

Micropolluants chimiques dans l'environnement : traitement et prévention

D'après la conférence de Jean-François Loret

Jean-François Loret est responsable du Département Environnement et Santé du Centre International de Recherche sur L'Eau et l'Environnement, principal centre de recherche et d'expertise du groupe Suez environnement¹.

Le groupe Suez Environnement intervient dans deux principaux domaines : les déchets et le cycle de l'eau. C'est ce domaine du cycle de l'eau qui suscite généralement le plus de questions relativement aux micropolluants².

Nous allons voir pourquoi, et résumer l'état de nos connaissances sur la présence de ces micropolluants dans le cycle de l'eau. Puis nous verrons quelles sont les solutions proposées aujourd'hui pour répondre à ces questions, solutions qui résultent de nos programmes de recherche

menés au cours des dix dernières années.

1 Les micropolluants dans le cycle de l'eau³

1.1. De plus en plus de rejets dans l'environnement sont liés aux activités humaines

Notre vie moderne fait appel à beaucoup de produits chimiques : 110 000 substances chimiques existent actuellement sur le marché européen dont 30 000 importées ou manufacturées en quantités supérieures à une tonne.

1. www.suez-environnement.fr

2. Micropolluants : substances polluantes minérales ou organiques, d'origine naturelle ou de synthèse, pouvant avoir un effet néfaste sur l'homme ou l'environnement à très faible concentration. On trouve parmi elles des pesticides, des résidus médicamenteux, ou encore des hydrocarbures.

3. Voir aussi le **Chapitre de P. Flammarion** (La chimie et la mise en œuvre de la Directive Cadre sur l'Eau. Enjeux liés à la présence de micropolluants dans les écosystèmes aquatiques), dans cet ouvrage *Chimie et expertise, santé et environnement*, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2016

Le résultat de cette utilisation massive de produits chimiques est une présence diffuse de traces de ces produits dans tous les compartiments de l'environnement, qu'il s'agisse de l'air, du sol, de nos aliments, et finalement de l'eau qui joue un peu le rôle d'exutoire et de réceptacle final de toute cette pollution environnementale. On peut finalement constater que tout produit utilisé dans notre vie quotidienne, ou pour des usages agricoles ou industriels, termine tôt ou tard, au moins partiellement, sa vie dans le cycle de l'eau.

1.2. Des progrès analytiques spectaculaires

Cette présence des polluants dans l'environnement et dans l'eau est rendue de plus en plus évidente grâce au progrès spectaculaires des techniques d'analyse.

La **Figure 1** présente l'évolution des limites de détection analytiques sur des matrices environnementales.

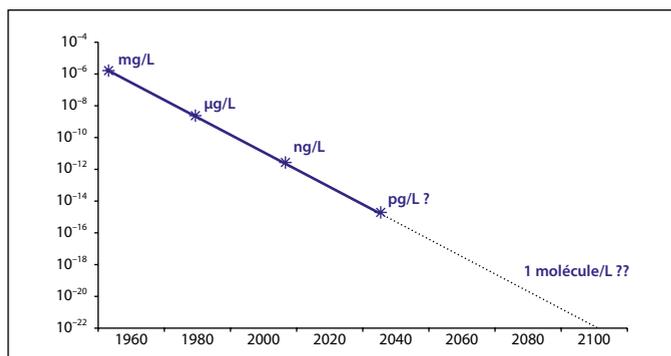


Figure 1

Évolution des limites de détection analytiques dans les matrices environnementales.

On constate que ces limites sont abaissées d'un facteur 1 000 environ tous les vingt ans. Dans les années 1980, il était courant de détecter des milligrammes, et, quand on travaillait bien, des microgrammes par litre dans des matrices environnementales. Aujourd'hui, l'unité courante est le nanogramme par litre, et les laboratoires commencent déjà à détecter des picogrammes par litre. Il est évident, avec de telles performances analytiques, que la liste des contaminants détectables dans les matrices environnementales ne peut que s'allonger indéfiniment (**Figure 1**).

1.3. Les niveaux de contamination des eaux

On comprend mieux les préoccupations actuelles lorsqu'on met en regard de ces limites de détection les niveaux de concentration des micropolluants d'actualité dans les différentes eaux que l'on a à gérer dans ce cycle de l'eau (**Figure 2**). Ces concentrations sont de l'ordre de la dizaine ou la centaine de microgrammes par litre dans les eaux usées telles qu'on peut les recevoir, dans les effluents industriels ou urbains. Elles diminuent progressivement environ d'un facteur dix lorsqu'on passe de l'eau usée brute à l'eau usée traitée en sortie de station d'épuration.

Ensuite, il se produit un effet de dilution dans l'environnement lorsque ces eaux traitées sont déversées dans les eaux de surface, puis une élimination partielle des micropolluants lorsque ces eaux

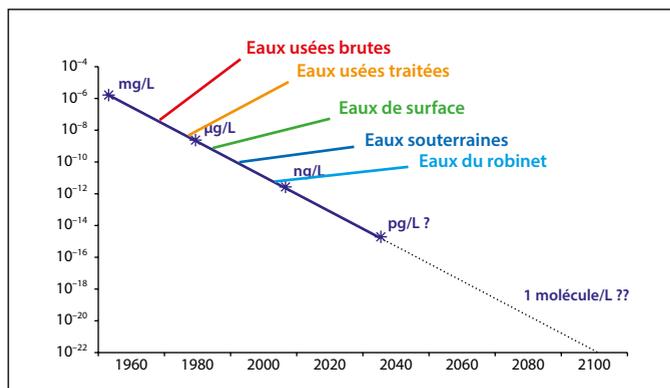


Figure 2

Les différentes étapes du cycle de l'eau, avec les niveaux de contamination associés.

s'infiltrent à travers le sol pour devenir des eaux souterraines.

Lorsqu'on arrive à l'eau du robinet, malgré l'abattement⁴ assez efficace apporté par les traitements de potabilisation, il est encore possible de détecter des petites traces (des nanogrammes, ou des dixièmes, voire des centièmes de nanogrammes par litre) de tout un ensemble de micropolluants d'actualité, ce qui suscite, évidemment, beaucoup de questions sur la sécurité de l'eau potable et les conséquences possibles sur notre santé.

1.4. Les effets avérés des micropolluants sur la faune aquatique... et sur l'homme ?

Si la prise de conscience de cette pollution environnementale est ancienne, l'inquiétude est devenue plus forte à partir des années 1990, lorsqu'il est

devenu évident que certains rejets dans l'environnement pouvaient avoir des effets perturbateurs endocriniens sur la faune aquatique vivant à proximité des rejets urbains ou industriels, engendrant des problèmes de reproduction chez des mollusques, des poissons, des amphibiens ou des reptiles, avec notamment des phénomènes de féminisation, ou à l'inverse des problèmes de masculinisation de ces populations, selon le type de rejets.

Ce constat sur la faune aquatique peut être mis en parallèle avec celui fait à l'échelle de l'espèce humaine, chez qui une augmentation des troubles de la reproduction est observée depuis une cinquantaine d'années, notamment une baisse de la fertilité masculine. Des articles récents mentionnent aussi des problèmes de déficit de naissances de garçons par rapport aux filles, qui peuvent atteindre 25 % dans certaines populations nord-américaines, canadiennes et japo-

4. L'abattement est la réduction de la concentration des polluants sous l'effet du traitement.

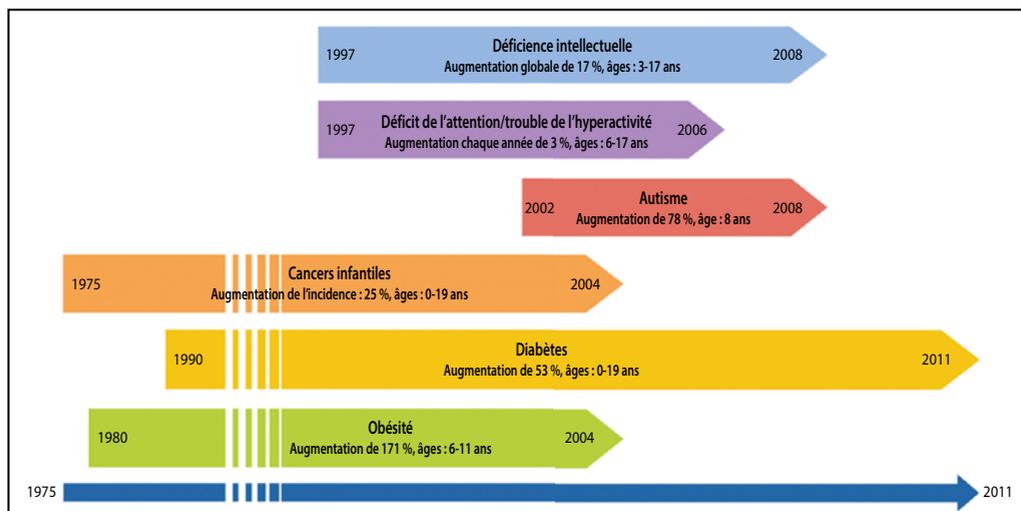


Figure 3

Les statistiques révèlent une augmentation de plusieurs troubles et maladies chez les enfants nord-américains au cours des quarante dernières années.

Source : Pesticide Action Network North America.

naises. On constate également l'augmentation constante de ce qu'on appelle les maladies chroniques non infectieuses non transmissibles, qui représentent aujourd'hui la principale cause de mortalité précoce ou de morbidité⁵ en Europe (cancers, diabète, obésité, maladies cardio-vasculaires et neurodégénératives). Ces observations soulèvent évidemment des questions sur le lien entre la qualité de notre environnement et notre santé, et par conséquent soulèvent aussi la question du rôle de l'eau dans cette exposition aux micropolluants de l'environnement.

Pour illustrer ce point, quelques statistiques proposées par une association nord-américaine sont présentées sur la **Figure 3**. Ces statistiques concernent un ensemble de pathologies observées chez les enfants

5. Morbidité : rapport du nombre des malades au nombre des personnes saines dans une population donnée et pendant un temps déterminé.

nord-américains, avec des chiffres qui peuvent être impressionnants dans certains cas, notamment pour l'augmentation du diabète et de l'obésité. Ces maladies, évidemment, ne sont pas liées uniquement à un facteur environnemental, elles sont connues pour être multifactorielles. Des facteurs génétiques et sociologiques interviennent aussi, mais on estime que des facteurs environnementaux peuvent jouer un rôle dans ces maladies.

D'autres statistiques proposées par l'Agence Internationale de Recherche sur le Cancer montrent l'évolution des taux de mortalité par cancer dans différents pays industrialisés (**Figure 4**). On voit que, sur les soixante dernières années, le taux de mortalité par cancer a été multiplié par deux ou trois selon les pays. L'OMS estime aujourd'hui qu'environ 20 % des cancers dans le monde sont attribuables à une cause environnementale, et qu'un peu plus de 20 % des décès

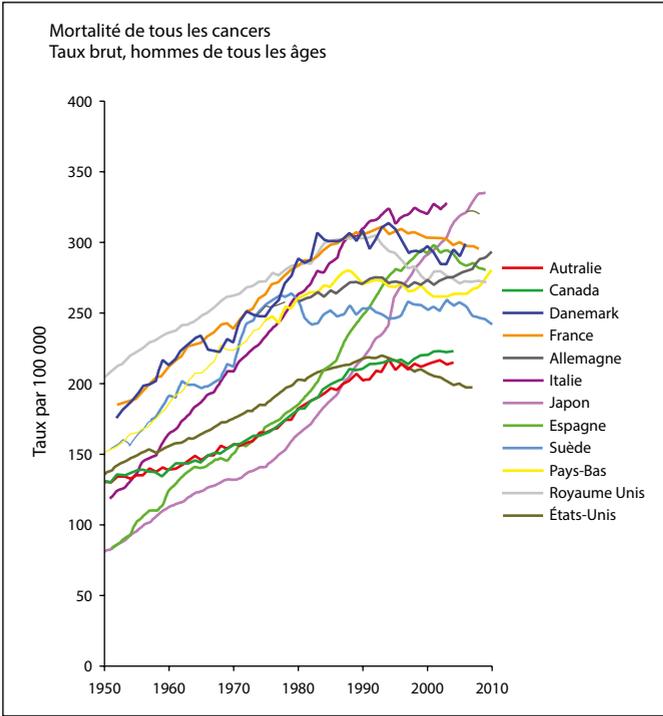


Figure 4

Taux brut de mortalité par cancer chez les hommes dans plusieurs pays au cours des soixante dernières années.

Source : International Agency for Research on Cancer (IARC), 2012.

prématurés sont aussi attribuables à une cause environnementale. On est donc aujourd’hui dans un contexte de lien de plus en plus évident entre l’environnement et la santé humaine.

2 L'étude des micropolluants dans le cycle de l'eau

La **Figure 5** représente les deux domaines d'intervention de Suez Environnement dans le cycle de l'eau : la collecte et le traitement des eaux usées, ainsi que leur rejet dans l'environnement une fois qu'elles sont traitées ; viennent ensuite le captage des eaux dans l'en-

vironnement, la production et la distribution d'eau potable.

Rappelons que, contrairement à ce que pensent beaucoup de Français, ces deux activités sont totalement séparées. Il est interdit de produire de l'eau potable à partir d'eaux usées. Par contre, il y a tout de même un point de connexion possible entre ces deux activités : on rejette des eaux usées traitées dans l'environnement et l'on reprend cette eau environnementale pour produire de l'eau potable. Il y a donc une possibilité de diffusion de certains de ces micropolluants et de reprise dans un captage pour la production d'eau potable.

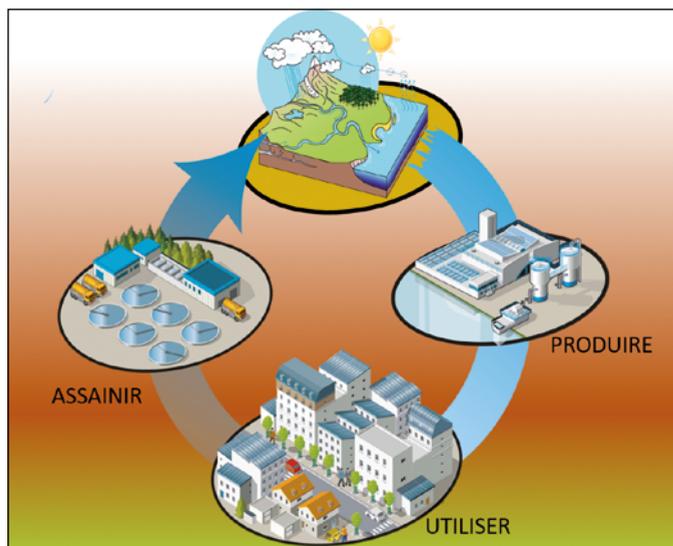


Figure 5

Le cycle domestique de l'eau.

2.1. Le projet AMPERES : étude des flux d'entrée et de sortie de stations d'épuration urbaines

La **Figure 6** représente les résultats d'un programme de recherche appelé AMPERES mené en collaboration avec l'Irstea⁶ de Lyon (Institut national de recherche en sciences

6. www.irstea.fr

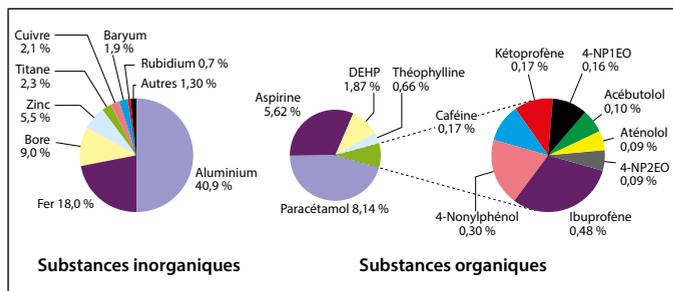


Figure 6

Principaux flux de micropolluants, organiques ou minéraux, en entrée de stations d'épuration urbaines. 128 substances, 21 stations d'épuration.

Source : Projet AMPERES (2006-2009).

pour l'environnement et l'agriculture). Dans le cadre de ce programme, des bilans entrée-sortie sur une centaine de micropolluants organiques et minéraux ont été réalisés dans une vingtaine de stations d'épuration urbaines. Le flux de micropolluants entrant avait été estimé à 400 mg par jour et par habitant en moyenne. On voit que ce flux est essentiellement constitué de substances minérales avec beaucoup d'aluminium, du fer, du bore et du zinc. Dans la fraction organique, qui est minoritaire, on retrouve beaucoup de médicaments (avec en tête de liste le paracétamol et l'aspirine) ; puis viennent un certain nombre de substances qui font partie des substances prioritaires européennes à surveiller, évoquées dans d'autres chapitres de l'ouvrage *Chimie et expertise, santé et environnement* (EDP Sciences, 2016), notamment des phtalates⁷, des alkylphénols⁸ et d'autres médicaments.

7. Phtalates : sels ou esters dérivés de l'acide phtalique, utilisés comme plastifiants (on en trouve dans la quasi-totalité des produits en PVC), mais aussi dans les industries cosmétique et pharmaceutique.

8. Alkylphénols : famille de composés dérivés du phénol utilisés notamment dans les détergents, les carburants et les lubrifiants. Les alkylphénols font partie de la liste des 87 substances à rechercher obligatoirement dans le cadre de l'opération « recherche et réduction des rejets des substances dangereuses dans l'eau » RSDE de l'INERIS (Institut National de l'environnement industriel et des risques) lancée dans chaque région en 2002, dans le cadre de l'opération nationale découlant de la circulaire du 4 février 2002 du ministère chargé de l'Environnement.

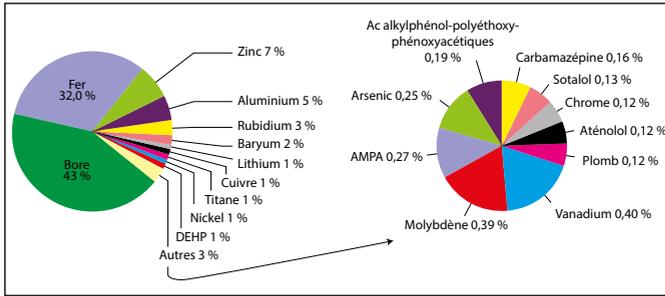


Figure 7

Principaux flux de micropolluants, minéraux ou organiques, en sortie de stations d'épuration urbaines. 128 substances, 21 stations d'épuration.

Source : Projet AMPERES (2006-2009).

Si on regarde en sortie de station d'épuration (**Figure 7**), ce flux de micropolluants passe de 400 à 90 mg par jour et par habitant en moyenne, toujours essentiellement constitué d'éléments minéraux (> 90 %). L'aluminium est correctement éliminé ; en revanche, on retrouve toujours beaucoup de bore (qui provient essentiellement des lessives), qui n'est quasiment pas éliminé. On retrouve aussi du fer, du zinc et d'autres métaux.

La composition organique a été un peu modifiée. On retrouve toujours des molécules issues des médicaments, mais pas les mêmes. Certains médicaments sont assez persistants comme la carbamazépine (antiépileptique), que l'on retrouve tout au long du cycle de l'eau, et qui est un composé très difficile à éliminer. On trouve toujours des alkylphénols et des pesticides ou des sous-produits de pesticides.

Les stations de traitement des eaux usées sont donc peu adaptées à l'élimination des micropolluants.

C'est le bilan que l'on peut tirer l'étude de cette première

partie du cycle de l'eau. Nos stations d'épuration, telles qu'elles sont conçues aujourd'hui, ont été faites pour éliminer ce que l'on appelle des macropolluants (essentiellement du carbone, de l'azote et du phosphore). Malgré tout, et c'est une bonne nouvelle, on constate qu'elles présentent une certaine efficacité, et que les procédés physico-chimiques et biologiques (**Figure 8**) mis en œuvre aujourd'hui éliminent une bonne partie de ces micropolluants (environ 80 %).

La moins bonne nouvelle est que ces performances sont très variables selon les composés, et que surtout, il ne s'agit pas vraiment d'une élimination. Sur les 80 %, 20 % sont réellement éliminés, soit par stripping⁹ lors de l'aération, pour les composés les plus volatils qui passent dans l'air, soit par biodégradation. Mais pour les 60 % restants, il s'agit simplement d'un déplacement, c'est-à-dire un

9. Stripping : processus de séparation physique lors duquel un ou plusieurs composés sont éliminés d'un liquide par un courant de vapeur. Il y a donc un transfert de masse de la phase liquide vers la phase gazeuse qui, dans le cas du traitement des eaux usées, se retrouve chargée en polluants.

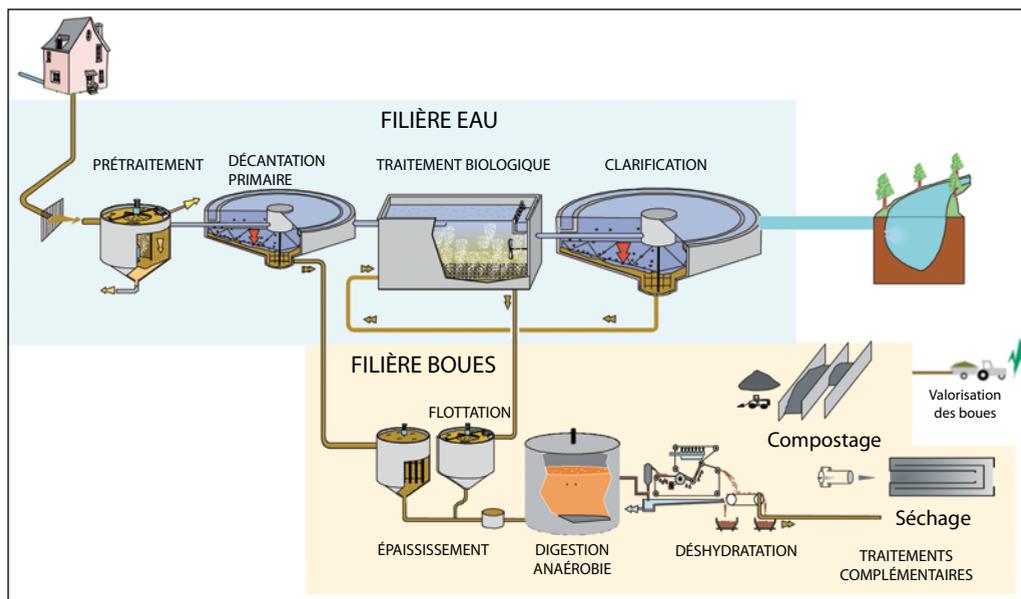


Figure 8

Les procédés physico-chimiques et biologiques de traitement des eaux usées dans une station d'épuration.

transfert des micropolluants vers les boues des stations d'épuration, ce qui ne fait que déplacer le problème. Cela justifie donc tous les travaux qui sont menés aujourd'hui pour estimer l'impact de ces boues lorsqu'elles sont utilisées comme amendement organique¹⁰ en agriculture.

On constate que certaines substances, comme le bore et un certain nombre de médicaments, sont peu éliminées. On va donc évidemment les retrouver en sortie, et elles vont diffuser dans les milieux aquatiques. Certaines autres substances sont très bien éliminées, mais elles sont

10. Amendement organique : produit utilisé en agriculture pour améliorer les propriétés physiques du sol, notamment en enrichissant le sol en oligoéléments dont les plantes ont besoin pour se développer. L'amendement organique est issu du compostage des déchets organiques (déchets alimentaires, boues issues de l'épuration des eaux).

présentes à de telles concentrations en entrée de station d'épuration qu'elles sont encore détectables en sortie.

2.2. La pollution par les eaux pluviales

Beaucoup de ces micropolluants, soit parce qu'ils sont volatils, soit parce qu'ils sont transformés en aérosols liquides ou solides, ou adsorbés sur les poussières atmosphériques, sont retrouvés dans les retombées sèches¹¹ ou dans les eaux pluviales. Ces dernières contribuent donc de façon significative, avec des concentrations et des flux variables, à la diffusion des micropolluants dans l'environnement, via les réseaux, déversoirs d'orages et stations d'épuration (Figure 9).

11. Retombées sèches : matières particulaires présentes dans l'atmosphère, entraînées au sol par la force gravitationnelle.

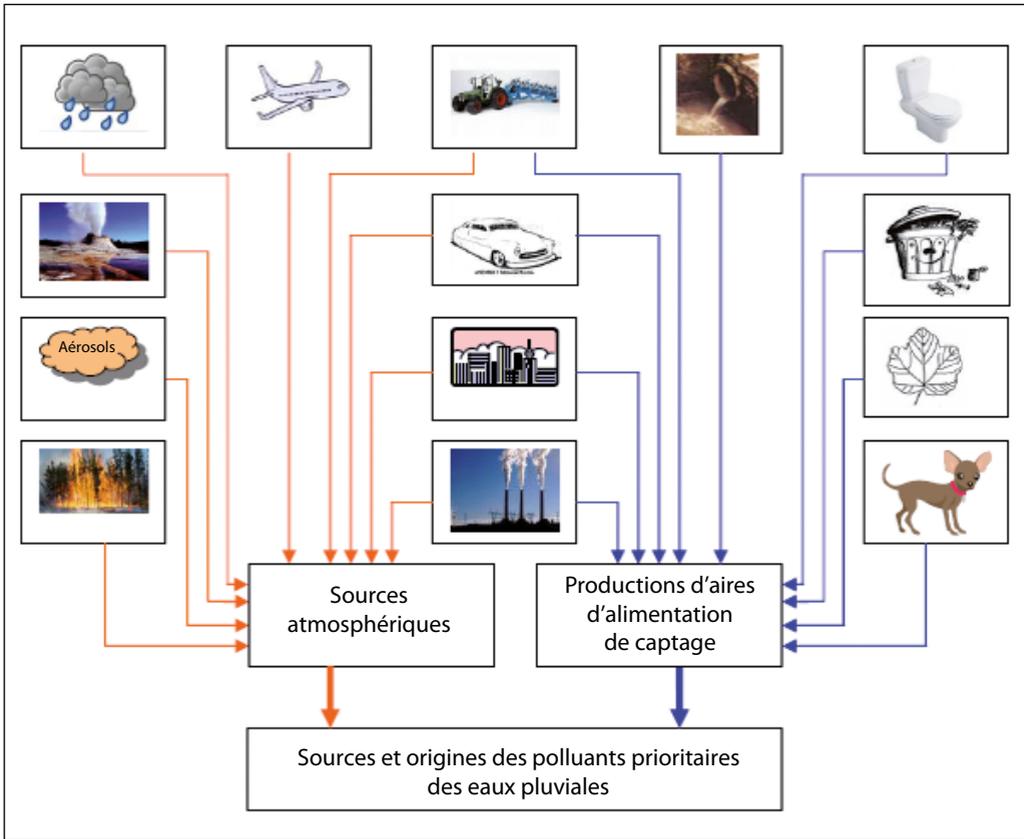


Figure 9

Sources et origines des principaux polluants des eaux pluviales.

2.3. La pollution des ressources utilisées pour la production de l'eau potable

Les rejets des stations d'épuration ainsi que les sources diffuses de pollution présentes dans les aires d'alimentation de captages ont une influence sur la qualité des ressources utilisées pour la production d'eau potable (Figure 10). Un constat qui peut être fait aujourd'hui est que globalement, sur les ressources superficielles, le nombre et les concentrations de molécules issues des médicaments sont aujourd'hui très supérieures à ceux des pesticides, pour lesquels on constate depuis vingt ans une très nette amélioration



Figure 10

L'analyse des captages d'eaux superficielles pour la production d'eau potable montre aujourd'hui une présence de médicaments très supérieure à celle des pesticides.

de la situation. Même si les statistiques d'occurrence dans les masses aquatiques restent stables, on observe en revanche une très nette diminution du nombre de molécules et des concentrations de pesticides détectées dans l'environnement. Si on compare aujourd'hui les pesticides aux médicaments, les molécules qui sont issues de ces derniers constituent finalement aujourd'hui une préoccupation plus importante.

Le **Tableau 1** montre un exemple de résultat d'analyse des pesticides dans un captage, en aval de la ville de Paris, à Aubergenville, où Suez environnement pos-

sède une importante usine de production d'eau potable située après les rejets des grandes stations d'épuration urbaines de la région parisienne. Alors qu'on analyse en routine quelques centaines de molécules de pesticides, on ne détecte en réalité dans ce captage d'eau de Seine que quelques molécules, à des concentrations au maximum de quelques dizaines de nanogrammes par litre.

Si on compare ce résultat à l'analyse des molécules de médicaments trouvées dans le même captage, la liste est beaucoup plus longue, et les concentrations beaucoup plus importantes (**Tableau 2**).

Tableau 1

Pesticides présents dans la Seine en aval de Paris.

Paramètres	unité	SEINE Aubergenville				
		09/09/08	16/09/08	23/09/08	13/10/08	20/10/08
Lindane	ng/l	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Chlorpyrifos méthyle	ng/l	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Alalchor	ng/l	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Chlorpyrifos éthyle	ng/l	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Aldrine	ng/l	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Isodrine	ng/l	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Chlorfenvinphos	ng/l	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Endosulfan	ng/l	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Dieldrine	ng/l	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Endrine	ng/l	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
4,4'-DDT	ng/l	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Atrazine	ng/l	23	17	23	17	19
Diuron	ng/l	43	37	39	40	32
Isoproturon	ng/l	1	< 1	3	3	3
Simazine	ng/l	9	5	5	4	3

Tableau 2

Médicaments présents dans la Seine en aval de Paris.

Béta-bloquants :

Paramètres	unité	SEINE Aubergenville				
		09/09/08	16/09/08	23/09/08	13/10/08	20/10/08
Aténolol	ng/l	99,5	96,3	66,8	155,2	143,6
Sotalol	ng/l	73,0	65,9	75,3	117,1	97,0
Nadolol	ng/l	1,7	1,0	1,8	2,8	4,0
Acébutolol	ng/l	40,3	43,3	32,9	75,6	67,3
Métoprolol	ng/l	8,7	8,5	9,3	13,5	13,5
Propranolol	ng/l	12,8	8,8	19,1	30,6	29,2
Bisoprolol	ng/l	8,5	7,5	7,6	15,1	12,5

Autres (remarque : la caféine est ici utilisée comme marqueur de pollution d'origine humaine) :

Paramètres	unité	SEINE Aubergenville				
		09/09/08	16/09/08	23/09/08	13/10/08	20/10/08
Caféine	ng/l	315,0	< 1	103,5	530,3	335,1
Carbamazépine	ng/l	81,5	37,3	72,0	68,9	75,6
Nordiazépam	ng/l	3,9	3,4	1,8	3,8	1,5
Amitriptyline	ng/l	3,6	4,1	6,3	3,4	3,2
Ibuprofène	ng/l	31,8	101,9	26,4	49,9	24,2
Paracétamol	ng/l	251,1	210,5	292,3	324,1	246,6
Kétoprofène	ng/l	16,1	12,7	0,01	0,02	0,01
Naproxène	ng/l	39,8	24,4	27,6	40,4	34,7
Aspirine	ng/l	22,9	< 1	8,6	77,1	68,1
Diclofénac	ng/l	60,5	52,2	74,5	76,7	75,0
Gemfibrozil	ng/l	10,3	7,9	7,8	12,4	8,8
Clenbutérol	ng/l	< 0,5	2,3	0,9	< 0,5	< 0,5
Salbutamol	ng/l	1,6	< 1	1,2	0,9	1,7
Terbutaline	ng/l	1,8	< 1	2,0	< 1	1,8
Théophylline	ng/l	73,2	< 1	70,7	152,3	101,3
Fluoxétine	ng/l	1,5	< 0,5	1,4	1,2	0,9
Sulphaméthoxazole	ng/l	-	24,0	-	-	116,0
Roxythromicine	ng/l	< 1	< 1	< 1	16,0	16,0

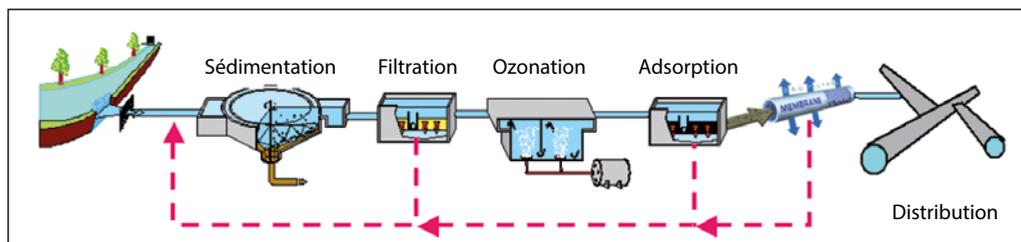


Figure 11

Schéma d'un procédé de potabilisation de l'eau.

2.4. Les micropolluants détectés dans les eaux potables

Grâce à l'évolution des techniques analytiques, et du fait que l'on atteint aujourd'hui des limites de détection très faibles, il est possible de détecter des traces de tous ces micropolluants dans l'eau potable (Figures 11 et 12), au robinet du consommateur. Cependant, si l'on considère ces molécules une par une, les concentrations détectées se situent dans tous les cas très en dessous des seuils

d'effets biologiques sur l'homme et sur les animaux.

Par ailleurs, et jusqu'à présent, à notre connaissance, aucune hormone naturelle ou synthétique, ni aucun effet perturbateur endocrinien (mesuré par des tests *in vitro* ou *in vivo*) n'ont pu être détectés dans une eau potable, au moins en Europe. Si ce constat est rassurant *a priori*, il reste cependant encore une question importante pour laquelle nous attendons toujours une réponse aujourd'hui, qui est celle des effets sanitaires possibles, à long terme, de l'exposition simultanée à tout cet ensemble de micropolluants, à très faible dose¹².



Figure 12

Usine de potabilisation de l'eau de Morsang sur Seine (Essonne).

3 Traitement et prévention

Face au constat de cette présence de micropolluants dans le cycle de l'eau, la question qui se pose maintenant est de savoir s'il faut agir, où et comment. Il faut rappeler ici qu'il n'appartient pas aux opérateurs des services de l'eau de répondre à ces questions,

12. Au sujet des faibles doses, voir le **Chapitre de P. Hubert** dans *Chimie et expertise, santé et environnement*, EDP Sciences, 2016.

et que les métiers de l'eau sont extrêmement encadrés sur le plan réglementaire, notamment par le ministère de l'Environnement pour ce qui concerne les rejets dans l'environnement, et par le ministère de la Santé, pour ce qui concerne l'eau potable. Les réglementations imposent aux opérateurs à la fois des obligations de moyens à mettre en œuvre et des obligations de résultats.

3.1. L'approche législative européenne

Le dispositif réglementaire national résulte essentiellement d'un dispositif législatif européen, et, pour ce qui concerne les micropolluants, l'Europe développe depuis quelques dizaines d'années une politique assez cohérente qui vise à protéger l'homme et l'environnement vis-à-vis des substances les plus dangereuses, notamment celles qui sont persistantes, bioaccumulables¹³, mutagènes, cancérigènes ou reprotoxiques¹⁴.

Cet objectif se traduit par un ensemble de textes législa-

tifs assez cohérents, et qui se complètent très bien les uns avec les autres. Ils visent :

- d'une part l'élimination ou la réduction d'usage des substances dangereuses, comme décrit dans les **Chapitres de C. Gourlay-Francé** et **É. Thybaud**, dans *Chimie et expertise, santé et environnement*. Le texte phare de ces dernières années, dans ce domaine, est certainement le règlement REACH (voir le **Chapitre de I. Rico-Lattes**, dans *Chimie et expertise, santé et environnement*), qui complète des textes également importants pour le domaine de l'eau, portant plus spécifiquement sur les biocides ou les pesticides. Globalement, on estime que REACH devrait conduire au retrait du marché ou à la limitation d'usage de plusieurs milliers de substances pour l'eau, ce qui signifie qu'à terme, elles pourraient disparaître du cycle de l'eau ;
- d'autre part, certains textes visent plus spécifiquement la protection des milieux aquatiques. Le texte phare de ces dernières années est certainement la **Directive Cadre sur l'Eau**, avec ses directives filles sur les eaux de surface et les eaux souterraines. Elle impose des normes de qualité environnementale qui se traduiront prochainement par des limitations et des normes à respecter sur les rejets dans l'environnement.

Dans la mesure où ces listes de substances prioritaires n'ont pas été reprises totalement dans les paramètres de potabilité, puisque la volonté évidente de l'Europe est de faire porter l'effort sur une

13. Bioaccumulable : accumulable dans un organisme (végétal, animal, fongique, microbien).

14. Composés cancérigènes, mutagènes, reprotoxiques (CMR) : « mutagènes » désigne les composés capables de provoquer une mutation au sein d'un individu ; « cancérigènes » désigne les composés pouvant entraîner la survenue d'un cancer suite à un mode d'action génotoxique ou non ; « reprotoxiques » sont ceux qui affectent les capacités reproductrices, en réduisant la fertilité ou en entraînant des anomalies du développement prénatal.

réduction à la source de ces pollutions, la stratégie d'une entreprise comme Suez environnement se doit d'être en phase avec cet objectif européen de priorité à la protection des ressources. C'est pourquoi dans ce contexte, l'essentiel de nos efforts de ces dernières années a porté sur le développement de solutions pour le traitement des effluents et des rejets d'eaux usées. Des solutions ont également été développées pour la potabilisation, même si la pression réglementaire dans ce domaine est moindre.

3.2. L'assainissement des eaux usées

3.2.1. Traitements tertiaires extensifs

Les traitements tertiaires viennent s'ajouter aux traitements déjà en place sur les stations d'épuration. Les traitements dits extensifs consistent en des zones humides artificielles¹⁵ (Figure 13A) pouvant aller du simple filtre planté de roseaux¹⁶ (Figure 13B) jusqu'à des systèmes beaucoup plus complexes comportant une suite de bassins permettant, selon leur volume et leur profondeur, de jouer sur les

15. Voir aussi *La chimie et la nature*, chapitre de É. Blin, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2012.

16. Les roseaux ont la particularité de former un tissu racinaire et un réseau de galeries qui drainent, apportent de l'oxygène et servent de support aux bactéries aérobies. Ces bactéries, ainsi que la macrofaune du sol, ont un rôle de dégradation et de minéralisation de la matière organique, qui devient dès lors assimilable par les plantes.

temps de rétention hydraulique¹⁷ et ainsi de favoriser soit la décantation, soit la pénétration dans le sol – la filtration naturelle dans le sol est un procédé très efficace pour retenir les micropolluants – soit l'action du rayonnement ultra-violet, qui permet à la fois d'éliminer certains micropolluants et de réduire la charge microbienne. Enfin, on diversifie les plantations végétales pour capter sélectivement à l'aide de plantes spécifiques certains micropolluants, ou permettre à d'autres plantes qui présentent un système racinaire complexe de développer un biofilm¹⁸ contribuant à la biodégradation de ces micropolluants (Figures 13C et D). Les limites de ces procédés sont, bien évidemment, la disponibilité et le coût des terrains, mais ces zones humides permettent d'éliminer efficacement une bonne partie des micropolluants.

3.2.2. Traitements tertiaires intensifs physico-chimiques

Les procédés tertiaires physico-chimiques développés récemment pour l'élimination des micropolluants sont essentiellement issus d'une transposition du domaine de l'eau potable au domaine des eaux usées.

Ces procédés physico-chimiques permettent de traiter des grands débits avec une très grande efficacité sur des installations très compactes. Le couplage de l'oxydation à

17. Temps de rétention hydraulique : durée du séjour de l'eau à traiter dans les bassins.

18. Biofilm : ensemble de bactéries agglomérées qui colonisent un milieu.

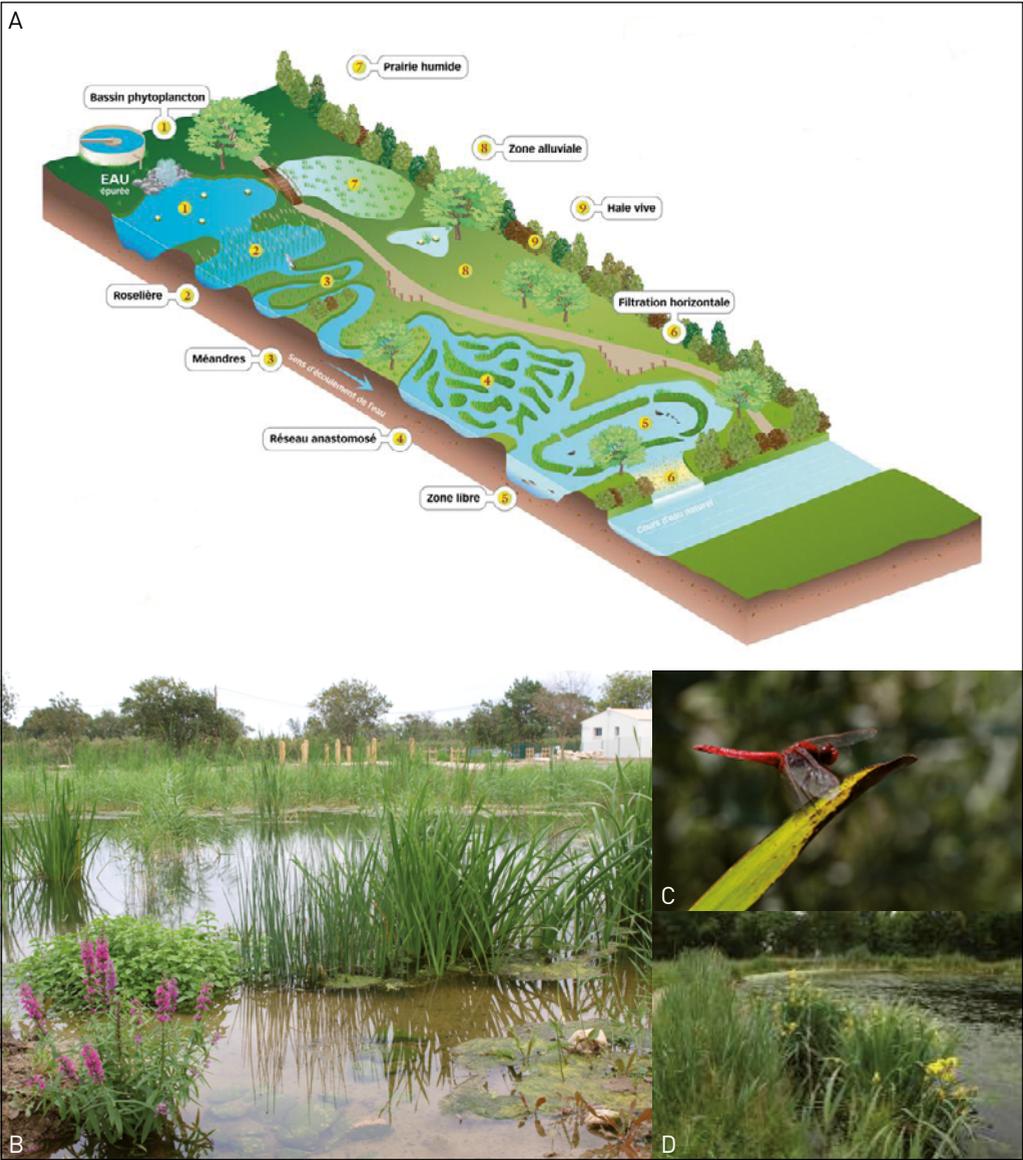
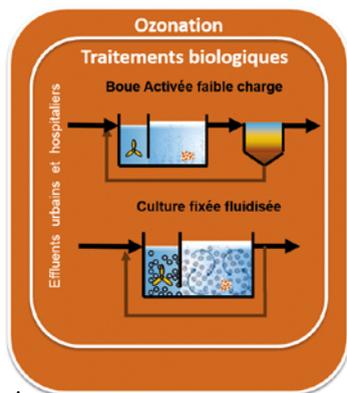


Figure 13

Les zones humides artificielles, une combinaison d'écosystèmes pour favoriser : les différents processus d'élimination des micropolluants (interactions plantes/micro-organismes aux différentes interfaces sol/eau/air), la diversité écologique et l'intégration paysagère (design et gestion différenciée des différents habitats, trames vertes et bleues), les services écosystémiques apportés par les zones humides. On atteint plus de 70 % d'élimination de plus de la moitié des molécules étudiées.

l'ozone avec différents procédés de traitement biologique est extrêmement efficace (Figure 14). L'ozone casse les molécules et les oxyde, et le

traitement biologique permet de finir la « digestion » de ces molécules. Cela permet d'éliminer plus de 70 % des micropolluants organiques.



A

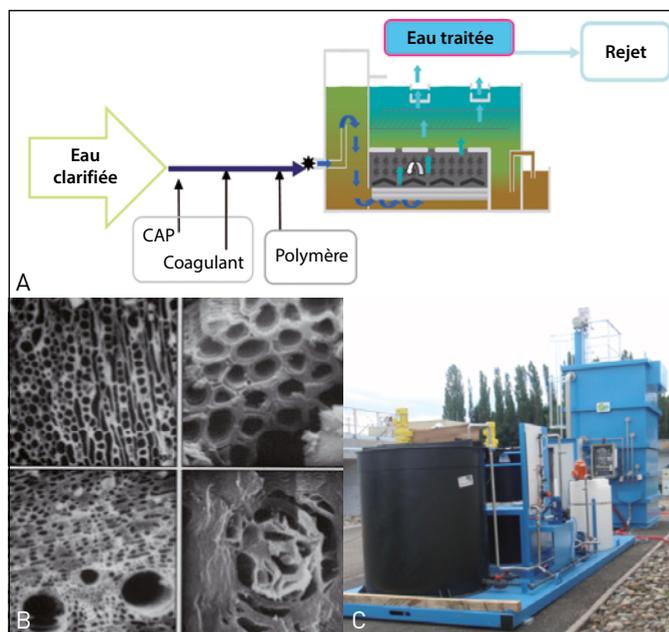


Figure 14

A) Couplage de l'oxydation chimique à l'ozone avec différents procédés de traitement biologique ; B et C) mise en œuvre des procédés d'ozonation par Suez Environnement.

Figure 15

A) Procédé de traitement de l'eau par réacteur à lit fluidisé de charbon actif en poudre ; B) vue au microscope électronique des grains de charbon actif sur lesquels est adsorbée la majorité des micropolluants organiques ; C) équipement nécessaire à la mise en œuvre d'un procédé d'adsorption sur charbon actif en poudre dans un réacteur à lit fluidisé.



Une autre solution développée ces dernières années est l'adsorption des micropolluants sur du charbon actif¹⁹. La filtration sur charbon actif en grain, ou encore mieux,

l'utilisation de réacteurs à lit fluidisé (Figure 15A), dans lesquels on injecte du charbon actif en poudre – ce qui permet de développer une très grande surface de contact (Figure 15B) –, sont très efficaces pour retenir beaucoup de ces micropolluants organiques (plus de 70 % des micropolluants organiques).

19. Charbon actif : charbon traité de façon à présenter une très grande surface par unité de masse (environ 2 000 m²/g) et utilisé comme catalyseur, adsorbant, décolorant, etc.

3.3. La potabilisation de l'eau

3.3.1. Procédés extensifs : réalimentation artificielle de nappe

On peut, comme pour l'assainissement, utiliser des procédés extensifs, basés sur la réalimentation des nappes phréatiques, pour potabiliser l'eau et éliminer les micropolluants. La **Figure 16A** présente le schéma d'un tel procédé. On exploite dans ce cas les phénomènes de filtration naturelle dans le sol comme par exemple en aval de Paris pour alimenter les usines de production d'eau potable du Pecq-Croissy ou d'Aubergenville (Yvelines). Dans ce dernier cas, l'eau est pompée une première fois dans la nappe d'origine alluviale²⁰ où elle a donc subi une première filtration naturelle à travers le lit de la rivière, puis ré-infiltrée dans la nappe à travers des bassins d'alimentation, ce qui permet de lui faire subir une deuxième filtration naturelle. On peut même augmenter la performance de cette filtration naturelle en tapissant le fond des bassins de charbon végétal. Cette eau est ensuite pompée une deuxième fois pour être traitée sur une filière conventionnelle physico-chimique. Cette combinaison de procédés naturels et de procédés physico-chimiques est d'une très grande efficacité pour l'élimination des micropolluants, et permet de produire une eau de très grande qualité, même à partir d'une ressource relativement dégradée (**Figure 16B**).

20. Masse d'eau présente dans les sédiments d'une rivière.

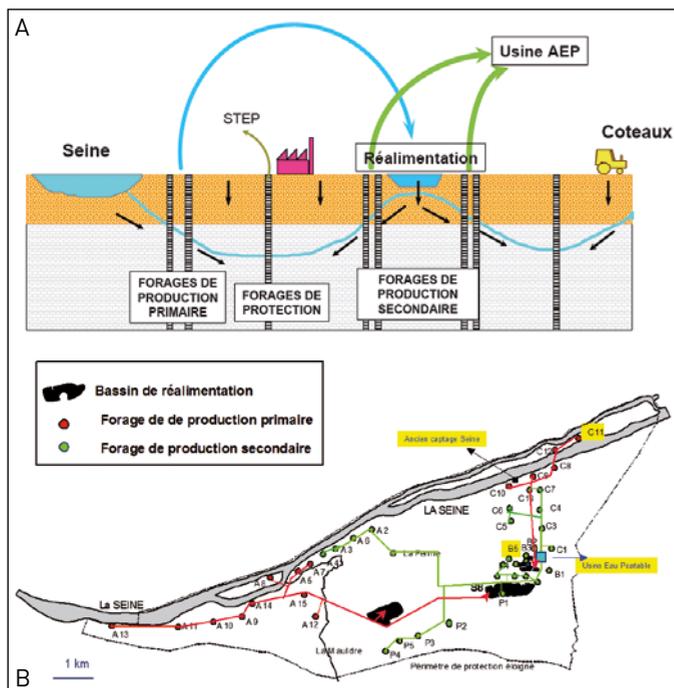


Figure 16

A) Procédé de potabilisation par réalimentation de nappe du site d'Aubergenville (78) ; plan du site localisant les lieux de forage de production primaire (premier pompage) et de production secondaire (deuxième pompage et traitement).

3.3.2. Procédés intensifs : adsorption et procédés membranaires

Les procédés intensifs, plus traditionnels dans nos métiers, sont également efficaces. L'ozonation décrite précédemment est utilisée depuis plus d'un siècle pour le traitement de l'eau potable, et le charbon actif en grains est fréquemment utilisé pour le traitement des eaux superficielles. On peut améliorer la performance d'abattement des micropolluants en utilisant du charbon actif en poudre dans des réacteurs à lit fluidisé (**Figure 17**). Finalement, dans les situations extrêmes, lorsqu'on est face à des molécules très réfractaires qui ré-

Figure 17

L'adsorption sur charbon actif en poudre en lit fluidisé, un procédé intensif de potabilisation de l'eau (unité pilote en plexiglass permettant de visualiser le lit de boue).



sistent à tous ces traitements, il reste la solution ultime, un peu plus chère mais très efficace, de la filtration membranaire, la nanofiltration ou l'osmose inverse (**Figures 18A et B**). Ces procédés ont été développés pour le dessalement de l'eau de mer ou le traitement des eaux saumâtres, mais ils permettent aussi d'éliminer la plupart des micropolluants organiques et minéraux.

**Figure 18**

Équipements industriels de procédés de filtration membranaires (nanofiltration, osmose inverse).

Le traitement des micropolluants chimiques : quelles perspectives ?

Il faut aujourd'hui faire face à une pollution diffuse de tous les compartiments environnementaux : air, sol, eau. Le contexte législatif européen est heureusement assez favorable à une amélioration de la situation, avec notamment une stratégie de réduction à la source des substances les plus dangereuses.

Dans ce contexte, l'objectif à court terme d'une société comme Suez Environnement est évidemment d'abord de respecter les normes de qualité environnementale imposées par les directives européennes, et donc de contribuer à cet effort de protection des ressources aquatiques en optimisant la gestion de flux des pollutions vers l'environnement.

Il ne s'agit pas uniquement de mettre en œuvre des solutions de traitement de l'eau. Ces traitements doivent bien entendu être mis en place là où c'est nécessaire, mais les solutions peuvent aussi consister simplement à éviter des pics de pollutions, ce qui suppose la mise en place d'une surveillance en ligne des polluants sur nos réseaux de collecte des eaux usées, et une optimisation des flux en utilisant au maximum les capacités de stockage de nos réseaux de collecte d'eaux usées, afin d'éviter de générer des pics de pollution.

Les techniques de traitement efficaces sont disponibles pour l'assainissement et la potabilisation, mais il reste encore des questions auxquelles il faut répondre. La première se situe dans le domaine de l'assainissement : les performances des procédés sont validées sur la base de mesures physico-chimiques, mais il faut également les valider en utilisant des tests biologiques reconnus, pour vérifier non seulement le bénéfice environnemental de ces traitements, mais aussi l'absence d'effets néfastes des traitements eux-mêmes. Si l'on utilise par exemple de l'ozone ou des procédés d'oxydation avancée, il faut s'assurer notamment que l'on ne produit pas de sous-produits toxiques. Face au nombre considérable de tests biologiques *in vivo* ou *in vitro* existant aujourd'hui, il y a véritablement un besoin de lignes directrices ou de recommandations officielles pour les tests à appliquer afin de valider les procédés utilisés.

L'autre point, déjà évoqué pour l'eau potable, est d'évaluer les risques liés à l'exposition à long terme aux très faibles doses de micropolluants que l'on peut trouver dans l'eau potable, afin de savoir s'il est nécessaire de mettre en place des traitements encore plus poussés de potabilisation.