

# Traitement des contaminants dans les usines de potabilisation

*D'après la conférence de Laurent Moulin, docteur en microbiologie, responsable du département Recherche et Développement à Eau de Paris, un établissement public en charge de l'eau à Paris.*

## 1 Introduction : contexte historique

### 1.1. L'épidémiologie de l'eau au XIX<sup>e</sup> siècle

Commençons par un peu d'histoire en rappelant les noms de personnalités importantes dans le monde de l'eau, notamment John Snow. C'est en quelque sorte le premier épidémiologiste, le premier à relier une épidémie de choléra à Londres, en 1854, à la distribution d'eau. Nous sommes encore dans les balbutiements de la théorie microbienne, nous ne sommes pas encore sûrs que les maladies viennent des microbes. Mais il ne va pas se baser sur cela et va établir une carte de la population (**Figure 1**) pour localiser les



Figure 1

Carte des cas de choléra à Londres en 1854 (en rouge) et des points d'eau (en bleu).

endroits où les gens meurent. Il se rend compte qu'ils sont tous à proximité d'une pompe, et il fait le lien : c'est en buvant cette eau que les gens tombent malades. C'est la première fois qu'on réalise que l'eau potable, l'eau qu'on ingère, est un risque sanitaire important. Beaucoup de travaux vont suivre. Robert Koch<sup>1</sup> va montrer que la filtration sur sable est très importante pour réduire maladies et épidémies. En même temps, les Anglais, avec Grace et Percy Frankland<sup>2</sup>, observent qu'on peut suivre l'efficacité des filtres à sable en mesurant la quantité de bactéries retenues.

### 1.2. La surveillance de la qualité de l'eau ingérée

Tout cela montre qu'il est important sur un plan sanitaire de surveiller la qualité de l'eau, mais, très vite, on se heurte à une difficulté : il existe énormément de maladies différentes et suivre chacune, individuellement, dans le domaine de la microbiologie est compliqué. Comme les bactéries issues des maladies proviennent pour la plupart de matières fécales, l'idée est de se dire que s'il n'y a pas de matières fécales dans l'eau, il est plus probable qu'il n'y ait pas de micro-organismes pathogènes, et donc que l'eau

soit potable. Pour vérifier la présence de matières fécales, on suit des indicateurs fécaux, principalement, au début de ce type d'études, l'*Escherichia coli*<sup>3</sup> (qu'on appelait à l'époque *Bacterium coli*). Ensuite, d'autres indicateurs ont été ajoutés, notamment les entérocoques<sup>4</sup>. Ces deux bactéries ne sont pas dangereuses en elles-mêmes ; elles sont juste représentatives de la présence de matières fécales et montrent un défaut de traitement ou la présence d'une pollution.

L'analyse de la présence de ces traceurs est très simple : on prélève l'eau à analyser, on la filtre sur une membrane dont les pores mesurent 0,45 micromètre. Les bactéries, qui mesurent 1 micromètre, ne peuvent pas passer à travers. Ainsi, les bactéries restent piégées sur la membrane. On place alors cette membrane sur un milieu de culture spécifique, qui permet la croissance des *Escherichia coli* ou des entérocoques, et on peut ensuite dénombrer les bactéries présentes dans l'échantillon d'eau (**Figure 2**). Cette méthodologie (en fait un peu plus complexe dans les détails), mise au point il y a un siècle, reste globalement la même aujourd'hui. On l'utilise pour suivre *E. coli* et les entérocoques, mais aussi d'autres indicateurs comme

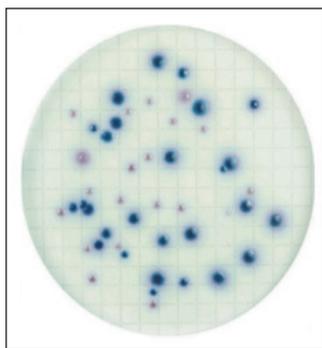


Figure 2

Dénombrement des bactéries sur un échantillon.

1. Médecin allemand, pionnier en microbiologie, connu pour avoir identifié les bactéries responsables de la tuberculose et du choléra.

2. Chimistes britanniques ayant étudié les micro-organismes dans l'eau potable et contribué aux débuts de la microbiologie environnementale.

3. Bactérie intestinale présente chez l'homme et les animaux, parfois responsable d'intoxications alimentaires graves.

4. Bactéries intestinales indicatrices de contamination fécale dans l'eau ou les aliments.

les légionelles<sup>5</sup> ou la flore totale dans l'eau.

## 2 Les ressources en eau de Paris

### 2.1. Les captages des eaux brutes

À Eau de Paris, nous utilisons deux types de ressources en eau.  
 – D'abord, les captages des eaux souterraines, qui viennent d'assez loin de Paris, jusqu'à 100 kilomètres (Figure 3). Elles proviennent des sources de la Vigne, vers Dreux, et des sources du Sud,

5. Bactéries hydriques pouvant causer la légionellose, une maladie pulmonaire souvent liée aux systèmes d'eau chaude mal entretenus.

en Bourgogne-Franche-Comté (les sources de Cochebis). Ces eaux sont transportées à Paris via de grands aqueducs.

– Ensuite, 50 % de l'eau provient des usines de traitement des eaux de surface, situées sur la Seine et la Marne, où l'eau est traitée pour atteindre une qualité optimale car, malheureusement, ces ressources en eau de surface sont relativement contaminées.

### 2.2. Suivi de la qualité des eaux de surface

*Les indicateurs microbiologiques fécaux*

Le laboratoire de la Ville de Paris, et donc d'Eau de Paris, existe depuis très longtemps. Anciennement Observatoire de

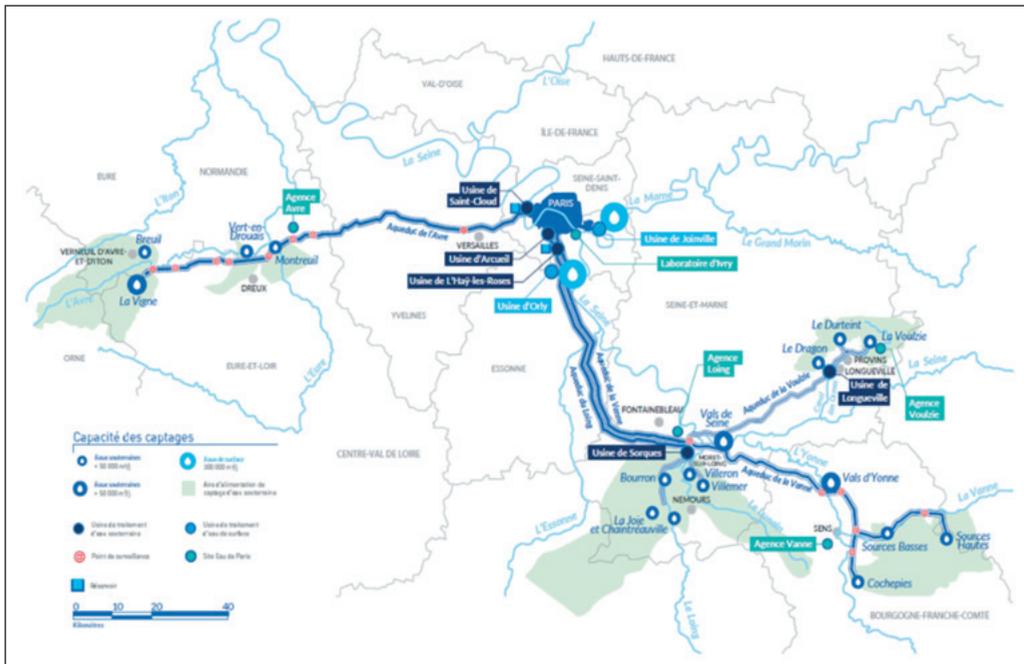


Figure 3

Carte des captages d'Eau de Paris.

Montsouris, il dispose de données sur la qualité de la Seine depuis 1914.

La **figure 4** montre l'évolution du nombre d'*Escherichia coli*. Attention, c'est une échelle logarithmique : chaque augmentation correspond à une multiplication par 10. L'évolution peut sembler relativement plate ; en réalité, les variations sont considérables. Sur ce graphique, les études commencent en 1914 et vont jusqu'à nos jours. On peut observer la lente dégradation de la qualité de l'eau aux points de prélèvement sur la Seine, atteignant presque 1 million d'*E. coli* par 100 ml d'eau à la fin des années 1980.

C'est à ce moment-là que les responsables de l'assainissement, notamment au SIAAP<sup>6</sup>

et à la Ville de Paris, responsables du réseau des égouts, ont entrepris de redimensionner les infrastructures et d'améliorer les traitements. À partir de cette période, la qualité de l'eau de la Seine s'est progressivement améliorée, pour atteindre aujourd'hui un niveau d'environ 1 000 unités formant colonies<sup>7</sup> (UFC) par 100 ml d'eau. Cela démontre néanmoins que la Seine reste fortement contaminée par nos rejets. **Il est important de noter que cette pollution ne provient pas des industries, mais de nos propres rejets domestiques.**

#### Les virus et les parasites

Par ailleurs, les avancées scientifiques ont mis en évidence la présence d'autres pathogènes importants au-delà

6. Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne.

7. Mesure du nombre de bactéries vivantes capables de se multiplier et de former des colonies visibles.

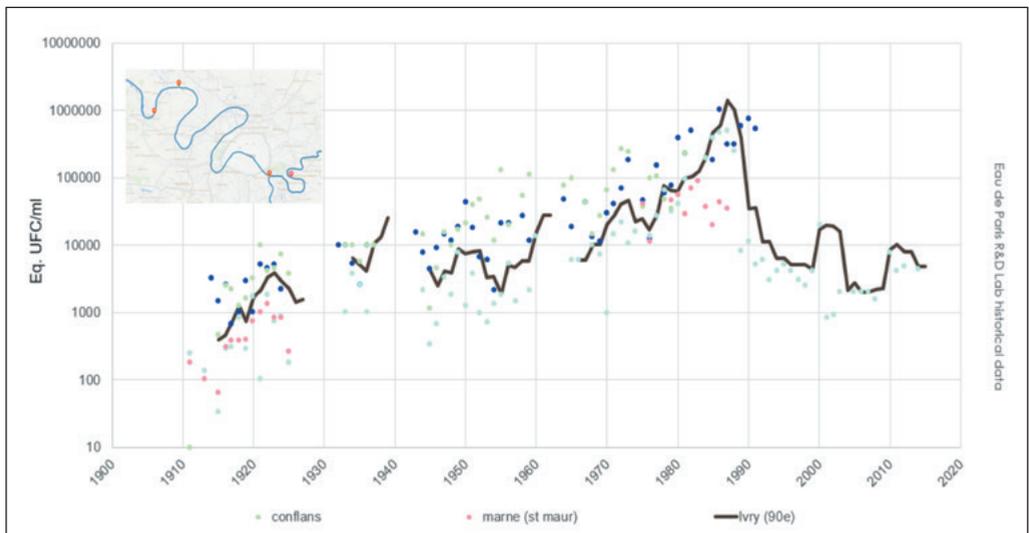


Figure 4

Carte des captages d'Eau de Paris.

des bactéries, responsables de maladies comme le choléra. Ces éléments pathogènes incluent notamment des virus et des parasites. Les virus sont des entités extrêmement petites, mesurant entre 20 et 100 nanomètres, soit 10 à 100 fois plus petits qu'une bactérie, qui mesure en général autour d'un micromètre.

Quant aux parasites, il s'agit de protozoaires<sup>8</sup>, des cellules dotées d'un noyau, bien plus grandes que les virus. Ces organismes, d'une taille d'environ 10 à 15 micromètres, sont responsables de gastroentérites et peuvent être transmis des animaux à l'homme. Les *Giardia*<sup>9</sup> et les *Cryptosporidium*<sup>10</sup> (souvent appelés « crypto ») en sont des exemples notables (Figure 5). Ces parasites ont beaucoup fait parler d'eux ces dernières années, notamment à cause d'épisodes de contamination de l'eau potable ayant provoqué des épidémies de gastroentérites.

Lorsque l'on a commencé à s'intéresser à ces micro-organismes, la question s'est posée de savoir si on pouvait les détecter efficacement. Les évolutions technologiques, comme l'apparition de la biologie moléculaire, ont révolutionné ce domaine. Au lieu de simplement chercher les

bactéries capables de se développer sur des milieux spécifiques, on peut désormais détecter directement la présence de leur génome, c'est-à-dire de leur ADN ou de leur ARN. Cela permet de quantifier les virus présents dans l'environnement.

Depuis 2015, des études ont été menées pour vérifier si la Seine était contaminée par des virus entériques humains, transmis par voie oro-fécale<sup>11</sup> et infectant principalement les humains. Pour cela, des échantillons de 20 litres d'eau ont été prélevés afin de mesurer les concentrations virales. Les résultats ont révélé la présence de deux familles importantes de virus dans les eaux de surface de la Seine et de la Marne : les adénovirus et les norovirus<sup>12</sup> (Figure 6). Ces virus proviennent principalement

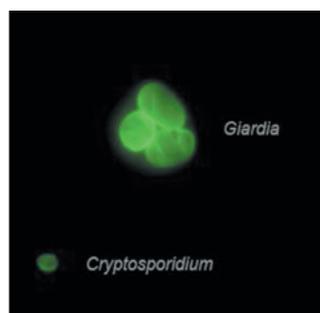


Figure 5

*Giardia et Cryptosporidium.*

11. Transmission d'agents pathogènes par ingestion d'eau ou d'aliments contaminés par des matières fécales.

12. Virus très contagieux causant des gastroentérites aiguës, souvent associés à des épidémies alimentaires.

8. Micro-organismes unicellulaires eucaryotes souvent présents dans l'eau, dont certains peuvent causer des maladies.

9. Protozoaire parasite provoquant des troubles digestifs après ingestion d'eau ou d'aliments contaminés.

10. Protozoaire responsable de diarrhées, transmis par l'eau ou les aliments contaminés.

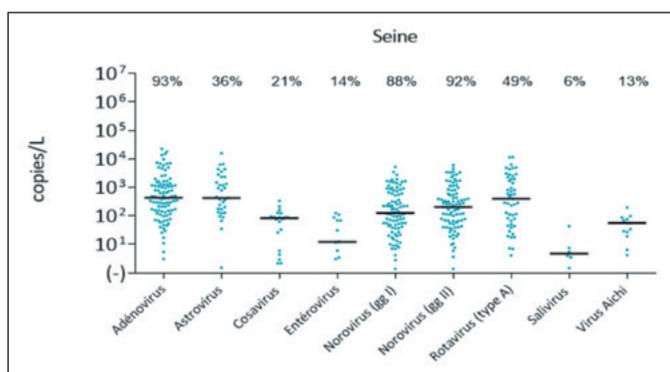


Figure 6

Mesure de la présence de virus dans l'eau de la Seine et de la Marne.

des eaux usées, ce qui était attendu, mais il était essentiel de confirmer leur présence pour adapter les méthodes d'élimination.

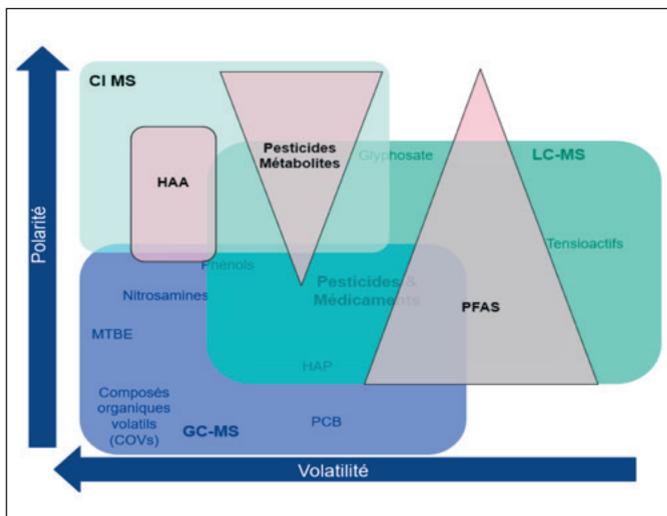
*Les polluants organiques :  
molécules anthropiques  
et métabolites*

Par-delà des recherches sur les agents pathogènes microbiologiques, dès les années 1970, les scientifiques ont commencé à identifier des molécules anthropiques (issues des activités humaines et industrielles) dans l'environnement. Ces molécules, souvent issues de traitements ou de rejets industriels, ont fait l'objet de nombreuses analyses grâce aux progrès des méthodes analytiques.

Plus récemment, ce sont surtout les métabolites (produits de dégradation de ces molécules) qui ont attiré l'attention des médias. Deux exemples récents sont les métabolites

du métolachlore<sup>13</sup> et, surtout, ceux du chlorothalonil<sup>14</sup>, comme les R471811<sup>15</sup>. Ces composés ont été largement médiatisés en raison de leur capacité à contaminer certaines ressources en eau.

La recherche et le suivi de ces molécules sont complexes en raison de leur volatilité<sup>16</sup>, de leur polarité<sup>17</sup> et autres caractéristiques physicochimiques variées (**Figure 7**). Les techniques couramment utilisées incluent la chromatographie liquide<sup>18</sup>, la chromatographie gazeuse<sup>19</sup> et, plus récemment, la chromatographie ionique<sup>20</sup> couplée à des spectromètres de masse<sup>21</sup>. Ces outils permettent d'analyser un large éventail d'échantillons. Cependant, il est impossible de rechercher toutes les molécules présentes dans l'environnement. Une sélection est donc réalisée, en fonction de



**Figure 7**

Les polluants organiques présents dans les ressources en eau.

13. Herbicide utilisé pour protéger les cultures des mauvaises herbes, potentiellement polluant pour l'eau.

14. Fongicide utilisé en agriculture pour lutter contre les champignons pathogènes.

15. Métabolite dérivé du chlorothalonil, souvent étudié pour sa persistance dans l'environnement.

16. Capacité d'une substance à passer de l'état liquide ou solide à l'état gazeux.

17. Propriété chimique influençant la solubilité d'une molécule dans l'eau ou les solvants organiques.

18. Technique séparant les composants d'un mélange en les faisant passer dans une colonne liquide.

19. Technique utilisant un gaz pour séparer et analyser les composants volatils d'un mélange.

20. Technique pour séparer les ions dans un échantillon liquide, utilisée pour analyser les eaux.

21. Appareil identifiant les molécules en mesurant leur masse et leur structure chimique.

leur pertinence sanitaire ou médiatique.

**Par exemple, les métabolites du chlorothalonil R471811** montrent une concentration constante d'environ 600 nanogrammes par litre dans la Seine depuis le début des relevés en 2022, correspondant à une dégradation et donc à une présence constante du chlorothalonil (**Figure 8**). D'autres molécules, comme le **flufénacét**<sup>22</sup>, présentent des variations

22. Herbicide utilisé pour contrôler les mauvaises herbes dans les cultures, notamment de céréales.

saisonnnières (**Figure 9**). Leur présence est souvent plus marquée en hiver, en raison de leur usage ou des phénomènes de ruissellement.

Prenons l'exemple de l'**AMPA**<sup>23</sup>, un **métabolite du glyphosate**<sup>24</sup>. Il y a quelques années, ce composé faisait beaucoup parler de lui. L'AMPA est une très petite

23. Produit de dégradation dans l'environnement du glyphosate.

24. Herbicide très utilisé pour éliminer les mauvaises herbes, controversé pour son impact environnemental.

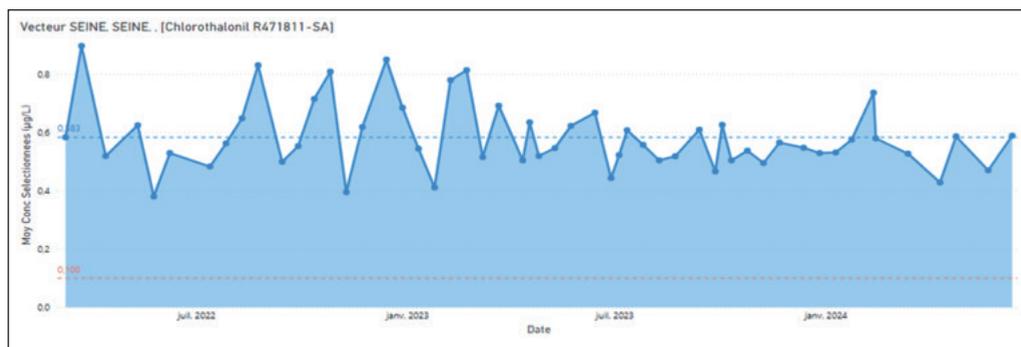


Figure 8

Suivi de la concentration du métabolite R471811 du chlorothalonil au cours du temps.

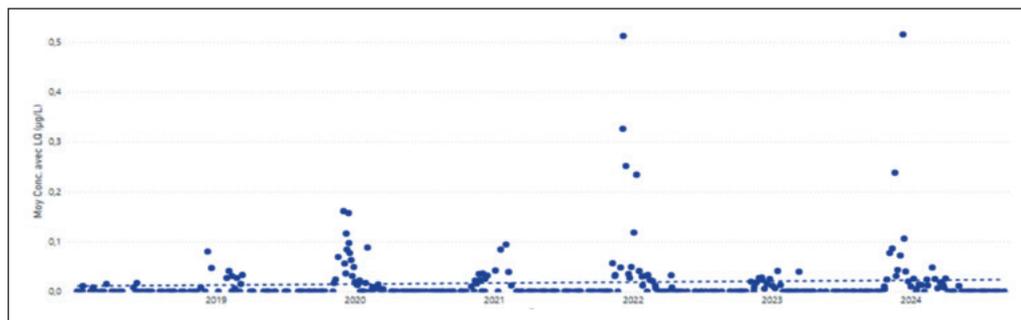


Figure 9

Suivi de la concentration du flufénacét au cours du temps.

molécule et, au départ, on avait l'impression de percevoir des variations saisonnières dans sa présence. Cependant, des travaux récents, dont une publication comparant les situations en Europe et aux États-Unis, ont montré que, si l'on observe les flux d'AMPA (quantités transportées sur une période donnée) plutôt que les simples concentrations, on détecte un flux bien plus constant (Figure 10). Cela suggère que l'origine de l'AMPA n'est pas seulement agricole, mais qu'il pourrait aussi provenir d'autres sources, comme des produits d'usage courant, par exemple des produits cosmétiques ou d'entretien.

En parallèle, d'autres substances, comme les médicaments, sont également surveillées dans les cours d'eau.

### 3 L'eau potable : traitement des ressources et suivi de la qualité de l'eau

On a une ressource qui est contaminée par des micro-

organismes et des molécules organiques. Il faut donc la traiter, pour que les gens ne soient pas malades à court ou à long terme, et donc respecter la réglementation – comme le rappelle le début du Code de la santé publique, qui explique que «*les eaux qui sont destinées à la consommation humaine ne doivent pas contenir un nombre, une concentration de micro-organismes, parasites ou de substances constituant un danger pour la santé des personnes*». Il faudra donc suivre la qualité de cette eau pour qu'elle respecte cette réglementation. Pour cela, il faudra étudier un certain nombre de paramètres :

- paramètres chimiques ;
- polluants minéraux et métalliques ;
- paramètres physicochimiques (turbidité, COT, conductivité...);
- polluants organiques (pesticides, résidus de pesticides...) avec des méthodes d'analyse de plus en plus sensibles et précises (LC/MS2, LC QTOF, CI/MS2...);

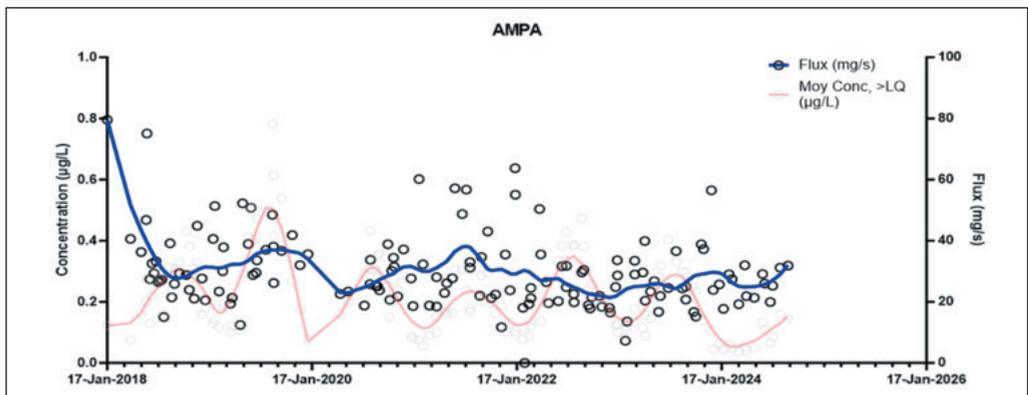


Figure 10

Suivi de la concentration de l'AMPA au cours du temps (concentration moyenne en rose, flux en bleu).

– paramètres microbiologiques : avec des références de qualité (coliforme, flore totale, SBASR), et des limites de qualité (*Escherichia coli* et entérocoques intestinaux);

Le schéma de la **figure 11** montre que le traitement de l'eau de surface est une opération complexe. Schématiquement, à Eau de Paris, sur nos ressources de surface, cela se passe en deux parties :

La première partie est la clarification, c'est-à-dire qu'on va faire **coaguler** tous les composés qui sont en suspension dans l'eau en ajoutant du chlore ferrique<sup>25</sup>, qui va leur permettre de s'agglomérer, d'être plus denses et de précipiter plus rapidement lors de l'étape de la décantation. Ensuite, on va faire une **filtration** de l'eau à travers un tamis de sable. On obtient une eau clarifiée, dans laquelle on n'a encore que peu de composé organique et de micro-organismes pathogènes.

La seconde partie permet à la fois **d'éliminer** les composés

organiques et de la **désinfecter** des micro-organismes.

*Traitement des polluants organiques*

L'utilisation des charbons actifs en grains (CAG) est très importante dans le domaine de l'eau potable, puisqu'ils permettent de traiter de nombreuses molécules différentes. Le charbon actif en grains est, depuis plus d'une vingtaine d'années, peut-être même trente ans, un traitement de base pour éliminer les composés organiques présents dans l'eau.

Le CAG est une matière organique activée en la chauffant très fortement avec de la vapeur d'eau ou en utilisant des composés chimiques. Le charbon obtenu possède de nombreux trous, de tailles variées (mésopores, micropores), qui peuvent entrer en contact avec les molécules organiques et les adsorber (**Figure 12**) lors de leur traversée. Ces molécules ne restent alors plus dans l'eau : elles se fixent au charbon.

25. Substance utilisée pour traiter l'eau en éliminant les impuretés et les phosphates.

Il existe trois types de charbons :

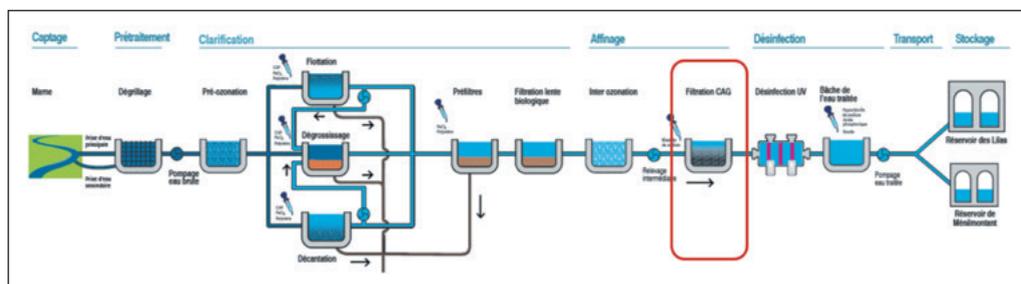


Figure 11

Étapes du traitement de l'eau de surface.

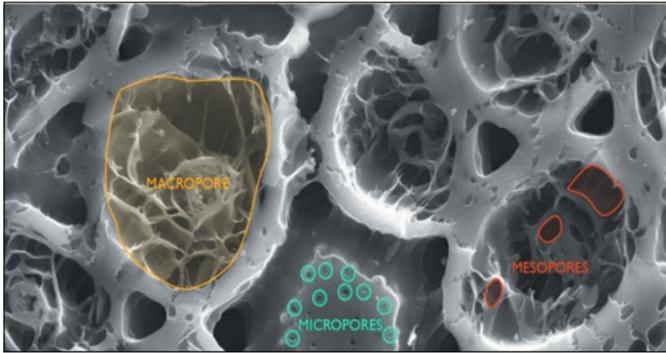


Figure 12

Différentes tailles de pores sur les charbons actifs.

- des gros grains (0,5 à 5 mm) : on parle de « charbon en grains » (CAG) ;
- des grains plus petits (0,3 à 0,8 mm) : on parle de « micro-grains » ;
- de la poudre (grains de taille inférieure à 0,15 mm).

À Eau de Paris, on utilise ces trois types de charbons en fonction des filières et de la qualité de l'eau. On fait passer l'eau à travers ces filtres, et ils retiennent les molécules organiques.

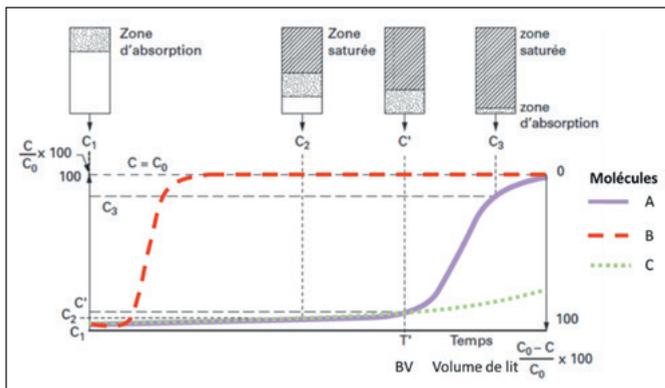


Figure 13

Caractérisation de la performance des charbons actifs.

Pour choisir le bon CAG, il faut comparer ces charbons actifs et mesurer leur capacité à éliminer un polluant (Figure 13) à partir de ce qu'on appelle le « temps de percement », c'est-à-dire le moment où les polluants organiques peuvent commencer à traverser le charbon. Ici, vous avez le temps sur l'axe des abscisses, et, sur l'axe des ordonnées, le rapport  $C/C_0$ , c'est-à-dire la concentration des molécules A, B et C dans l'eau à la sortie par rapport à celle dans l'eau à l'entrée (Figure 13). Si l'on est à 100 % (cas de la molécule B), cela signifie que toutes les molécules B entrées sont ressorties. Donc, ce n'est pas bon : le charbon n'a rien retenu. À l'inverse, si l'on est à 0 %, cela signifie que le charbon a tout retenu (cas de la molécule C).

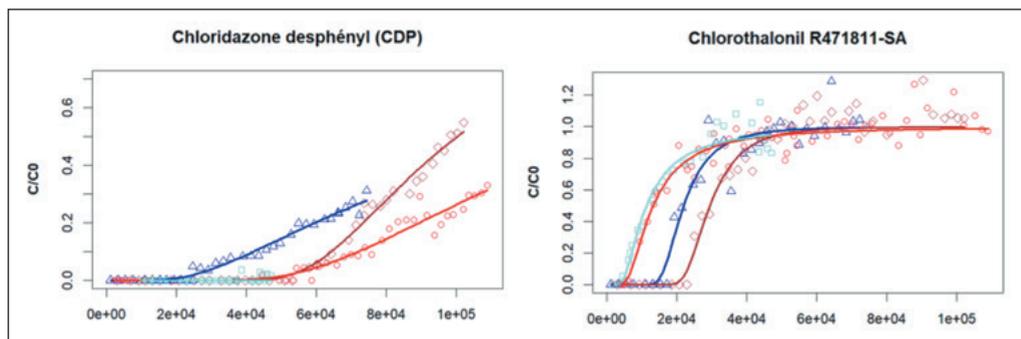
Au bout d'un moment, le charbon est saturé et il va laisser passer les molécules organiques au temps  $T'$  pour les molécules A.

Il faut donc tester toutes les molécules que l'on veut éliminer vis-à-vis des charbons actifs utilisés.

À Eau de Paris, comme dans d'autres centres de traitement des eaux, nous avons décidé de tester les performances des CAG pour éliminer les métabolites de la chloridazone ou du chlorothalonil (Figure 14).

De nombreuses études ont été menées dans des usines pilotes et dans de vraies usines, pour vérifier l'efficacité des CAG et examiner beaucoup de paramètres.

Par exemple, on regarde la représentation temps-efficacité (en  $C/C_0$ ) et on peut aussi


**Figure 14**

Performance des charbons actifs face à la chloridazone et au chlorothalonil.

se demander si la qualité initiale de l'eau joue un rôle. Effectivement, les eaux souterraines contiennent moins de matière organique que les eaux de surface. Elles ont donc tendance à saturer les filtres plus lentement.

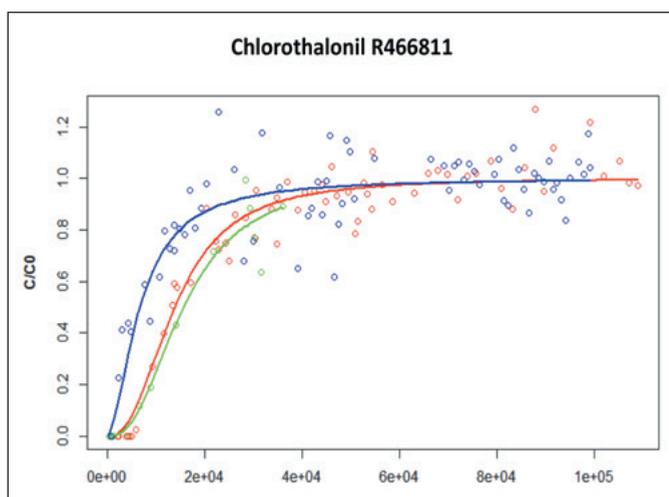
De même, la qualité des charbons est un paramètre important. On a différents types de charbons, ce qui explique les différentes courbes obtenues. Ces courbes permettent d'identifier les charbons les plus efficaces pour éliminer ce métabolite dans nos usines et de prévoir leurs remplacements. Ce qu'on observe, c'est que certains charbons perdent leur efficacité très rapidement. On arrive donc vite à un point où ils ne retiennent plus les molécules organiques. D'autres charbons, en revanche, se montrent un peu meilleurs.

Par exemple, le chlorothalonil R466811 est une molécule qui pose beaucoup de problèmes. Elle traverse le charbon très rapidement, ce qui rend son élimination très compliquée et nécessite beaucoup

de travail pour trouver le bon CAG (**Figure 15**).

*Traitement des eaux souterraines : élimination des polluants microbiologiques par ultrafiltration membranaire*

Le deuxième exemple concerne les usines de traitement des eaux souterraines. Ces dernières, souvent de meilleure qualité que les eaux de surface, présentent une


**Figure 15**

Performance d'autres charbons actifs sur le chlorothalonil.

pollution différente : moins de pollutions d'origine humaine et davantage de pollutions agricoles, liées à l'usage de nitrates<sup>26</sup> et de pesticides. Pour traiter ces pollutions, on dispose de deux types de filtration (**Figure 16**) : on utilise, d'une part, du charbon actif en poudre (semblable au charbon en grains, mais sous forme pulvérisée), et, d'autre part, une filtration membranaire. Comme ces eaux peuvent contenir des parasites issus des activités agricoles, tels que les cryptosporidies et les *Giardia*, on utilise également de l'ultrafiltration pour éliminer ces pathogènes.

Les membranes d'ultrafiltration se déclinent en trois types selon la taille des pores dans la membrane. Les membranes que nous utilisons sont conçues pour bloquer les

particules comprises entre 10 et 200 nanomètres environ. Ces membranes sont très efficaces contre les cryptosporidies et les *Giardia*, qui mesurent environ 14 micromètres. Cependant, une question importante concerne leur efficacité contre les virus, encore mal décrite par la communauté scientifique.

Nous avons développé des outils permettant d'analyser les virus, et nous avons lancé une étude avec d'autres équipes de recherche à Marseille pour évaluer l'efficacité des membranes ultrafiltration.

Les fournisseurs de membranes affirment qu'elles sont efficaces contre les virus, car ceux-ci sont plus gros que les pores. Mais nous avons observé que ces affirmations étaient basées sur des tests avec des concentrations très élevées de virus. Or, ces conditions de laboratoire ne reflètent pas les concentrations réelles. Nous

26. Composés azotés présents dans l'eau, souvent issus des engrais ou des déchets organiques.

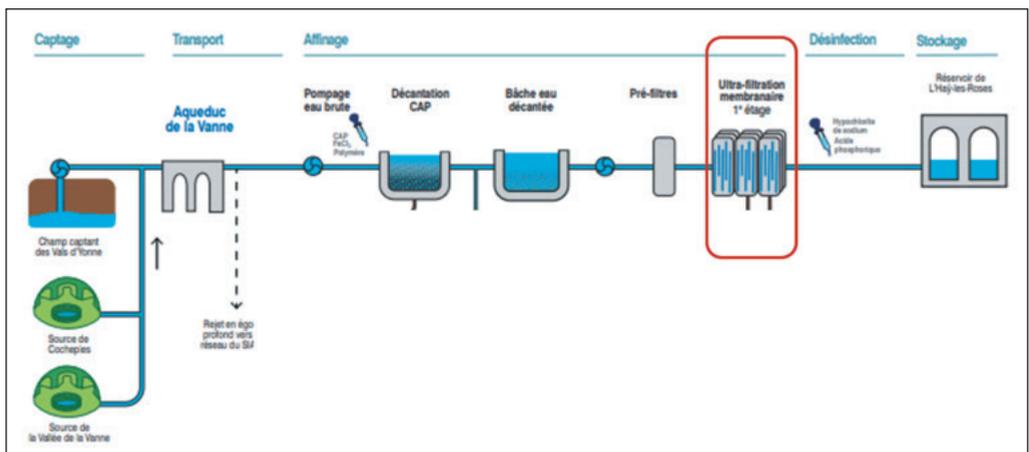


Figure 16

Étapes de traitement des eaux souterraines.

avons donc travaillé avec des concentrations de virus plus faibles et plus proches de la réalité.

Les résultats sont reportés sur la **figure 17** et l'on voit que l'efficacité des membranes n'était pas aussi bonne que prévu. Le LRV (taux d'abattement logarithmique<sup>27</sup>) représente l'efficacité des membranes, de manière comparable au  $C/C_0$ . Quand le LRV est bas, cela signifie que la membrane fonctionne mal. Quand il est haut, cela indique une bonne rétention des virus. Pour de faibles concentrations de virus en entrée, l'efficacité des membranes diminue : cela montre que la théorie selon laquelle les pores retiennent tout ce qui est plus gros qu'eux est un peu simpliste. En réalité, la

charge<sup>28</sup> et la déformabilité des virus jouent un rôle important. Il reste donc encore du travail à accomplir pour mieux comprendre l'élimination des virus avec ce type de traitement.

28. Quantité totale de virus présents dans un échantillon, souvent mesurée pour évaluer un risque sanitaire.

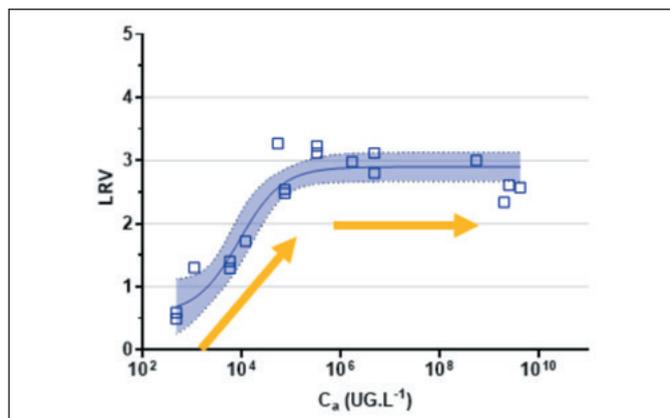


Figure 17

Efficacité des membranes face aux virus.

27. Réduction d'un contaminant exprimée en puissance de dix, utilisée pour évaluer l'efficacité des traitements.

## Conclusion

Pour conclure, la production d'eau potable repose avant tout sur un contrôle rigoureux des ressources. On doit connaître précisément leur composition avant traitement pour mettre en œuvre un traitement efficace. Ensuite, une fois l'eau traitée, elle est soumise à des analyses de suivi très performantes et à une réglementation stricte. Les évolutions technologiques en chimie et biologie, notamment en biologie moléculaire, ont permis de mieux suivre les polluants et les micro-organismes potentiellement pathogènes.

Néanmoins, il faut continuer à mener des études pour mieux comprendre certaines étapes. De même, il peut toujours y avoir des dysfonctionnements, c'est pourquoi on suit régulièrement les productions d'eau. Il y a aussi de nouveaux usages de l'eau : la REUT<sup>29</sup>, par exemple, et d'autres usages alternatifs qui doivent eux aussi permettre de garantir la qualité de l'eau pour ne pas produire de nouvelles épidémies. Grâce à plus d'un siècle de recherche et d'évolution technologique, aujourd'hui, quasiment plus personne n'est malade en buvant de l'eau, et il est important de rester sur cette lancée.