

<https://lejournal.cnrs.fr/print/2262>

Des solutions pour une eau plus propre

08.07.2019, par [Kheira Bettayeb](#)



Station d'épuration à Colombes dans les Hauts-de-Seine.
Michel BARET/Getty Images

Des techniques innovantes pour dépolluer l'eau préfigurent la station d'épuration du futur. Voici quelques procédés présentés les 8 et 9 juillet au colloque L'ingénierie se met au vert.

Représentant pas moins de 65 % de notre corps, l'eau est indispensable à notre survie, mais aussi pour celle des animaux, des végétaux et de l'environnement. Or nos activités domestiques et industrielles (textiles, pharmaceutiques...) la souillent avec une ribambelle de polluants que les stations d'épuration ne parviennent pas à tous éliminer. Et tous ces polluants s'accumulent ensuite dans les rivières, les océans et à notre robinet ! Afin de préserver la qualité de l'eau et faire face à la pénurie croissante en cette ressource naturelle vitale, plusieurs équipes du CNRS développent des techniques innovantes de dépollution de l'eau. Le défi est double : améliorer les systèmes de traitement existants et les compléter par de nouveaux, capables de détruire les polluants difficiles à éliminer aujourd'hui.

En France plus de [20 000 stations d'épuration traitent 5 milliards de mètres cubes d'eau usée](#) [7]. L'eau y subit divers traitements, différents selon le type de polluants concernés : matière organique provenant des êtres vivants, métaux lourds, pesticides... La technique la plus utilisée pour éliminer la matière organique consiste à la faire dégrader par des bactéries : c'est le procédé des boues activées. « *Très efficace en soi, ce procédé comprend des sous-postes très énergivores : brassage et aération des bassins où se développent les bactéries, etc.* », relève Naoufel Haddour, au Laboratoire ampère de Lyon¹.

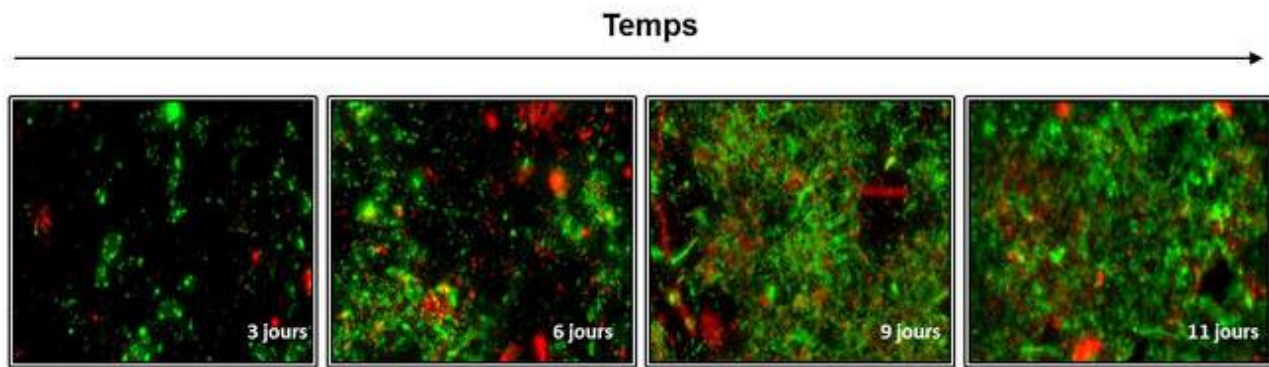


L'activité bactérienne, obtenue notamment grâce au procédé des boues activées, permet une dégradation des pollutions carbonées, azotées et phosphorées.
Frederic MAIGROT/REA

La biopile pour des stations d'épuration autosuffisantes

Pour remédier à cela, le physico-chimiste et ses collègues développent une technique qui non seulement dégrade la matière organique grâce aux bactéries – comme le procédé des boues activées – mais produit en plus de l'électricité ! C'est le concept de pile à combustible microbienne ou biopile. « *Ce type de système pourrait aider les stations d'épuration à produire leur propre électricité de fonctionnement et à être ainsi autosuffisantes* », souligne Naoufel Haddour. De quoi valoriser judicieusement les eaux usées !

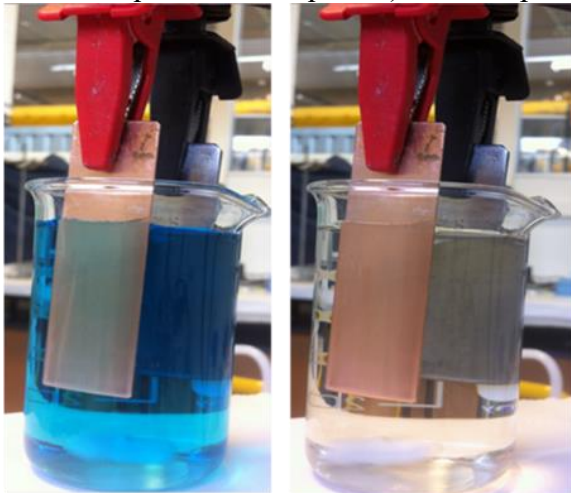
Concrètement, la pile microbienne comprend une électrode positive (cathode), alimentée en oxygène ; et une électrode négative (anode) surmontée d'un biofilm peuplé de bactéries « électroactives », c'est-à-dire capables de participer à la production d'électricité. Reliées par un circuit électrique externe, les deux électrodes sont plongées dans l'eau à dépolluer. « *En se nourrissant de la matière organique, les bactéries la dégradent. Ce faisant, elles lui arrachent des électrons (particules élémentaires chargées négativement), qu'elles cèdent ensuite à l'anode. Ces électrons sont transférés à la cathode via le circuit externe, pour interagir avec un oxydant, à savoir une molécule chimique qui capte les électrons. Cette réaction chimique, dite d'"oxydoréduction", débouche sur un déplacement d'électrons entre les deux électrodes. Lequel correspond à un courant électrique* », détaille Naoufel Haddour.



Formation d'un biofilm de bactéries qui produisent de l'électricité en dégradant la matière organique (vue en microscopie à fluorescence). N. HADDOUR

L'oxydation avancée, tueuse de micropolluants

Outre diminuer la consommation électrique des stations d'épuration, un autre grand défi pour l'avenir sera d'arriver à s'attaquer à un type de polluants non dégradables par les bactéries, et qui préoccupe de plus en plus les autorités sanitaires : les micropolluants. Rejetés par diverses activités « modernes » (industries pharmaceutiques, cosmétiques...), ces composés sont présents en très faibles concentrations dans les eaux



usagées, de l'ordre du nanogramme (1×10^{-9} g) par litre jusqu'au microgramme (1×10^{-6} g) par litre. Parmi eux : les résidus médicamenteux, les peintures, les plastifiants (phtalates...) ou encore les pesticides. Ces substances sont devenues particulièrement toxiques pour la santé humaine et l'environnement car elles ont fini par s'accumuler dans les eaux.

Test du procédé de Galvano-Fenton, technique qui dégradent les micropolluants tout en générant de l'électricité.

N. HADDOUR

Une solution pour détruire ces molécules est de générer une espèce chimique capable de réagir avec elles et les dégrader : des radicaux hydroxyles (noté $\text{HO}\bullet$). Formé d'un atome d'hydrogène, d'un atome d'oxygène, et d'un électron libre (noté par un point), $\text{HO}\bullet$ est le deuxième oxydant le plus puissant sur Terre après le fluor !

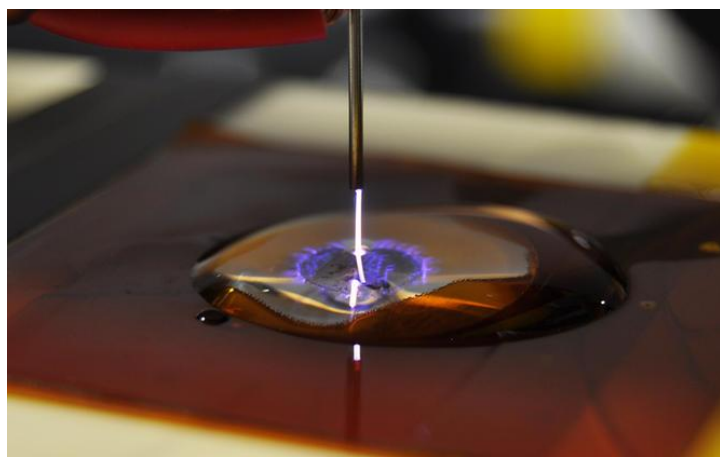
Les radicaux hydroxyles, deuxièmes oxydants les plus puissants sur Terre après le fluor, peuvent détruire les molécules provenant des résidus de médicaments, de peintures...

Pas moins de cinq procédés visant la production de radicaux HO•, dits « procédés d'oxydation avancée » (POA), sont ainsi à l'étude au CNRS. « Au Laboratoire ampère de Lyon, ces dernières années nous avons développé un système électrochimique capable non seulement de produire des HO•, mais aussi de l'électricité », se réjouit Naoufel Haddour. Baptisée Galvano-Fenton, cette technique repose aussi sur l'utilisation de deux électrodes reliées par un circuit électrique. Elle permet de générer les fameux HO• et de l'électricité en faisant réagir du peroxyde d'hydrogène (eau oxygénée ; H₂O₂) avec des ions ferreux (Fe²⁺)². Breveté il y a quatre ans, le dispositif est désormais développé par la start-up Lichen, en cours de création à l'École centrale de Lyon. « Plusieurs industriels – impossibles à citer à ce stade pour des raisons de confidentialité – sont déjà intéressés », confie Naoufel Haddour.

Mais des procédés d'oxydation avancée ne nécessitant l'ajout d'aucun produit chimique sont également à l'étude ; sachant que ce type de composé est onéreux et potentiellement instable. Au Laboratoire réactions et génie des procédés de Nancy³, le chimiste Emmanuel Mousset travaille justement sur une technique de ce genre. « Appelée électro-oxydation avancée, notre procédé permet de générer des HO• en appliquant un courant entre deux électrodes plongées dans la solution à dépolluer : une positive (anode), en diamant dopé au bore (BDD) ; et une négative (cathode), en acier-inox. Alors, survient une réaction d'oxydoréduction qui oxyde l'eau en HO• », explique le chercheur. Actuellement testée en microréacteurs – un dispositif de dimensions inférieures à 1 millimètre –, cette technique pourrait être utilisée aussi bien pour les eaux usées municipales qu'industrielles.

Plasma non thermique et bulles de vapeur

À Orléans, au Groupe de recherches sur l'énergétique des milieux ionisés⁴, Oliver Aubry travaille, lui, sur un autre procédé d'oxydation avancée tout aussi prometteur ne nécessitant pas d'additifs chimiques : le plasma non thermique. L'idée ici est d'appliquer une décharge électrique dans un milieu (comme l'air) contenant de l'oxygène et en contact avec l'eau à dépolluer. On fait ainsi passer la matière dans une phase particulière : un plasma non thermique, constituée de particules chargées, d'ions et d'électrons, dont... les fameux HO• ! « Comme elle nécessite l'utilisation d'électricité et a donc un certain coût énergétique, cette technique est intéressante surtout pour des volumes relativement petits, comme les effluents très concentrés en résidus de médicaments issus de laboratoires pharmaceutiques ou d'hôpitaux. Elle serait donc utilisée en amont des stations d'épuration, en complément », précise le scientifique.



Décharges électriques au-dessus de l'eau, créant un plasma non thermique.
Hervé RABAT /GREMI

Mais il y a aussi cette quatrième technique qui repose sur un phénomène physique encore plus spectaculaire : la cavitation hydrodynamique. « Celle-ci consiste en la création et en l'implosion de bulles de vapeur dans un liquide, qui est – point important – non chauffé, à température ambiante. Cela est possible quand le liquide est soumis à une baisse de pression suffisamment élevée : en dessous de 20 millibars pour l'eau à température ambiante. L'implosion des bulles est si violente qu'elle peut casser les molécules d'eau (H₂O) dans les bulles de vapeur, en atome hydrogène (H) et en radicaux HO• », développe Frédéric Ayela, au Laboratoire des écoulements géophysiques et industriels⁵. Lui et son équipe testent l'efficacité de cette méthode en faisant caviter le luminol, un composé chimioluminescent qui émet de la lumière bleue en présence de HO•. Et ce, dans des microsystèmes fluidiques sur puce, utilisant un débit de

quelques litres par heure, à l'abri de la lumière extérieure.



Vue d'un écoulement cavitant dans un microcanal de 1 mm. L'implosion des nuages de vapeur d'eau brise les molécules et crée des radicaux hydroxyles. F. AYELA

De nombreux défis à relever

On l'aura compris : la recherche pour une eau plus propre est en pleine effervescence. Cela dit, avant de voir toutes les techniques décrites plus haut intégrées dans les stations d'épuration, il faudra relever de nombreux défis. Notamment, il sera nécessaire de montrer l'efficacité de ces procédés pour le traitement de grands volumes d'eau, sachant qu'à ce jour *« ils se sont avérés efficaces surtout pour des petits volumes, de quelques millilitres ou dizaines de millilitres, alors qu'une station d'épuration en traite plusieurs centaines de milliers de mètres cubes par jour »*, illustre Naoufel Haddour. *« Si nous arrivons à trouver les financements nécessaires pour continuer nos travaux, dans moins de cinq ans nous pourrions arriver à un démonstrateur permettant de traiter plusieurs centaines de litres par heure, contre quelques litres par heure actuellement »*, signale Frédéric Ayela.

Par ailleurs, *« il faudra aussi s'assurer que ces procédés ne produisent pas des molécules « filles » plus toxiques que les molécules initiales de micropolluants »*, ajoute Olivier Aubry. Autre challenge : diminuer le coût de fabrication de ces systèmes, en jouant sur les matériaux utilisés, *« par exemple en trouvant une alternative au diamant dopé au bore utilisé dans notre système »*, illustre Emmanuel Mousset. Enfin, il sera crucial de déterminer si un cycle de traitement suffira ou s'il en faudra plusieurs, et combien alors... De la capacité des chercheurs à dépasser tous ces verrous, dépendra la qualité de l'eau des générations à venir. ♦

Notes

- [1.](#) CNRS/Institut national des sciences appliquées de Lyon/université Claude-Bernard Lyon-I/École centrale de Lyon.
- [2.](#) Selon la réaction d'oxydoréduction suivante : $\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{OH}^- + \text{HO}\cdot$
- [3.](#) Unité CNRS/Université de Lorraine.
- [4.](#) Unité CNRS/Université d'Orléans.
- [5.](#) Unité CNRS/Université Grenoble-Alpes/Institut polytechnique de Grenoble.