

DESCRIPTION

TITRE : PROCEDE DE TRAITEMENT DES EAUX POUR L'ABATTEMENT SIMULTANE DU CARBONE, DE L'AZOTE ET DU PHOSPHORE, MIS EN ŒUVRE DANS UN REACTEUR A FILM BIOLOGIQUE A LIT
5 MOBILE EN MODE SEQUENTIEL DISCONTINU.

Domaine de l'invention

L'invention concerne le domaine du traitement des eaux, notamment des eaux usées en vue de leur épuration.

Plus précisément, l'invention concerne un procédé biologique de traitement simultané du
10 carbone, de l'azote et du phosphore des eaux.

Art antérieur et ses inconvénients

Il est connu de l'art antérieur, un procédé de traitement des eaux usées dans un réacteur séquentiel discontinu à biomasse libre (notamment à boues activées) de type conventionnel. Le terme « réacteur séquentiel discontinu » est également connu dans l'état de la technique par le
15 terme anglais « *sequencing batch reactor* » ou par l'acronyme SBR. Ce procédé est aujourd'hui largement utilisé à travers le monde et est notamment apprécié car il peut être mis en œuvre avec un seul bassin biologique sans besoin d'un ouvrage de clarificateur en aval, contrairement à un procédé à boues activées classique qui, du fait d'une alimentation continue en eaux, nécessite la disposition d'un ouvrage de clarification en aval du bassin biologique et l'instauration d'une
20 recirculation des boues vers le bassin biologique. Ainsi, l'empreinte au sol d'une installation mettant en œuvre un procédé SBR à biomasse libre de type conventionnel est plus faible que celle d'une installation mettant en œuvre un procédé à boues activées classique. En fonction de la quantité d'eaux usées à traiter, plusieurs de ces bassins biologiques peuvent éventuellement être disposés en parallèle.

25 Un cycle du procédé de traitement biologique des eaux dans un réacteur SBR à biomasse libre de type conventionnel comporte successivement les étapes de :

- remplissage du réacteur avec une eau à traiter ;
- traitement biologique dans le réacteur, consistant en une alternance de conditions anaérobies, anoxiques et aérobies, avec ou sans aération ;
- 30 - décantation de la biomasse libre et des matières en suspension ; et,
- clarification/ vidange de l'eau traitée.

Le traitement biologique en conditions aérobies permet la dégradation du carbone ainsi que la transformation de l'ammonium (NH_4^+) en ions nitrites (NO_2^-) puis en ions nitrates (NO_3^-) (nitrification) grâce à une biomasse spécifique nitrifiante. Le traitement biologique en conditions
35 anoxiques permet l'élimination des ions nitrates (NO_3^-) en diazote gazeux (N_2) (dénitrification)

grâce à une biomasse hétérotrophe dénitrifiante. Si nécessaire, l'élimination du phosphore peut se faire soit par voie biologique, soit par voie physico-chimique par ajout de sels métalliques, tels des sels de fers ou d'aluminium. L'élimination du phosphore par voie biologique nécessite une phase avec des conditions anaérobies, pendant laquelle la biomasse appropriée relargue du phosphore et consomme du carbone exogène pour se constituer des réserves internes, et une phase avec des conditions aérobies et/ou anoxiques pendant laquelle la même biomasse sur-accumule une grande partie du phosphore présent dans le milieu réactionnel grâce à ses réserves internes de carbone qui lui fournissent la source d'énergie requise.

Des variantes du procédé décrit ci-dessus permettant d'optimiser les performances de traitement sont obtenues en compartimentant le réacteur SBR à boues activées. On parle alors de procédé de traitement dans un réacteur SBR à biomasse libre de type compartimenté. Par exemple, lorsqu'une dénitrification poussée de l'effluent est nécessaire, il est possible d'ajouter en tête du réacteur SBR à biomasse libre un compartiment utilisé en conditions anoxiques et avec agitation. Cette configuration nécessite la mise en place d'une recirculation séquentielle de la liqueur mixte (biomasse libre et effluent) à l'aide d'une pompe entre le compartiment de tête utilisé en conditions anoxiques et l'autre compartiment. La recirculation doit être arrêtée notamment pendant les phases de décantation et de vidange du réacteur SBR à biomasse libre de type compartimenté. Le compartiment utilisé en conditions anoxiques permet d'obtenir une dénitrification biologique de l'eau à traiter plus performante. En effet, l'eau à traiter introduite dans le compartiment de tête est chargée en DCO (Demande Chimique en Oxygène), c'est à dire constitue une source de carbone abondante, ce qui permet de maintenir une forte concentration en bactéries dénitrifiantes. Autre exemple, lorsqu'une dé-phosphatation biologique est nécessaire, il est possible d'utiliser un réacteur SBR à biomasse libre à deux compartiments avec un premier compartiment en conditions anaérobies et un second compartiment en conditions alternativement anoxiques et aérobies ou alors un réacteur SBR à biomasse libre à 3 compartiments avec un premier compartiment en conditions anaérobies, un deuxième compartiment en conditions anoxiques et un troisième compartiment en conditions aérobies. Cette configuration nécessite également la mise en place d'une recirculation séquentielle de la liqueur mixte (biomasse libre et effluent) à l'aide d'une pompe entre le compartiment de tête utilisé en conditions anaérobies et l'(les) autre(s) compartiment(s). De même la recirculation doit être arrêtée notamment pendant les phases de décantation et de vidange du réacteur SBR.

Les procédés de traitement biologique des eaux dans un réacteur SBR à biomasse libre de type conventionnel ou de type compartimenté présentent néanmoins plusieurs inconvénients. Un premier inconvénient est qu'à cause de la faible vitesse de décantation des matières en suspensions (constituées principalement de la biomasse libre épuratrice), ces procédés

nécessitent la mise en œuvre de réacteurs ayant un volume important. Un second inconvénient de ces procédés SBR à biomasse libre est qu'ils ont des performances de traitement limitées, en particulier des performances limitées pour la nitrification. En effet, la concentration en boues activées dans le réacteur SBR est souvent limitée, en pratique strictement inférieure à 5 g/L, afin de ne pas altérer l'étape de clarification. Un troisième inconvénient de ces procédés SBR de type conventionnel est qu'il est nécessaire de maintenir un âge de boues élevé dans le réacteur SBR, en pratique un âge de boues strictement supérieur à 15 jours à 12°C, pour pouvoir obtenir un niveau de nitrification suffisant. Ceci implique une augmentation considérable de la taille des installations de traitement des eaux.

Il est également connu de l'art antérieur un procédé de traitement biologique dans un réacteur à film biologique à lit mobile (MBBR) opéré en mode SBR, autrement appelé réacteur séquentiel discontinu à film biologique à lit mobile. Ce type de réacteur est également connu en anglais sous le terme « *sequencing batch moving-bed biofilm reactor* » ou sous l'acronyme SBMBBR. Il permet de s'affranchir des problèmes liés à l'utilisation d'une biomasse libre décantant trop lentement. Ce procédé à culture fixée sur media allie les avantages du procédé MBBR (résistance aux variations de charges, absence de *bulking*, hétérogénéité physique et biologique de la biomasse, préservation de la biomasse sur les supports) à l'intérêt du phasage temporel des réactions biologiques du cycle d'un réacteur SBR par l'alternance de phases anaérobie(s)/aérobie(s)/anoxique(s). Il peut être utilisé pour le traitement du phosphore en particulier. L'absence de biomasse libre dans le réacteur permet de réaliser une vidange totale ou quasi-totale du liquide contenu dans le réacteur à la fin du cycle SBR et ce sans étape de décantation préalable, contrairement aux réacteurs SBR à biomasse libre ou à biomasse constituée de granules. Le réacteur est muni de grilles perforées qui permettent de retenir les média dans la cuve biologique tout en laissant passer l'eau épurée ainsi que les matières en suspensions durant les phases de vidanges. Cette particularité permet d'obtenir un réacteur SBMBBR très compact. Néanmoins, l'eau traitée vidangée contient des matières en suspensions, de l'ordre de 100 à 500 mg/L, provenant de l'eau à traiter ainsi que du détachement des parties superficielles du biofilm. Les eaux traitées dans un réacteur SBMBBR nécessitent généralement une étape de séparation de ces matières en suspension en aval via un décanteur, un flottateur ou un filtre. L'ouvrage utilisé pour cette étape de séparation peut être particulièrement compact du fait des faibles concentrations en MES.

Des tests ont été réalisés dans un réacteur SBMBBR sur une eau usée municipale synthétique ou semi synthétique, en mettant en œuvre des cycles anaérobies/aérobies sans limitation de l'oxygène dissous, autrement dit avec une aération non contrôlée et donc à très fortes concentrations en dioxygène, avec des supports de type KMT et aussi K1 (cf. HELNESS H., «

Biological phosphorus removal in a moving bed biofilm reactor», Trondheim, Norwegian University of Science and Technology, 2007, pages 85-96 ; Figure 37). Les résultats de Helness montrent des résultats prometteurs pour le traitement du carbone, de l'azote et du phosphore des eaux testées. Cependant, les tests ont été réalisés avec une eau municipale faiblement concentrée en NH_4 et PO_4 , dopée en acétate (favorable au traitement biologique du phosphore car il s'agit d'un carbone organique facilement utilisable par les bactéries déphosphatantes) et ayant un ratio DCO:NTK (Demande Chimique en Oxygène:Azote Total Kjeldhal) avantageux pour le traitement de l'azote (Ratio DCO:NTK supérieur ou égal 10). Par ailleurs, les résultats de profils de concentrations au cours d'un cycle de traitement montrent un décalage dans le temps entre l'assimilation biologique du phosphore et la nitrification. En effet, l'étape limitante est la nitrification qui nécessite de continuer l'aération pendant 75 min alors que le Phosphore (PO_4) est déjà consommé. Les inventeurs de la présente invention ont renouvelé ces tests sur un réacteur SBMBBR traitant une eau municipale réelle, plus concentrée en azote que celle testée par Helness, sans apport exogène de matière organique et avec un ratio DCO:NTK compris entre 5 et 8 (et donc moins favorable pour le traitement global de l'azote). Ils ont alors pu confirmer ce décalage entre le temps nécessaire pour sur-accumuler le phosphore et pour finir la nitrification lors de l'étape d'aération du réacteur SBMBBR.

Ainsi les procédés de traitements biologiques du carbone, de l'azote et du phosphore des eaux dans un réacteur séquentiel discontinu à film biologique à lit mobile connus de l'art antérieur présentent comme inconvénient d'avoir une étape d'aération particulièrement longue, ce qui entraîne une surconsommation de dioxygène et donc une surconsommation énergétique de l'installation correspondante et, ce qui entraîne également un allongement du cycle de traitement de l'eau et donc un surdimensionnement nécessaire de l'installation correspondante.

En outre, les eaux usées municipales contiennent souvent des quantités de DCO soluble biodégradable qui peuvent être limitantes pour réaliser à la fois la dénitrification anoxie et l'élimination biologique du phosphore. Il est ainsi souvent nécessaire d'ajouter soit une source de carbone externe pour améliorer la dénitrification ou des sels métalliques pour réaliser la précipitation du phosphore. Ainsi, les procédés de l'art antérieur ne sont pas complètement adaptés à pour éliminer efficacement par voie biologique l'azote de certaines eaux à traiter, notamment pour des eaux comprenant une charge en azote trop élevée ou un ratio C/NTK trop faible.

Objectifs de l'invention

La présente invention a pour objectif de pallier au moins certains des inconvénients de l'art antérieur cité.

Un objectif de l'invention est de proposer un procédé de traitement biologique amélioré simultané du carbone, de l'azote et du phosphore qui soit simple, flexible, stable et robuste et qui puisse être mis en œuvre dans une installation particulièrement compacte.

Un autre objectif de l'invention est de proposer un procédé qui permette d'améliorer les performances d'élimination de l'azote total et du phosphore par voie biologique tout en diminuant les besoins en carbone organique de la biomasse.

Exposé de l'invention

L'invention concerne un procédé de traitement simultané du carbone, de l'azote et du phosphore des eaux, dans un réacteur à film biologique à lit mobile en mode séquentiel discontinu (SBMBBR), comprenant des supports aptes au développement d'un film biologique.

Le procédé comprend des séquences de traitements successifs, chaque séquence de traitement comprenant:

- une phase initiale de traitement anaérobie,
 - ladite phase initiale de traitement anaérobie étant suivie par au moins un cycle aérobie/anoxie constitué de :
 - une phase de traitement aérobie de telle sorte à obtenir une concentration en ions ammonium ne passant pas en-dessous d'une concentration seuil en ions ammonium; et,
 - une phase dans laquelle le film biologique est mis, au moins localement, en conditions anoxiques, cette phase étant concomitante ou postérieure à ladite phase de traitement aérobie;
- la concentration seuil en ions ammonium étant calculée pour permettre le développement de micro-organismes anammox pendant la phase dans laquelle le film biologique est mis, au moins localement, en conditions anoxiques.

On entend par « aérobie », la présence de dioxygène dans un milieu réactionnel. La concentration en dioxygène dissous est alors généralement supérieure ou égale à 0.5 mg O₂/L.

On entend par « anaérobie », l'absence totale ou quasi-totale de dioxygène dans un milieu réactionnel réducteur, c'est à dire ne comprenant notamment pas de formes oxydées de composés azotés, comme des ions nitrates (NO₃⁻) ou nitrites (NO₂⁻) par exemple. La concentration en dioxygène dissous est alors proche de 0 mg O₂/L.

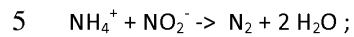
On entend par conditions « anoxiques », l'absence totale ou quasi-totale de dioxygène dissous dans un milieu réactionnel oxydant, c'est à dire comprenant des formes oxydées de composés azotés, comme des ions nitrates (NO₃⁻) ou nitrites (NO₂⁻) par exemple. La concentration en dioxygène dissous est alors proche de 0 mg O₂/L.

On entend par conditions « localement » anoxiques le fait qu'à l'intérieur du SBMBBR, il existe des zones locales en conditions anoxiques alors que le SBMBBR est globalement aérobie.

Ceci a notamment lieu dans des modes de réalisations particuliers où des supports présentant

une géométrie leur permettant de rester très proches les uns des autres lorsque l'intensité de l'aération est modérée, et de former ainsi localement des zones anoxiques.

On entend par micro-organismes « anammox », des micro-organismes capables, en conditions anaérobies de transformer l'ammonium et le nitrite en diazote selon l'équation :



La présente invention repose donc sur la mise en œuvre dans un réacteur SBMBBR d'un traitement biologique ayant une phase initiale anaérobie suivie d'au moins un cycle aérobie/anoxie dans lequel la phase aérobie est mise en œuvre de telle sorte à créer des conditions favorables, notamment une concentration en ions ammonium dans le biofilm adaptée, pour le développement de micro-organismes anammox en conditions anoxiques. Les micro-organismes anammox permettent de manière avantageuse de réaliser l'élimination de l'ammonium directement sous forme de diazote sans passer par la forme nitrate (NO_3^-) et sans besoin de carbone. Le procédé selon l'invention permet également le développement de micro-organismes dénitrifiants capables d'accumuler des polyphosphates. Ils sont également connus en anglais sous le terme « *denitrifying polyphosphate accumulative organism* » ou sous l'acronyme DPAO. Ils permettent d'éliminer les nitrates (dénitrification) sans nécessiter l'ajout supplémentaire de source de carbone et de traiter le phosphore de manière biologique sans nécessiter l'ajout supplémentaire de sels métalliques.

Ainsi, dans le procédé selon l'invention, il n'y a préférentiellement pas d'ensemencement préalable avec des micro-organismes anammox ou DPAO.

En outre, dans le procédé selon l'invention, il n'y a préférentiellement pas d'ajout de source externe de carbone et/ou de source externe de sels métalliques.

Le procédé selon l'invention peut notamment être mis en œuvre avec des eaux à traiter ayant une DCO relativement faible par rapport à leur contenu en azote et en phosphore. Le procédé selon l'invention, effectué sans ajout de source de carbone externe et/ou de source externe de sels métalliques, peut notamment traiter des eaux avec des ratios DCO/NTK inférieurs à 7 préférentiellement inférieurs à 10 (Demande Chimique en Oxygène:Azote Total Kjeldahl). Par « Azote Total Kjeldahl » on entend la somme de l'azote ammoniacal (NH_4) et azote organique.

Le film biologique, ou biofilm, se développe sur des supports adaptés à son développement. Ceci procure de nombreux avantages par rapport à une biomasse libre. Les supports permettent notamment d'obtenir une concentration plus élevée de biomasse et donc de réduire la taille des installations correspondantes. Les supports permettent une sélection accrue des micro-organismes d'intérêt, en l'occurrence des micro-organismes anammox et DPAO. Les supports permettent également d'obtenir facilement un âge de boues plus élevé que pour un procédé à boues activées, en permettant aux micro-organismes de mieux se développer. Le

biofilm a une meilleure réponse aux variations en DCO et une meilleure résistance à d'éventuels chocs toxiques.

Avec les supports usuels utilisés dans un réacteur SBMBBR, comme par exemple les supports « K5 » de AnoxkaldnesTM, la phase dans laquelle le film biologique est mis en conditions
5 anoxiques est généralement postérieure à la phase de traitement aérobique.

Dans certains modes de réalisation, les supports sont aptes à rester très proches les un des autres quand l'aération est modérée formant ainsi des conditions anoxiques locales lors d'une phase de traitement aérobique, comme par exemple les supports « Z » de AnoxkaldnesTM. Selon ces modes de réalisation, la phase dans laquelle le film biologique est mis en conditions anoxiques
10 peut être concomitante ou postérieure à la phase de traitement aérobique.

Chaque séquence de traitement du procédé selon l'invention comprend le remplissage du SBMBBR avec une eau à traiter en conditions anaérobies.

L'étape de remplissage du SBMBBR peut être effectuée plus ou moins rapidement. La durée de remplissage peut notamment être comprise entre 30 min à 5 heures et
15 préférentiellement entre 90 et 180 minutes. A l'issue de l'étape de remplissage, le SBMBBR peut être plus ou moins rempli. Avantagusement, le SBMBBR a un ratio de volume d'échange (VER) compris entre 90% et 100%. Le ratio de volume d'échange est défini comme étant le rapport entre le volume d'eau évacué à la fin du cycle par le volume d'eau total dans le SBMBBR après la phase d'alimentation.

20 La phase initiale de traitement anaérobie dure de 30 min à 5 heures. La phase initiale anaérobie permet notamment d'initier les mécanismes de déphosphatation biologique grâce à la présence de micro-organismes DPAO. Une dégradation ou réduction du carbone organique soluble de l'eau présente dans le réacteur SBMBBR et une augmentation de phosphore inorganique est observée, le relargage de phosphore inorganique par les micro-organismes DPAO
25 étant une étape essentielle pour la déphosphatation. Les réserves de carbone internes constituées durant la phase initiale anaérobie permettent aux micro-organismes DPAO d'accumuler des polyphosphates en utilisant des ions nitrates ou des ions nitrites plutôt que du dioxygène pendant le au moins un cycle aérobique/anoxie.

Dans chaque séquence de traitement du procédé selon l'invention, la phase de traitement
30 anaérobie est suivie par au moins un cycle aérobique/anoxie, préférentiellement 1 à 5 cycles.

Un cycle aérobique/anoxie comprend une phase de traitement aérobique. Ceci permet d'assurer la transformation de l'ammonium (NH_4^+) principalement en ions nitrites (NO_2^-) et dans une moindre mesure en ions nitrates (NO_3^-). Afin que la transformation de NH_4^+ s'arrête majoritairement à l'espèce NO_2^- sans être transformée en NO_3^- , de faibles concentrations en O_2 ,
35 une durée d'aération limitée, des conditions anoxiques « locales », ainsi qu'une alternance de

phase aérobie/anoxie sont nécessaires et sont des leviers pour inhiber les NOB (« *Nitrite Oxydizing Bacteria* » qui transforment les nitrites en nitrates) permettant ainsi d'accumuler des nitrites.

La présence de DPAOs apporte une compétition supplémentaire contre les NOB vis-à-vis des nitrites. Ainsi, le duo Anammox et DPAO permet de limiter le développement des NOB.

Des micro-organismes permettant d'assurer cette transformation sont par exemple des bactéries oxydantes de l'ammonium « *Ammonia oxydizing bacteria* », ou AOB qui peuvent transformer le NH_4^+ en NO_2^- . Pour de faibles concentrations en oxygène, les cinétiques apparentes de croissances sont plus importantes pour les AOB que pour les NOB (« *Nitrite Oxydizing Bacteria* ») permettant ainsi d'accumuler et/ou de produire des nitrites.

La phase de traitement aérobie est mise en œuvre de telle sorte à obtenir une concentration en ions ammonium supérieure à une concentration seuil en ions ammonium, cette concentration seuil étant calculée pour permettre le développement de micro-organismes anammox pendant la phase durant laquelle le film biologique est mis, au moins localement, en conditions anoxiques. La concentration seuil dépend du ratio en DCO:NTK:P de l'eau à traiter. Avantageusement, la concentration seuil en ions ammonium est de $\geq 1\text{mg N/L}$, préférentiellement $\geq 2\text{mg N/L}$.

Un cycle aérobie/anoxie comprend également une phase durant laquelle le film biologique est mis, au moins localement, en conditions anoxiques. Cette phase est concomitante ou postérieure à la phase de traitement aérobie. Pendant cette phase, les micro-organismes anammox et DPAO transforment NH_4^+ , NO_2^- et NO_3^- en diazote sans nécessiter de source extérieure de carbone. Les DPAO assurent également la déphosphatation de l'eau par accumulation.

Avantageusement, le au moins un cycle aérobie/anoxie dure de 1 heure à 10 heures.

Dans des modes de réalisation particuliers, chaque cycle du au moins un cycle de traitement aérobie/anoxie, la phase dans laquelle le film biologique est mis en conditions majoritairement anoxiques est postérieure à la phase aérobie.

Dans ces modes de réalisation, le ratio entre la durée de la phase aérobie et la durée de la phase dans laquelle le film biologique est mis en conditions majoritairement anoxiques est avantageusement compris entre 1:1 et 2:1. Autrement dit, pour un procédé ne comprenant qu'un seul cycle aérobie/anoxie, la durée de la phase aérobie peut notamment être de 1/2 et la durée de la phase dans laquelle le film biologique est mis en conditions majoritairement anoxiques être de 1/2, par rapport à la durée totale du cycle aérobie/anoxie. Alternativement, la durée de la phase aérobie peut notamment être de : 2/3 et la durée de la phase dans laquelle le film biologique est mis en conditions majoritairement anoxiques être de 1/3 par rapport à la durée

totale du cycle aérobie/anoxie. Pour un procédé comprenant deux cycles aérobie/anoxie, la durée de chaque phase aérobie peut notamment être de : 1/4 et la durée de chaque phase dans laquelle le film biologique est mis en conditions majoritairement anoxiques être de 1/4 par rapport à la durée totale des cycles aérobie/anoxie. Alternativement, la durée de chaque phase aérobie peut
5 notamment être de : 1/3 et la durée de chaque phase dans laquelle le film biologique est mis en conditions majoritairement anoxiques être de 1/6 par rapport à la durée totale des cycles aérobie/anoxie.

Selon un mode préféré de l'invention, pour chaque cycle de traitement biologique, la phase de traitement anaérobie dure de 1 heure à 5 heures et, le au moins un cycle aérobie/anoxie
10 dure de 1 heure à 10 heures.

Liste des figures

L'invention, ainsi que les différents avantages qu'elle présente, seront plus facilement compris grâce à la description qui va suivre de deux modes non limitatifs de réalisation de celle-ci ainsi que d'un mode de réalisation d'un procédé conventionnel ne faisant pas partie de
15 l'invention, en référence aux figures suivantes :

[fig. 1] est un graphique représentant, la concentration en azote de l'ion ammoniacal (NH_4^+) en entrée du SBMBBR (ordonnée de gauche ; mg N/L), la concentration en azote global soluble (NGL soluble = NTK soluble + NO_2^- + NO_3^-) en sortie du SBMBBR (ordonnée de gauche ; mg N/L) et le rendement d'élimination en azote global soluble (ordonnée de droite ; %) en fonction
20 des jours de fonctionnement dans un procédé conventionnel SBMBBR. Les teneurs en azote global soluble de l'eau à traiter sont principalement l'azote ammoniacal, les teneurs en nitrites (NO_2^-) et nitrates (NO_3^-) étant négligeables en entrée du SBMBBR.

[fig. 2] est un graphique représentant la concentration en azote de l'ion ammoniacal (NH_4^+) en entrée du SBMBBR (mg N/L), la concentration en azote global soluble (NGL soluble) en
25 sortie du SBMBBR (mg N/L) et le rendement d'élimination en azote global soluble (%) en fonction des jours de fonctionnement dans un procédé mis en œuvre selon l'invention où la mise en conditions anoxiques est postérieure à la phase aérobie. Les teneurs en azote global soluble de l'eau à traiter sont principalement l'azote ammoniacal, les teneurs en nitrites (NO_2^-) et nitrates (NO_3^-) étant négligeables en entrée du SBMBBR.

[fig. 3] est un graphique représentant la concentration en azote de l'ion ammoniacal (NH_4^+) en entrée du SBMBBR (mg N/L), la concentration en azote global (NGL soluble) en sortie du
30 SBMBBR (mg N/L) et le rendement d'élimination en azote (%) en fonction des jours de fonctionnement dans un procédé mis en œuvre selon l'invention où la mise en conditions anoxiques est concomitante à la phase aérobie. Les teneurs en azote global soluble de l'eau à

traiter sont principalement l'azote ammoniacal, les teneurs en nitrites (NO_2^-) et nitrates (NO_3^-) étant négligeables en entrée du SBMBBR.

[fig. 4] est un graphique représentant le nombre de bactéries NOB dans le biofilm (ordonnée de gauche ; bactéries NOB/ m^2 de support à biofilm) et le nombre de bactéries Anammox dans le biofilm (ordonnée de droite ; bactéries Anammox/ m^2 de support à biofilm) en fonction des jours d'essais et pour les trois mises en œuvre du SBMBBR (mise en œuvre conventionnelle à gauche, mise en œuvre selon l'invention où la mise en conditions anoxiques est postérieure à la phase aérobie au milieu, mise en œuvre selon l'invention où la mise en conditions anoxiques est concomitante à la phase aérobie à droite).

[fig. 5] est un graphique représentant la concentration en phosphates (PO_4) dans le SBMBBR (ordonnée de gauche ; mg P/L), la concentration en azote de l'ion ammoniacal (NH_4^+) dans le SBMBBR (ordonnée de gauche ; mg N/L) et la concentration en azote de l'ion nitrite (NO_2^-) dans le SBMBBR (ordonnée de droite ; mg N/L) au cours d'un cycle unique de traitement ayant eu lieu pendant la mise en œuvre du procédé SBMBBR selon l'invention où la mise en conditions anoxiques est postérieure à la phase aérobie.

[fig. 6] est un graphique représentant la concentration en phosphates (PO_4) dans le SBMBBR (ordonnée de gauche ; mg P/L), la concentration en azote de l'ion ammoniacal (NH_4^+) dans le SBMBBR (ordonnée de gauche ; mg N/L) et la concentration en azote de l'ion nitrite (NO_2^-) dans le SBMBBR (ordonnée de droite ; mg N/L) au cours d'un cycle unique de traitement ayant eu lieu pendant la mise en œuvre du procédé SBMBBR selon l'invention où la mise en conditions anoxiques est concomitante à la phase aérobie.

Description de modes détaillés de réalisation de l'invention

Des essais ont été réalisés selon deux modes de réalisation de l'invention et comparés aux résultats obtenus par un autre essai mettant en œuvre le procédé « conventionnel » dans un SBMBBR ne faisant pas partie de l'invention.

Essai 6.1 – Mise en œuvre conventionnelle du « SBMBBR » utilisé à titre comparatif et ne faisant pas partie de l'invention.

Pour cette mise en œuvre, des supports « classiques » ont été utilisés comme par exemple des supports « K5 » de AnoxkaldnesTM. Ces supports sont parfaitement fluidisés lorsque l'aération nécessaire à l'obtention de conditions aérobies est appliquée.

Les cycle SBR « classiques » comprennent 2 phases : une phase anaérobie suivie d'une phase aérobie.

Les supports ne sont pasensemencés avec les bactéries anammox avant le début des essais.

Les teneurs en oxygène dans le milieu réactionnel, pendant la phase aérobie sont maintenues à des valeurs comprises entre 4 et 5 mg O₂/L.

En référence à la **figure 1**, dans ces conditions de fonctionnement, l'abattement de l'azote global soluble (NGL soluble) est compris entre 33 et 67 %, obtenant ainsi des concentrations en azote global soluble de l'eau traitée proches de 25 mg N/L et toujours supérieures à 20 mg N/L sur les 600 jours d'essais.

En référence à la **figure 4** (partie gauche du graphique), le nombre de bactéries NOB par m² de supports est élevé et de l'ordre de 10⁹ par m² de support. Celui des bactéries Anammox reste faible, de l'ordre 10⁸ par m² de support correspondant à la limite de quantification de la méthode analytique.

Essai 6.2 – Mise en œuvre d'un procédé selon l'invention avec mise en place d'une phase anoxique postérieure à la phase aérobie.

Pour cette mise en œuvre des supports « classiques » ont été utilisés comme par exemple des supports « K5 » de AnoxkaldnesTM. Ces supports sont parfaitement fluidisés lorsque l'aération nécessaire à l'obtention de conditions aérobies est appliquée.

Les supports n'ont pas étéensemencés avec les bactéries anammox avant le début des essais.

Jusqu'au 350^{ème} jour, le fonctionnement du SBMBBR est de type conventionnel, les cycles de traitement alternent entre une phase anaérobie de 2 heures et une phase aérobie de 6 heures. Cette période correspond à un ensemencement du biofilm en bactéries déphosphatantes et nitrifiantes.

A compter du 350^{ème} jour, une phase anoxique est ajoutée après la phase aérobie. Typiquement, la durée des différentes phases de fonctionnement est de 2 à 3 heures pour la phase anaérobie, 4 à 5 heures pour la phase aérobie, et 1 à 2 heures pour la phase anoxique. Les conditions d'aération (durée et teneur en oxygène) de la phase aérobies sont ajustées pour atteindre des teneurs en ammoniacque (NH₄⁺) dans le milieu réactionnel supérieures ou égales à 1 mg N/L avant la phase anoxique. Les teneurs en oxygène dans le milieu réactionnel étant compris entre 4 et 5 mg O₂/L pour la phase aérobie, et de 0 mg O₂/L pour la phase anoxique.

En référence à la **figure 2**, jusqu'au 350^{ème} jour avant la mise en œuvre de l'invention, l'abattement de l'azote global soluble (mg N/L) est compris entre 25 et 45% pour obtenir des teneurs dans l'eau traitée comprises entre 30 et 45 mg N/L. Après la mise en œuvre de l'invention par l'ajout d'une phase anoxique postérieure à la phase aérobie dont les conditions d'aération sont ajustées pour atteindre des teneurs en ammonium (NH₄⁺) supérieures à 1 mg N/L nous observons une augmentation progressive de cet abattement qui atteint 80% avec des teneurs en azote global soluble dans l'eau traitée comprises entre 10 et 25 mg N/L

En référence à la **figure 4** (partie du milieu du graphique), le nombre de bactéries NOB par m^2 de supports est élevé et de l'ordre de 10^9 avant le 350^{ème} jour de fonctionnement. Après un ensemencement du biofilm avec des bactéries nitrifiantes et l'obtention de la nitrification complète, ce nombre est du même ordre de grandeur que pour la mise en œuvre conventionnelle décrite au
5 paragraphe 6.1. Après la mise en œuvre de la phase anoxique, le nombre des NOB diminue pour atteindre un log de moins. Les bactéries NOB perdent la compétition vis-à-vis des nitrites contre les bactéries Anammox et DPAOs et sont progressivement éliminées du biofilm.

Avant le 350^{ème} jour, et jusqu'à la mise en œuvre de l'invention, le nombre de bactéries Anammox reste faible, de l'ordre 10^8 par m^2 de support correspondant à la limite de
10 quantification de la méthode analytique.

Après la mise en œuvre de l'invention par l'ajout d'une phase anoxique postérieure à la phase aérobie dont les conditions d'aération sont ajustées pour atteindre des teneurs en ions ammonium (NH_4^+) supérieures à 1 mgN/L, le nombre de bactéries anammox augmente progressivement pour atteindre 10^{11} bactéries anammox / m^2 support. Ce nombre de bactéries
15 étant considéré comme élevé et représentatif d'une activité avérée des bactéries anammox dans le biofilm.

En référence à la **figure 5**, on observe notamment la consommation des ions ammonium (NH_4^+) et l'accumulation des ions nitrites (NO_2^-) pendant la phase aérobie puis une consommation simultanée des ions ammonium (NH_4^+) et des ions nitrites (NO_2^-) pendant la phase anoxie. En fin
20 de cycle de traitement par l'activité des bactéries Anammox, les teneurs en azote global soluble sont de 11 mgN/L, comprenant respectivement des teneurs en ions ammonium (NH_4^+) de 1 mg N/L des teneurs en ions nitrites (NO_2^+) de 2 mg N/L et des teneurs en ions nitrates NO_3^- de 8 mg N/L. La concentration en PO_4 dans l'eau traitée est par ailleurs inférieure à 0,5 mg P/L, correspondant à un abattement en PO_4 supérieur à 90% pour le cycle en question sans ajout de
25 produits chimiques.

Il a donc été démontré que le mode de réalisation avec une phase anoxique postérieure à la phase d'aération est plus efficace en matière d'élimination de l'azote que le procédé conventionnel. En effet, après avoir mis en place la stratégie « anoxie » aux alentours du jour 350 les rendements d'élimination en azote (NGL soluble) ont augmenté rapidement et se sont
30 stabilisés à 75-80% sur plus de 200 jours (jours 450 à jours 650). La teneur en NGL soluble en sortie du réacteur a diminuée significativement pour atteindre moins de 15 mg N/L sur cette même période. Avant la mise en place de la stratégie « anoxie », les mesures en bactéries Anammox par qPCR ne permettent pas de détecter de bactéries Anammox (quantités inférieures à la limite de quantification de l'ordre de $5 \cdot 10^8$). A partir de la mise en place de la stratégie «
35 anoxie » vers le jour 350, les quantités ont augmentées rapidement et significativement pour

atteindre des valeurs de l'ordre de 1.10^{11} . Le développement et l'activité des bactéries Anammox expliquent en grande partie les bons rendements d'élimination de l'azote.

6.3– Mise en œuvre d'un procédé selon l'invention où la création de zones locales anoxiques est concomittante à la phase aérobie.

5 Pour cette mise en œuvre des supports « ondulés » ont été utilisés comme par exemple des supports « Z » de Anoxkaldnes™. Ces supports favorisant la création de zone locales anoxiques lors des phases d'aération.

10 Le fonctionnement mis en œuvre consiste en une phase anaérobie de 2 heures suivie d'une phase aérobie de 6 heures. Les teneurs en oxygène dissous au cours de la phase aérobie étant comprises entre 4 et 5 mg O₂/L.

L'utilisation des supports « Z » de par leur géométrie permettent qu'ils restent très proches les uns des autres, formant ainsi des conditions anoxiques locales lors de la phase de traitement aérobie.

15 En référence à la **figure 3**, la mise en œuvre de l'invention comprenant une phase anaérobie suivie d'une phase aérobie au cours de laquelle la concentration en ions ammonium est supérieure à 1mg N/L et pour laquelle le film biologique est mis en conditions anoxiques localement, nous observons un'abattement de l'azote global soluble NGL compris entre 70 et 90% pour obtenir en moyenne des teneurs dans l'eau traitée de l'ordre de 10 mg N/L.

20 En référence à la **figure 4** (partie de droite du graphique), le nombre moyen de bactéries NOB par m² de supports est de l'ordre de 10⁸ pendant toute la durée des essais. Par ailleurs le nombre moyen de bactéries Anammox par m² de supports est de l'ordre de 10¹³ soit un nombre très élevé pour un procédé dont les objectifs de traitement ne portent pas exclusivement sur l'abattement de l'azote global par les bactéries Anammox.

25 En référence à la **figure 6**, malgré une concentration en oxygène dissous de 5 mg O₂/L dans le liquide pendant toute la phase aérobie, la concentration en azote global soluble (NGL) soluble dans l'eau traitée a atteint 10 mg N/L comprenant respectivement une concentration en ions ammonium (NH₄⁺) de 0.1 mg N/L, une concentration en ions nitrites (NO₂⁻) de 0,9 mg N/L et une concentration en ions nitrites (NO₃⁻) de 9 mg N/L. La concentration en PO₄ dans l'eau traitée est par ailleurs égale à 0,1 mg P/L, correspondant à un abattement en PO₄ supérieur à 95% pour le cycle en question sans ajout de produits chimiques.

30 En référence à la **figure 3**, il a été démontré qu'en mettant en place des conditions « anoxie » locales concomittantes à la phase aérobie, le développement d'espèces telles que les bactéries Anammox et les performances du traitement de l'azote sont largement améliorées tout en garantissant une élimination satisfaisante du carbone et du phosphore. La teneur en azote

global soluble (NGL) soluble en sortie du réacteur a fluctué entre 10 et 15 mg N/L avec une nombre de bactéries Anamomox dans le biofilm de l'ordre de 10^{12} - 10^{13} /m² de support.

REVENDEICATIONS

1. Procédé de traitement des eaux pour l'abatement simultané du carbone, de l'azote et du phosphore, mis en œuvre dans un réacteur à film biologique à lit mobile en mode séquentiel discontinu (SBMBBR) comprenant des supports aptes au développement d'un film biologique,
- 5 ledit procédé comprenant des séquences de traitements successifs, chaque séquence de traitement comprenant:
 - une phase initiale de traitement anaérobie,
 - ladite phase initiale de traitement anaérobie étant suivie par au moins un cycle aérobie/anoxie constitué de :
- 10
 - une phase de traitement aérobie de telle sorte à obtenir une concentration en ions ammonium ne passant pas en-dessous d'une concentration seuil en ions ammonium; et,
 - une phase dans laquelle le film biologique est mis, au moins localement, en conditions anoxiques, cette phase étant concomitante ou postérieure à ladite phase de traitement aérobie; la concentration seuil en ions ammonium étant calculée pour permettre le développement de
- 15 micro-organismes anammox pendant la phase dans laquelle le film biologique est mis, au moins localement, en conditions anoxiques.
2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel la concentration seuil en ions ammonium est $\geq 1\text{mg N/L}$ et préférentiellement $\geq 2\text{mg N/L}$.
3. Procédé selon la revendication 1 ou 2 dans lequel, pour chaque séquence de traitement le
- 20 SBMBBR a un ratio de volume d'échange (VER) compris entre 90% et 100%.
4. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel pour chaque cycle de traitement biologique, la phase de traitement anaérobie dure de 30 min à 5 heures et, le au moins un cycle aérobie/anoxie dure de 1 heure à 10 heures.
5. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel pour chaque cycle
- 25 du au moins un cycle de traitement aérobie/anoxie, la phase dans laquelle le biofilm est mis en conditions majoritairement anoxiques est postérieure à la phase aérobie, et, le ratio entre la durée de la phase aérobie et la durée totale de la phase Aérobie-anoxique est comprise entre 0,2 et 0,8.
6. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans lequel lesdits supports
- 30 sont aptes de par leur géométrie à rester très proches les uns des autres lorsque l'intensité de l'aération est modérée, formant ainsi des conditions anoxiques locales lors d'une phase de traitement aérobie.
7. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans lequel il n'y a pas d'ensemencement préalable avec des micro-organismes anammox et DPAO.

- 8.** Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, dans lequel il n'y a pas d'ajout de source externe de carbone et/ou il n'y a pas d'ajout de source externe de sels métalliques.