

> Micropolluants organiques et substances nutritives

*Etat des lieux de l'évacuation des eaux des agglomérations
et de l'épuration des eaux usées*

*Résumé de la publication
«Organische Mikroverunreinigungen und Nährstoffhaushalt»
www.umwelt-schweiz.ch/uw-0614-d*

Résumé

Situation initiale et contenu

La loi fédérale sur la protection des eaux vise à protéger les eaux souterraines et superficielles contre toute atteinte nuisible. Dans ce but, il y a lieu de respecter les objectifs écologiques définis dans l'annexe 1 de l'ordonnance sur la protection des eaux.

D'innombrables substances inorganiques et organiques parviennent dans les eaux dans le cadre des diverses activités humaines. Durant la dernière décennie, les développements techniques dans le domaine de l'analyse chimique ont permis de mettre en évidence, dans les eaux, des traces non seulement de substances inorganiques, mais aussi d'un grand nombre de substances organiques (micropolluants organiques). Les micropolluants organiques traités dans cette étude sont des *substances organiques synthétiques présentes dans les eaux à des concentrations de l'ordre du microgramme ou du nanogramme par litre et représentant une pollution au sens de l'ordonnance sur la protection des eaux*. Dans ce cadre, la question se pose de savoir si nous avons affaire à un « nouveau » problème de pollution des eaux, si les exigences de qualité en matière d'évacuation des eaux des agglomérations et les solutions existantes sont toujours optimales ou si, au contraire, ces exigences et ces solutions doivent être revues et adaptées.

Les micropolluants organiques parviennent également dans l'environnement à travers l'élevage d'animaux de rente et l'épandage de boues d'épuration. L'interdiction de cet épandage permet d'éliminer une source de pollution, mais prive également l'agriculture des substances nutritives que sont le phosphore et l'azote. Or le phosphore est une matière première non renouvelable, dont les ressources s'amenuisent à l'échelle du globe. On doit ici se demander s'il existe d'autres méthodes permettant de recycler le phosphore et l'azote, et dans quelle mesure la mise en œuvre de ces méthodes serait judicieuse du point de vue écologique et économique.

Le présent rapport propose une vue d'ensemble de la problématique des micropolluants organiques, du bilan du phosphore et de l'azote, ainsi que des systèmes alternatifs d'évacuation des eaux usées. Il doit servir de base pour la définition d'axes de recherche spécifiques ainsi que pour l'élaboration d'une stratégie à long terme « pour la réduction de la pollution des eaux et la préservation des ressources ». Ce rapport se limite aux aspects scientifiques et techniques de cette problématique. Les aspects socio-économiques importants pour un débat exhaustif ne font pas partie de cette étude et ne sont que brièvement évoqués.

Cette étude est subdivisée en cinq parties. Dans les «**Aspects généraux**», on propose une vue d'ensemble de l'utilisation, de la répartition et du traitement des ressources naturelles en eau, de l'eau potable et des eaux usées, afin d'établir les flux des substances organiques synthétiques et des substances nutritives et d'évaluer le système actuel d'évacuation des eaux des agglomérations. Le chapitre «**Micropolluants organiques**» décrit les propriétés des substances organiques présentes en traces et leur comportement dans l'environnement, ainsi que leurs sources et voies d'émission. Est

aussi évoquée la question de la prise en compte des micropolluants organiques par la législation actuelle sur les produits chimiques et la protection des eaux. Une approche basée sur la plausibilité est utilisée pour évaluer l'état de la pollution en Suisse. Le chapitre «**Bilan du phosphore et de l'azote**» présente les effets de l'interdiction de l'épandage des boues d'épuration et de l'utilisation des farines animales sur les flux de ces éléments, ainsi que les possibilités de recyclage du phosphore et de l'azote contenus dans les eaux usées, les boues d'épuration et les farines animales. Les principaux effets des technologies de recyclage de ces éléments sur l'élimination de micropolluants organiques sont brièvement discutés. Le chapitre «**Évacuation des eaux des agglomérations et épuration des eaux usées**» se penche sur l'état de la technique ainsi que sur les tendances de l'évacuation des eaux des agglomérations et de l'élimination de micropolluants organiques lors de l'épuration des eaux usées, en prenant pour exemple les principes actifs pharmaceutiques et certaines hormones. Le rapport propose finalement des conclusions sur les questions actuelles relatives à l'évaluation des micropolluants organiques, à la préservation des ressources en phosphore et en azote, et aux défis actuels dans les domaines de l'évacuation des eaux des agglomérations et de l'épuration des eaux usées.

Aspects généraux

Eau potable. En Suisse, les services des eaux distribuent environ un milliard de m³ d'eau potable par an. Environ 730 millions de m³ d'eau potable sont consommés par les ménages et l'artisanat et quelque 170 millions de m³ par l'industrie. Près d'un tiers de l'eau potable provient d'eaux souterraines non traitées. Le reste est traité au moyen de diverses technologies, conformément aux exigences de qualité actuelles. La plupart des micropolluants organiques ne sont pas touchés par ces exigences de qualité. Théoriquement, une combinaison adéquate des techniques actuellement disponibles pour le traitement de l'eau permettrait toutefois d'éliminer les micropolluants organiques présents en traces dans l'eau potable. L'évaluation de l'efficacité écologique et économique d'une telle combinaison exige des recherches approfondies, qui ne font pas l'objet de la présente étude.

Évacuation des eaux des agglomérations. Les ménages et l'artisanat produisent environ 1,6 milliard de m³ d'eaux usées par an, l'industrie quelque 500 millions de m³. La quantité d'eaux usées est plus importante que la consommation d'eau potable en raison de l'introduction, dans les réseaux d'évacuation des eaux, d'eau de pluie (~900 millions de m³) et d'eaux industrielles captées par l'industrie elle-même (~200 millions de m³). Environ 1,8 milliard de m³ d'eaux usées parviennent chaque année dans les STEP suisses par le réseau d'évacuation des eaux – 85 % à travers des systèmes mixtes et 15 % à travers des systèmes séparatifs. Le débit annuel moyen des eaux superficielles en Suisse étant d'environ 52 milliards de m³, les eaux usées épurées sont diluées à un rapport moyen de 1:25 après leur rejet dans l'émissaire. Localement, ce rapport peut présenter d'importantes variations.

Épuration des eaux usées. Les STEP actuelles ont été conçues dans le but d'éliminer le carbone organique et les substances nutritives. En Suisse, environ un tiers des STEP traitent 90 % de l'ensemble des eaux usées. Les STEP permettent une réduction importante de la DCO (~89 %), de la DBO₅ (~95 %) et du phosphore total (~87 %). Leur capacité d'épuration concernant les micropolluants organiques n'est toutefois connue que pour un petit nombre de substances. En raison du rapport coût/utilité, un traitement de l'azote a été mis en place principalement dans les grandes STEP, qui parviennent à une élimination de 60 à 80 %. Dans le cadre de conventions internationales (Commission OSPAR pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-Est), des mesures ont été prises depuis 1995 pour améliorer l'élimination de l'azote, afin de faire passer les émissions de 28 700 t/N/an à 26 000 t/N/an en 2005. De 1977 à 1998, la qualité des eaux superficielles s'est régulièrement améliorée grâce aux importants efforts entrepris pour la réduction du carbone organique, des substances nutritives et des métaux lourds.

Micropolluants organiques

Réglementation et données disponibles. Le système actuel de l'UE pour les produits chimiques industriels, tel qu'il est également appliqué en Suisse depuis le 1^{er} août 2005 dans le cadre de la nouvelle loi sur les produits chimiques, distingue les «substances existantes» des «nouvelles substances». Jusqu'en 1981, on connaissait environ 100 000 substances organiques synthétiques (appelées «substances existantes»), qui représentent plus de 99 % de la quantité totale des substances actuellement disponibles sur le marché. 140 substances existantes ont été déclarées prioritaires par l'UE. Celles-ci font l'objet d'analyses détaillées des risques, avec données relatives aux quantités de production et d'utilisation, ces informations étant accessibles au public. En outre, il existe des données incomplètes sur les quantités de production et d'utilisation ainsi que sur l'influence sur l'environnement d'environ 10'000 substances existantes. Pour celles-ci, seules les données relatives à leur influence sur l'environnement sont accessibles au public dans la banque de données IUCLID. Pour les autres substances existantes (~90 %), on ne dispose que de données fragmentaires. Depuis 1981, quelque 3000 nouvelles substances ont été enregistrées, avec des données écotoxicologiques de base lorsqu'elles sont mises en circulation par une entreprise dans l'UE à raison de plus d'une tonne par an. La nouvelle législation de l'UE sur les produits chimiques (REACH) pourrait améliorer la situation au niveau des données disponibles, notamment pour ce qui concerne les substances existantes. La législation suisse relative aux produits chimiques a été revue avec l'entrée en vigueur de la nouvelle loi sur les produits chimiques, le 1^{er} août 2005, et correspond ainsi à la pratique actuelle au sein de l'UE. D'une manière générale, on dispose de plus de données environnementales relatives aux principes actifs des pesticides. Les principes actifs pharmaceutiques sont également soumis à l'enregistrement obligatoire, mais seuls quelques-uns ont été étudiés quant à leurs effets sur l'environnement. Les produits biocides sont désormais soumis eux aussi à l'enregistrement obligatoire en Suisse et font l'objet d'une ordonnance spécifique.

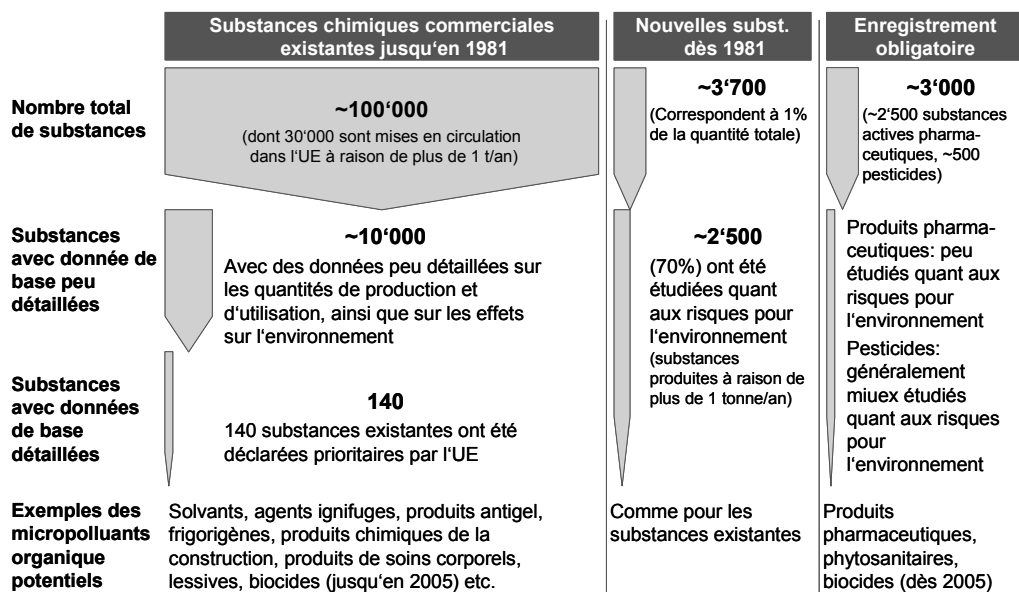


Fig. 4 Données actuellement disponibles pour l'évaluation des risques pour l'environnement liés aux substances, sur la base de l'ensemble des substances synthétiques utilisées dans le monde.

Sources et émissions. La Suisse importe quelque 20 millions de tonnes de substances organiques par an, dont environ 16 millions de tonnes de combustibles et de carburants. On estime que plusieurs dizaines de milliers de tonnes de substances organiques synthétiques parviennent chaque année dans les eaux usées, et que plusieurs milliers à quelques dizaines de milliers de tonnes de substances organiques synthétiques parviennent chaque année dans les eaux, essentiellement superficielles, par le biais des hydrocarbures réfractaires dans les eaux usées traitées, des évacuations d'eaux usées non traitées par les déversoirs de crue, des fuites des réseaux d'eaux usées et des émissions directes (par exemple par l'agriculture). Ces substances parviennent directement dans les eaux souterraines principalement par le biais de l'agriculture et des fuites des réseaux d'eaux usées, à raison d'environ 10 à 100 tonnes par an. Sur la base d'estimations grossières, on peut considérer que les concentrations de substances organiques synthétiques peuvent aller jusqu'à plusieurs centaines de $\mu\text{g/l}$ dans les eaux superficielles fortement polluées et à quelques $\mu\text{g/l}$ dans les eaux souterraines. Les concentrations de substances isolées sont jugées très faibles, de l'ordre du ng/l . Ces estimations concordent avec diverses mesures de micropolluants organiques effectuées dans les eaux suisses. On peut donc s'attendre à trouver plusieurs milliers de substances organiques synthétiques différentes à de très faibles concentrations (ng/l) dans les eaux suisses. À eux seuls, les secteurs de la médecine, de l'hygiène et de l'agriculture utilisent largement plus de 1000 substances différentes. Dans le cadre des programmes de mesure de routine pour le contrôle de la qualité de l'eau en Suisse, seules quelques substances sont analysées spécifiquement. Des activités de recherche et certaines campagnes de mesure des autorités ont fourni des données de concentrations locales ou régionales dans les eaux et les eaux usées pour à peine plus d'une centaine de substances isolées.

Nouveaux enjeux en matière d'évaluation des substances. Il existe encore de nombreuses questions ouvertes et incertitudes dans le domaine de l'identification des substances problématiques et de leurs mécanismes d'action à de très faibles concentrations, ainsi que de la définition des priorités au niveau de leur mise en circulation. Il n'existe notamment pas de méthodes d'évaluation standardisées. Sur la base des connaissances actuelles, il n'est donc pas possible de savoir de manière définitive si les micropolluants organiques représentent un problème environnemental important. Le tableau 2 récapitule les principaux enjeux de l'évaluation des substances en vue d'identifier les micropolluants organiques et de définir des priorités.

Tab. 2 Principaux enjeux de l'évaluation des substances en vue d'identifier les micropolluants organiques et de définir des priorités.

Thème	Principaux enjeux
1 Données disponibles	<ul style="list-style-type: none"> Amélioration des données disponibles sur les quantités de production et de consommation, ainsi que sur l'évaluation des risques pour l'environnement liés aux produits chimiques industriels et pharmaceutiques. Extension des procédures de définition des priorités aux substances présentes en traces.
2 Comportement en cours de transport	<ul style="list-style-type: none"> Développement de modèles prévisionnels fiables concernant le comportement de sorption des substances en présence de phénomènes électrostatiques. Prise en compte du transport lié aux particules sur de longues distances dans l'évaluation des substances.
3 Persistance	<ul style="list-style-type: none"> Évaluation de la biodégradabilité en présence d'une cinétique de dégradation limitée, et compréhension de l'importance de la dégradation cométabolique à faible concentration. Développement de procédures d'évaluation standardisées permettant d'évaluer à peu de frais la biodégradabilité à faible concentration (< 1 µg/l).
4 Métabolites	<ul style="list-style-type: none"> Mise en évidence et évaluation de l'importance des métabolites résultant des processus de dégradation dans les STEP et dans l'environnement. Prise en compte des métabolites potentiels dans le cadre de l'évaluation des risques des substances de départ.
5 Effets toxicologiques	<ul style="list-style-type: none"> Développement de procédures d'évaluation standardisées pour la mise en évidence de « nouveaux » effets toxicologiques tels que les effets endocriniens. Prise en compte d'effets toxicologiques supplémentaires dans l'évaluation des produits chimiques.
6 Mélanges de substances	<ul style="list-style-type: none"> Évaluation de mélanges de substances en ce qui concerne les effets sur les mêmes récepteurs et sur d'autres récepteurs.
7 Dynamique de l'exposition	<ul style="list-style-type: none"> Comparaison des effets entre de courtes expositions à concentration élevée et des expositions prolongées à faible concentration. Mise en évidence des effets d'une exposition chronique de longue durée à faible concentration, et développement de procédures d'évaluation standardisées.
8 Analyses spécifiques des substances et paramètres globaux	<ul style="list-style-type: none"> Développement de méthodes permettant d'analyser simultanément le plus grand nombre possible de substances. Harmonisation de paramètres globaux avec d'autres méthodes pour l'évaluation globale de pollutions à très faible concentration.
9 Systèmes de tests biologiques	<ul style="list-style-type: none"> Développement de tests biologiques pour la mise en évidence de différents mécanismes dans les échantillons environnementaux. Amélioration des procédures pour l'identification, dans les échantillons, des substances responsables d'un effet spécifique (Toxicity Identification Evaluation – TIE).

Bilan du phosphore et de l'azote

Bilan du phosphore et de l'azote. Les ressources en phosphore sont limitées à l'échelle mondiale. Selon les scénarios de consommation, les réserves exploitables seront épuisées d'ici 100 à 500 ans. En raison de la qualité toujours moins bonne des réserves exploitées, on s'attend, de plus, à ce que les coûts d'exploitation du phosphore augmentent. Actuellement, l'incinération des boues d'épuration et des farines animales représente une perte de phosphore et doit par conséquent être considérée comme une lacune dans l'exploitation durable des ressources. Avec l'interdiction de l'épandage des boues d'épuration, ces dernières ne fournissent plus de phosphore et d'azote à l'agriculture. Sur ce plan, le bilan du phosphore et de l'azote n'est pas encore équilibré dans l'agriculture suisse. D'un autre côté, les fumures excessives pratiquées dans l'agriculture entraînent des accumulations dans le sol (phosphore), des émanations dans l'air, une surfertilisation de nos écosystèmes (ammoniacque) et un enrichissement indésirable des eaux souterraines (nitrates). On peut se demander si les engrais minéraux ne pourraient pas être remplacés par des engrais obtenus par recyclage de déchets phosphatés. Le bilan du phosphore pour la Suisse montre des flux de phosphore de 6000 t/an dans les eaux usées et de 3000 t/an dans les farines animales. Si l'on compare ces flux aux 4800 tonnes de phosphore épandu sous forme d'engrais minéraux en 2000, il apparaît clairement que le recyclage de nos déchets phosphatés permettrait de couvrir une part importante de nos besoins en engrais. Le phosphore évacué avec l'urine humaine représente environ 2100 à 3000 t/an.

Recyclage du phosphore. Des évaluations des procédés de recyclage possibles du phosphore montrent que le traitement des boues d'épuration ou des cendres d'UIOM permettrait de recycler au maximum 90 % du phosphore des eaux usées. Dans ce cadre, la séparation du phosphore des polluants (p. ex. métaux lourds) impliquerait une consommation importante de produits chimiques et d'énergie. Certains procédés sont actuellement testés à grande échelle, mais il n'existe pas encore de données précises sur la consommation de ressources ainsi que sur les coûts. Le recyclage du phosphore à partir des eaux usées, que ce soit sous forme concentrée dans l'urine ou sous forme diluée dans les eaux de STEP, présente l'avantage, par rapport à l'extraction du phosphore de matières solides (boues d'épuration ou cendres), de fournir du phosphate sous forme dissoute. Les procédés déjà testés en laboratoire par précipitation de struvite ou nanofiltration permettent d'extraire efficacement le phosphore de l'urine. Des recherches sont en cours pour l'obtention d'un produit de recyclage du phosphore sans danger au niveau des polluants organiques et ce problème n'est pas encore résolu. Aucune estimation des coûts n'a encore été publiée pour le recyclage du phosphore à partir de l'urine.

Recyclage de l'azote. Contrairement au phosphore, les ressources d'azote ne sont pas limitées, puisque ce dernier est disponible en quantité pratiquement illimitée dans l'atmosphère. Les procédés étudiés jusqu'ici pour l'élimination et le recyclage de l'azote à partir de l'urine utilisent environ 40 % d'énergie de plus que l'élimination classique par nitrification/dénitrification dans les STEP, avec extraction de NH_3 par le procédé Haber-Bosch.

Bien que l'élimination des substances nutritives des eaux usées soit nécessaire pour lutter contre l'eutrophisation et la pollution des eaux, on doit se demander, dans le cadre du débat sur les nouveaux systèmes d'évacuation des eaux et dans une vision axée sur le développement durable, comment recycler efficacement ces substances nutritives avec ces procédés.

Évacuation des eaux des agglomérations et épuration des eaux usées

Capacité d'élimination des STEP communales existantes. Plusieurs études expérimentales réalisées sur des substances isolées ont montré que les STEP communales existantes peuvent contribuer efficacement à l'élimination de micropolluants organiques tels que les produits pharmaceutiques et les perturbateurs endocriniens. Ainsi, les STEP conçues pour la nitrification, dans lesquelles les boues séjournent plus de 10 jours en conditions aérobies, éliminent plus de 90 % des principaux œstrogènes que sont le 17α -éthinyloestradiol, le 17β -estradiol et l'estrone. Un autre critère déterminant, au niveau du processus, est constitué par le temps de séjour hydraulique. Du fait que la dégradation de très nombreuses substances peut être décrite par une cinétique de pseudo-premier ordre, toute dilution des eaux usées est défavorable à la dégradation. C'est pourquoi il faut éviter autant que possible toute dilution par l'eau de pluie ou d'autres eaux dans le réseau d'eaux usées. Toujours en raison de la cinétique de pseudo-premier ordre, de petits réacteurs disposés en série (on en «cascade») sont nettement plus efficaces qu'un seul bassin avec mélange intégral. Pour certaines substances difficilement dégradables en conditions aérobies, comme certains antibiotiques, des bioréacteurs à membrane, des réacteurs à lit solide et des filtres biologiques permettraient d'obtenir des temps de séjour plus élevés qu'avec les systèmes actuels à boue activée, et donc d'améliorer la dégradation. L'un des principaux problèmes pour le calcul prévisionnel de la dégradation est constitué par le grand nombre et la diversité de polluants potentiels pouvant interagir lors de la dégradation. À très faible concentration en particulier, certaines substances ne sont dégradées cométaboliquement qu'en présence d'un autre substrat et ne sont pas utilisées comme source de carbone pour la croissance des bactéries. Si de tels processus ont pu être démontrés pour certaines substances, les connaissances sont souvent lacunaires. Le développement de modèles fiables permettant de calculer la dégradabilité biologique et la sorption par des boues activées sur la base des propriétés des substances s'avère particulièrement important, en raison du coût des procédures expérimentales destinées à décrire ces processus.

Des essais pilotes l'ont montré, des traitements supplémentaires dans les STEP existantes, p. ex. une ozonation en fin de processus, permettraient d'améliorer considérablement la dégradation et de réduire l'effet toxicologique des eaux usées traitées. L'efficacité de l'ozonation n'est pas entravée par des concentrations de matières solides jusqu'à 20 mg/l et n'entraîne qu'une augmentation modeste des frais d'exploitation. En raison de la minéralisation pas toujours complète des substances organiques, il faudrait analyser de manière plus détaillée les effets biologiques des métabolites résultant de l'ozonation. Des essais d'adsorption sur charbon actif pour l'élimination de substances hormonales et pharmaceutiques à des concentrations de l'ordre du ng/l dans l'eau pota-

ble ont montré, outre l'efficacité de cette méthode d'élimination, des charges relativement réduites, ce qui tend à remettre en question l'utilisation économique de filtres à charbon actif comme dernière étape de traitement par les STEP communales. Pour des concentrations plus élevées, telles qu'on les observe dans les stations de prétraitement décentralisées, l'utilisation de charbon actif devrait absolument être testée.

Conséquences des fuites des réseaux d'eaux usées. Selon diverses études, l'eau exfiltrée des réseaux d'eaux usées non étanches représente 1 à 11 % du débit total, par temps sec. L'apport de substances dans le sol suite à ces fuites est du même ordre de grandeur que le flux sortant des STEP, pour les substances facilement éliminables dans les STEP. En raison de l'importance de ces fuites, un programme de recherche européen étudie actuellement des méthodes de quantification.

Dans les réseaux modernes d'évacuation des eaux, les émissions d'eaux mixtes par les déversoirs d'orage sont inférieures d'au moins un ordre de grandeur aux flux sortant des STEP, à l'échelle annuelle. L'effet toxicologique des émissions d'eaux mixtes peut toutefois être non négligeable par rapport aux pics de pollution des eaux. Globalement, les émissions diffuses liées aux réseaux d'eaux usées sont très difficiles à estimer en raison de la variabilité temporelle des concentrations et des différences de comportement des substances. Des modèles stochastiques pour la modélisation du comportement des polluants dans les réseaux d'eaux usées peuvent apporter une contribution importante aux processus décisionnels relatifs à l'optimisation de ces réseaux. Un état des lieux des réseaux d'eaux usées devrait être dressé pour améliorer l'évaluation des pertes liées à ces réseaux.

Nouveaux systèmes d'évacuation des eaux. Les systèmes d'évacuation actuels avec réseaux mixtes et STEP centralisées présentent quelques points faibles. Une partie des eaux usées non traitées s'infiltrent dans le sol à travers les conduites non étanches. En raison de la dilution dans les réseaux d'eaux usées et du mélange de différentes eaux usées, les processus d'épuration ne sont pas optimaux pour l'élimination de certaines substances, ni pour le recyclage des ressources. Les nouveaux systèmes d'évacuation sont tous basés sur le principe, appliqué depuis longtemps déjà dans l'industrie, qui consiste à ne pas mélanger les différentes eaux mais à les traiter spécifiquement, afin d'obtenir un traitement plus efficace.

L'évacuation et le traitement séparés des matières fécales, p. ex. dans un système sous vide/biogaz, permettent de réduire la pollution des eaux par les déversoirs d'orage et de décharger les STEP centralisées. Cela permet également de récupérer de l'énergie du traitement anaérobie. Les toilettes sous vide sont déjà utilisées avec succès depuis de nombreuses années dans les trains, les avions et les hôpitaux. Deux projets pilotes ont montré la faisabilité des réseaux sous vide. Les investissements pour un tel système sous vide sont toutefois environ trois fois plus élevés que pour le système actuel. La faisabilité économique de tels systèmes devrait être examinée, notamment dans le cadre de l'aménagement de nouvelles zones constructibles ou de changements d'affectation.

La séparation de l'urine permettrait un recyclage de substances nutritives ainsi qu'une augmentation significative de l'efficacité globale de l'épuration des eaux usées à

l'échelle du système d'évacuation des eaux, par un traitement efficace des micropolluants pharmaceutiques et hormonaux. De plus, cela déchargerait les STEP centralisées et réduirait l'émission de polluants dans les eaux et le sol par les fuites des réseaux d'eaux usées. Les projets pilotes et études de laboratoire réalisés jusqu'ici montrent que la séparation d'une solution d'urine hautement concentrée est techniquement possible. L'un des problèmes majeurs est constitué par la précipitation de struvite et d'hydroxyapatite dans les installations sanitaires. Des mesures telles que l'utilisation d'eau de pluie comme eau de rinçage ou le contrôle du pH permettent de réduire fortement ou d'empêcher cette précipitation. Des essais de traitement d'urine concentrée par nanofiltration ont montré une bonne dégradation des produits pharmaceutiques, mais aussi une élimination presque complète du phosphore. L'électrodialyse permettrait d'améliorer le recyclage du phosphore sans résidus problématiques de micropolluants organiques. D'autres procédés de traitement de l'urine sont en cours d'étude, notamment la précipitation de struvite ou l'ozonation. Comme le charbon actif s'est montré efficace pour l'adsorption de diverses substances pharmaceutiques dans l'eau potable et que la teneur en COD de l'urine est faible, il conviendrait d'étudier un traitement combiné par microfiltration et charbon actif. Le transport séparé de la solution d'urine vers une station de traitement centralisée représente encore un problème. Il faudrait notamment quantifier plus précisément l'influence de facteurs tels que les pertes par exfiltration, le dégazage de NH_3 , les précipitations et les pertes par les déversoirs d'orage. La mise en œuvre d'une séparation de l'urine dans le système actuel d'évacuation des eaux usées impliquerait d'importantes modifications des systèmes sanitaires et devrait par conséquent être réalisée progressivement dans le cadre des rénovations. Une adaptation progressive des systèmes de séparation, de transport et de traitement permettrait également une amélioration progressive de ces systèmes.

Les eaux grises (cuisine, douches, lavabos) représentent la plus grande part des eaux mixtes. Dans le cadre du recyclage des eaux grises, p. ex. pour l'irrigation, il faut tenir compte de problèmes potentiels comme l'émission d'odeurs liées aux dépôts dans les conduites, le risque de contamination microbienne et la dégradation incomplète des polluants dans les eaux. Certaines substances organiques dans les eaux grises peuvent représenter un risque potentiel, lequel pourrait être réduit en remplaçant les substances problématiques par d'autres moins toxiques et plus facilement biodégradables.

De nouveaux procédés décentralisés pour l'épuration des eaux usées font actuellement l'objet d'intenses recherches afin d'améliorer la compréhension des processus techniques et d'évaluer leurs conditions aux limites. Plusieurs projets pilotes étudiant la mise en œuvre à grande échelle de ces technologies sont actuellement en cours. Pour que ces technologies soient financièrement concurrentielles avec le système d'évacuation actuel, il faudrait toutefois non seulement des études complémentaires sur leur faisabilité, mais aussi une production et un développement industriels. Ce n'est que dans le cadre d'une concurrence potentielle avec le système mixte actuel – et son monopole de fait – que l'industrie pourrait être motivée à développer des systèmes d'évacuation des eaux novateurs, performants, souples et avantageux.

Amorces de solution pour une stratégie destinée à réduire la pollution des eaux et à préserver les ressources

Actuellement, les systèmes d'évacuation des eaux des agglomérations et d'épuration des eaux usées, de même que les technologies correspondantes, sont conçus en fonction de l'élimination du carbone organique et des substances nutritives, mais ne tiennent compte ni des émissions de micropolluants organiques, ni du recyclage des substances nutritives. Conformément au principe de précaution et au développement durable et compte tenu, notamment, des besoins de renouvellement actuels et futurs des systèmes d'évacuation des eaux, il y a lieu de développer, à long terme, des objectifs quantitatifs et mesurables pour la réduction des émissions et la dégradation des micropolluants organiques, ainsi que pour le recyclage des substances nutritives.

Idéalement, des objectifs quantitatifs sont définis lorsque l'importance de la pollution des eaux par les micropolluants organiques et la nécessité du recyclage des substances nutritives sont suffisamment connues. Comme le montre la présente étude, cela n'est toutefois pas le cas. La recherche aura encore besoin de temps pour élaborer des modèles standardisés, par exemple pour l'identification des micropollutions organiques et la définition des priorités, et elle ne pourra pas proposer de recettes exhaustives et définitives. Par ailleurs, la diversité des produits, les types d'application et les émissions évoluent sans cesse. Ces incertitudes doivent être prises en compte lors de la définition des objectifs dans le cadre de la protection des eaux, de manière à pouvoir anticiper de nouvelles connaissances et exigences. Parallèlement à ces objectifs de protection des eaux, il faudrait aussi définir les objectifs destinés à la préservation des ressources, du fait que de nouvelles mesures peuvent également avoir une influence sur les flux du phosphore et de l'azote et devraient donc être coordonnées.

Un assouplissement au niveau des systèmes d'évacuation des eaux des agglomérations et d'épuration des eaux usées est nécessaire pour pouvoir répondre à ces exigences. Les futurs systèmes techniques doivent être conçus de manière à pouvoir être adaptés à de nouvelles exigences. Les objectifs concrets de la protection des eaux et de la préservation des ressources doivent être adaptés en permanence à l'évolution des connaissances et de la technique. Une stratégie destinée à réduire la pollution des eaux et à préserver les ressources (fig. 2) devrait par conséquent, dans toute la mesure du possible, être mise en œuvre dans le cadre d'un processus itératif (fig. 3). Les effets d'un assouplissement, notamment au niveau des coûts, pourraient être multiples et devraient être évalués préalablement par une étude des possibilités d'action.

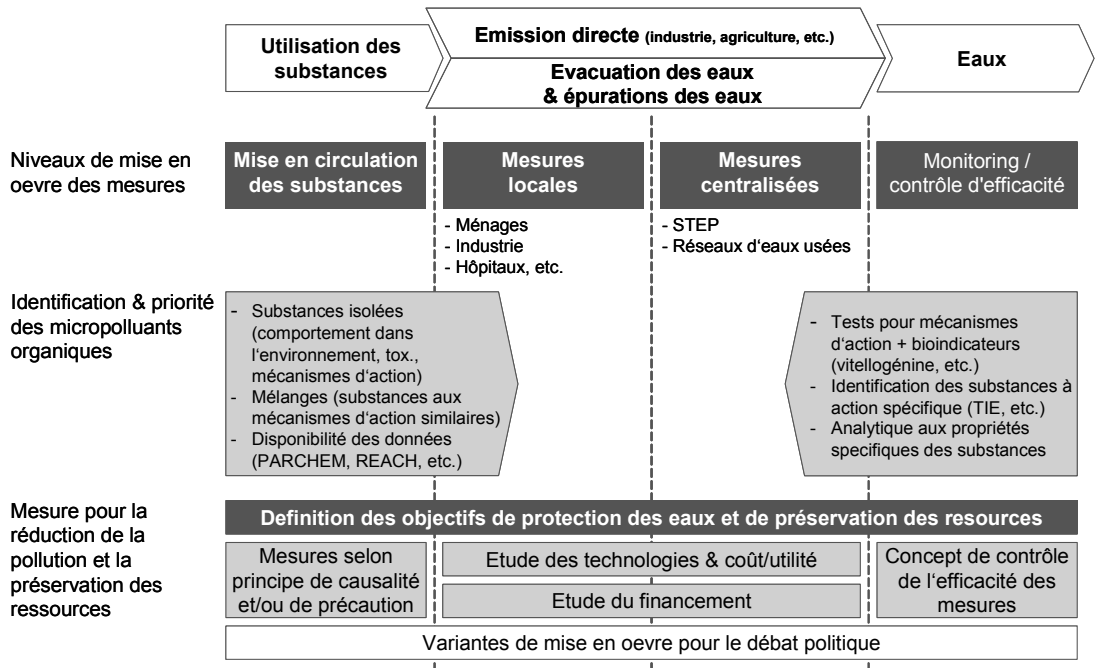


Fig. 5 Amorces de solution pour une stratégie à quatre niveaux de mise en œuvre, destinée à réduire la pollution des eaux et à préserver les ressources.

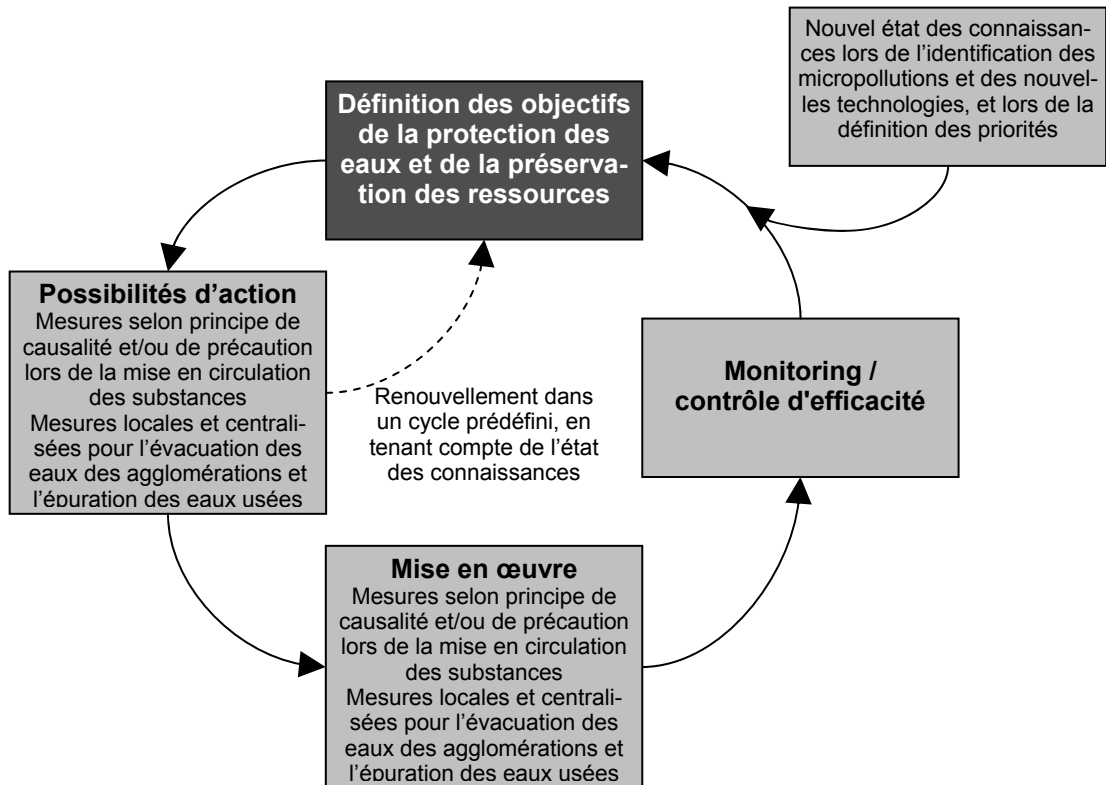


Fig. 6 Processus itératif pour la mise en œuvre de la stratégie destinée à réduire la pollution des eaux et à préserver les ressources, pour une adaptation la plus souple possible de l'évacuation des eaux des agglomérations et de l'épuration des eaux.