau de puits captants par sélection entre forages de production d'eau et forages d'extraction de polluants
<p>Mesures techniques pour fournir durablement de l'eau potable aux consommateurs</p>	<ul style="list-style-type: none"> • traiter l'eau "brute" prélevée • mélanger l'eau prélevée avec des eaux provenant d'autres sources d'alimentation • pratiquer un système en réseau régional (et non local) pour l'approvisionnement en eau d'une collectivité.

INTERROGATIONS AU FIL DE L'EAU

Les limites actuelles d'un développement garantissant une eau de qualité sont celles qu'imposent : l'état de nos techniques, l'état de notre organisation sociale, éducative et culturelle et la capacité de la biosphère à « digérer » les pollutions résultant d'activités humaines.

La recherche et la technologie fournissent des solutions pour résoudre les problèmes liés à la qualité des ressources « brutes », à leur prélèvement, à leur préparation, à leur distribution, aux usages de l'eau, ou encore à l'épuration d'eaux usées, voire à la dépollution in situ.

L'organisation de la société pour une gestion durable de l'hydrosystème continental pose question sur des points tels

⁽⁵⁾ source : *Groundwater and Subsurface Remediation*, Kobus (H.), Barczewski (B.), Koschitzky (H.P.) (Eds), Springer, 1996

- **la notion du temps** : comment expliquer le « temps écoulé » entre le déclenchement d'une pollution, sa détection puis la décision d'intervenir ? Comment expliquer le « temps décalé » entre l'événement physique et la réponse juridico-administrative attendue ?
 - **le choix d'un mode d'action** : où va-t-on appliquer les mesures de protection des eaux ? S'agit-il d'éliminer les causes (prévention) ou de traiter des symptômes (acte curatif) ?
 - **le besoin de métiers nouveaux pour répondre aux enjeux de l'eau** : comment susciter une nouvelle catégorie professionnelle « d'ingénieurs de la vie et du développement durable », à différencier de biotechnologues non formés à une démarche intégrée ?
- Pour répondre, ne faudrait-il pas inscrire nos comportements comme la Conscience collective dans les représentations des figures 1 et 2 ?

*Je remercie vivement Muriel Eichhorn pour son aide à la mise en forme de cette présentation.
J'exprime ma reconnaissance aux amis, collègues et partenaires qui m'ont accompagné dans la pratique scientifique transdisciplinaire utile au thème présenté.*