

Le procédé Anammox pour l'élimination de l'azote dans les stations d'épuration

La collaboration fructueuse entre microbiologistes et ingénieurs des procédés

En tant qu'état riverain du Rhin, la Suisse s'est engagée à réduire ses rejets d'azote dans la Mer du Nord. A l'heure actuelle, l'élimination de l'azote dans les stations d'épuration se fait généralement en ajoutant à grands frais une étape supplémentaire au traitement biologique des eaux usées. Dans les années 90, de nouvelles études ont cependant révélé qu'une élimination pouvait aussi se produire dans des conditions de fonctionnement imprévues. Ce phénomène est attribuable à un genre bactérien identifié depuis peu et également détecté dans les stations d'épuration suisses. Tirant profit de cette constatation, des ingénieurs des procédés ont mis au point une nouvelle technique d'élimination durable de l'azote.

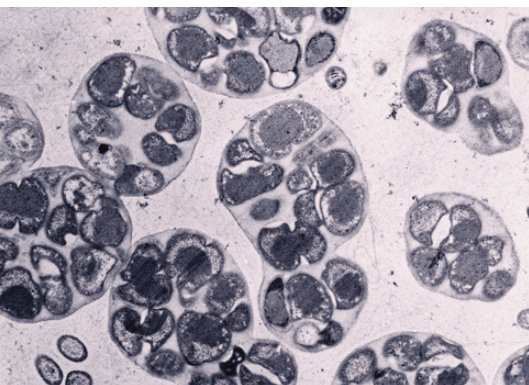
On entend par élimination de l'azote la transformation de composés azotés biodisponibles comme l'ammonium (NH_4^+), les nitrites (NO_2^-) et les nitrates (NO_3^-) en azote moléculaire gazeux (N_2) inoffensif et pouvant être libéré dans l'atmosphère. Les procédés d'épuration des eaux font aujourd'hui le plus souvent appel à la technique de nitrification-dénitrification biologique pour éliminer l'azote (voir encadré). Les stations de traitement des eaux polluées suisses font souvent l'économie de l'étape de dénitrification, ce qui fait qu'une assez grande partie de l'azote est encore rejetée dans les cours d'eau sous forme de nitrates. En tant qu'état riverain du Rhin, la Suisse s'est cependant engagée dans le cadre de l'Ordonnance sur la protection des eaux de 1998 à réduire ses rejets d'azote dans le Rhin de

2000 tonnes jusqu'en 2005, ce qui l'oblige à prendre très bientôt des mesures efficaces dans ce sens. Il serait fort onéreux d'équiper toutes les stations d'épuration suisses d'une étape supplémentaire de nitrification-dénitrification, procédé nécessitant par ailleurs une grande quantité d'énergie et de ressources [1]. Il est donc nécessaire de développer des procédés innovateurs et plus économiques.

A la poursuite du micro-organisme inconnu

Dans les années 80 et 90, certaines observations donnaient à penser que la technique de nitrification-dénitrification n'était pas le seul moyen d'éliminer l'ammonium, mais qu'il existait probablement des microorganismes capables d'oxyder l'azote ammoniacal en azote gazeux en présence de nitrites et sans apport d'oxygène. Des chercheurs hollandais et allemands ont été les premiers à identifier ces microorganismes. Il s'agit de bactéries de l'ordre des planctomycètes: *Brocadia anammoxidans* et *Kuenenia stuttgartiensis* [2, 3]. Le phénomène d'oxydation anaérobie de l'ammonium a également pu être observé dans la station d'épuration de Kölliken en Suisse qui ne dispose pas de zone de dénitrification. Les études que nous avons menées dans cette station ont montré qu'un système de biofilm à plusieurs couches s'y était formé. Les biofilms de ce genre présentent de forts gradients d'oxygène, la couche supérieure pouvant p. ex.

être bien oxygénée alors que la couche inférieure fixée au support fonctionne en anaérobie [4]. Nous avons donc supposé que les microorganismes que nous cherchions se trouvaient dans la couche la plus profonde du biofilm. Grâce à des sondes génétiques spécifiques et à la technique d'hybridation *in situ* en fluorescence (FISH) [5], nous avons effectivement pu démontrer que cette zone abritait une grande quantité de bactéries planctomycètes (Fig. 1). Cependant, jusqu'à présent personne au monde n'est encore parvenu à obtenir des cultures pures de ces nouvelles bactéries à l'aide des méthodes traditionnelles de microbiologie. Nous avons toutefois réussi à concentrer un échantillon de biofilm jusqu'à obtenir un taux de 90% de planctomycètes parmi les bactéries isolées [6]. Les bactéries de la station de Kölliken sont également de l'espèce *Kuenenia stuttgartiensis*. Des essais de biologie moléculaire et de physiologie ont démontré que *K. stuttgartiensis* était capable d'oxyder l'ammonium en conditions anaérobies pour former de l'azote gazeux (voir encadré) [3, 6]; ce processus est appelé Anammox («anaerobic



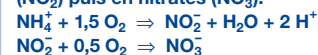
Franziska Boshard, EAWAG

Fig. 1: Agrégats de bactéries Anammox rendus visible à l'aide d'un microscope électronique.

Nitrification

= oxydation aérobie de l'ammonium par des bactéries nitrifiantes.

En présence d'oxygène (O_2), l'azote ammoniacal (NH_4^+) est transformé en nitrites (NO_2^-) puis en nitrates (NO_3^-):



Dénitrification

= réduction des nitrates par des bactéries dénitrifiantes.

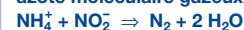
En présence de carbone organique (p. ex. méthanol) et en conditions anaérobies, les nitrates sont réduits en azote gazeux moléculaire (N_2):



Anammox

= Oxydation anaérobie de l'ammonium par des bactéries Anammox.

En présence de nitrites et en conditions anaérobies, l'ammonium est oxydé en azote moléculaire gazeux:



ammonium oxidation» = oxydation anaérobie de l'ammonium).

L'oxydation anaérobie de l'ammonium – un procédé durable d'élimination de l'azote

Ces éléments constituaient une base scientifique solide sur laquelle les ingénieurs des procédés pouvaient s'appuyer. Les stations d'épuration pratiquant une fermentation des boues produisent un surnageant particulièrement riche en ammonium; en effet, cet effluent renferme encore de 15 à 20% de la charge en azote des eaux polluées arrivant à la station. A l'heure actuelle, ce surnageant est renvoyé en tête de station où, mélangé avec les eaux usées provenant du réseau d'assainissement, il est traité dans le bassin à boues activées. Au lieu de faire «recirculer» ce surnageant, on pourrait le traiter à part avec le nouveau procédé Anammox, ce qui économiserait énergie et ressources. Cette dernière solution nécessite un apport extérieur de nitrites, non contenus dans le surnageant lui-même mais par ailleurs synthétisés lors de la nitrification (voir encadré). Un procédé en deux étapes semble donc tout indiqué (Fig. 2). Dans un premier réacteur aéré, l'azote ammoniacal est partiellement oxydé en nitrites (*nitrification partielle*). Les nitrites formés et l'ammonium restant sont ensuite conduits dans un deuxième réacteur dans lequel ils

subissent en anaérobiose une réduction aboutissant à la production de N₂ moléculaire (*Anammox*). L'ensemble du procédé est nommé «nitrification partielle/Anammox» ou plus brièvement procédé Anammox. Jusqu'à présent, ce procédé n'est employé que pour le traitement des eaux usées riches en ammonium. Grâce aux méthodes de génie génétique, les bactéries Anammox peuvent être mises en évidence à tout moment, ce qui peut être très utile pendant la phase de lancement du procédé ou en cas de panne.

Comparé à la méthode classique de nitrification-dénitrification, le procédé Anammox présente les avantages suivants (Fig. 3):

- L'apport d'oxygène peut être réduit de 60%. L'énergie nécessaire à l'aération du bassin est ainsi économisée.
- Les bactéries Anammox n'ont pas besoin de carbone organique pour leur croissance. Dans la technique de nitrification-dénitrification, au contraire, il est nécessaire d'apporter du carbone organique, p.ex. sous forme de méthanol.
- Les bactéries Anammox produisent moins de biomasse, ce qui permet de réduire la masse de boues d'épuration à éliminer. Ainsi, non seulement le procédé Anammox demande moins d'énergie et de ressources mais il est en plus moins coûteux que la méthode traditionnelle de nitrification-dénitrification.

Le procédé Anammox au banc d'essai

Pour estimer la faisabilité de ce procédé à deux étapes, l'EAWAG s'est associé à la station d'épuration de Werdhölzli (Zurich) et à d'autres partenaires pour construire et faire fonctionner une installation pilote de 4 m³ [7]. Les essais réalisés sur ce modèle ont permis de mieux appréhender le processus et de confirmer sa bonne faisabilité. Ils ont de plus apporté les données nécessaires au dimensionnement et à la bonne exploitation d'une installation à l'échelle industrielle.

On observe malheureusement encore une certaine réserve vis-à-vis de ce nouveau procédé. Elle s'explique principalement par la faible vitesse de croissance des bactéries Anammox ainsi que par le manque d'expérience pratique avec le procédé. Mais étant donné les nombreux avantages qu'il présente, on peut s'attendre à voir les premiers réacteurs Anammox apparaître dans les stations d'épuration dans les années qui viennent.



Christian Fux, ingénieur des procédés, a terminé début 2003 sa thèse sur le procédé Anammox à la division «Génie de l'environnement» de l'EAWAG. Il effectue depuis un stage post-doctoral à l'«Advanced Wastewater Management Centre» de l'Université Queensland en Australie.

Coauteurs: Konrad Egli, Jan Roelof van der Meer, Hansruedi Siegrist

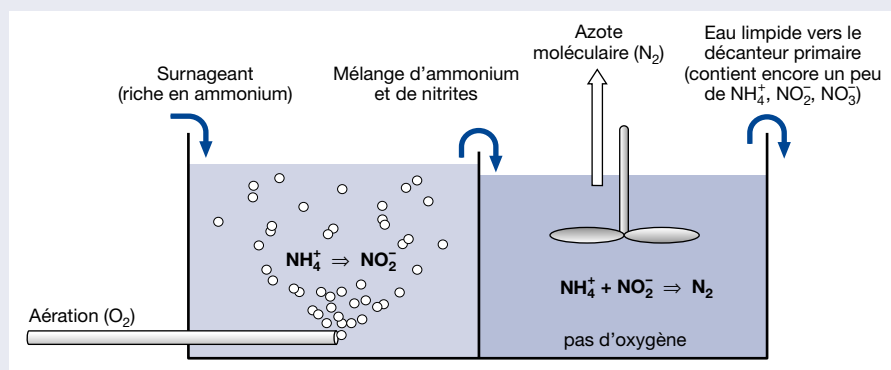


Fig. 2: Le procédé Anammox.

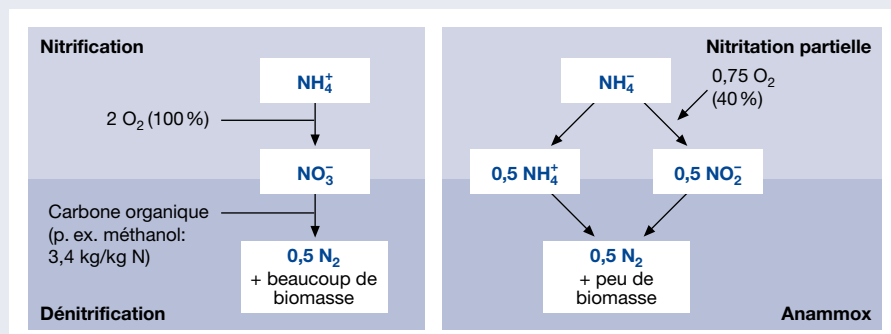


Fig. 3: Comparaison du procédé Anammox avec la méthode classique d'élimination de l'azote par nitrification-dénitrification.

- [1] BUWAL (1996): Stickstofffrachten aus Abwasserreinigungsanlagen. Schriftenreihe Umwelt Nr. 276, 67 S.
- [2] Strous M., Fuerst J.A., Kramer E.H.M., Logemann S., Muyzer G., van de Pas-Schoonen K.T., Webb R., Kuenen J.G., Jetten M.S.M. (1999): Missing lithotroph identified as new planctomycete. *Nature* 400, 446–449.
- [3] Schmid M., Twachtman U., Klein M., Strous M., Juretschko S., Jetten M., Metzger J.W., Schleifer K.-H., Wagner M. (2000): Molecular evidence for genus-level diversity of bacteria capable of catalyzing anaerobic ammonium oxidation. *Systematic & Applied Microbiology* 23, 93–106.
- [4] Koch G., Egli K., van der Meer J.R., Siegrist H. (2000): Mathematical modeling of autotrophic denitrification in a nitrifying biofilm of a rotating biological contactor. *Water Science and Technology* 41, 191–198.
- [5] Zepp K. (2002): L'ARN: Un traceur pour identifier des microorganismes. *EAWAG news* 52, 12–13.
- [6] Egli K., Fanger U., Alvarez P., Siegrist H., van der Meer J.R., Zehnder A.J.B. (2001): Enrichment and characterization of a new anammox bacterium from a rotating biological contactor treating an ammonium-rich leachate. *Archives of Microbiology* 175, 198–207.
- [7] Fux C., Böhrer M., Huber P., Brunner I., Siegrist H. (2002): Biological treatment of ammonium-rich wastewater by partial nitritation and subsequent anaerobic ammonium oxidation (anammox) in a pilot plant. *Journal of Biotechnology* 99, 295–306.