

Élimination accrue de l'azote

Régulation de la (dé-)nitrification dans les réacteurs SBR à l'aide de gradients et de capteurs sélectifs d'ions

La station d'épuration de la région de Stetten traite les eaux usées d'environ 18 000 EH (équivalents-habitants) de six communes à l'aide du procédé SBR ("Sequencing Batch Reactor" – en français : réacteur discontinu de séquençage). Une régulation du gradient a été développée sur la base du signal brut des électrodes sélectives d'ions (ISE). Celle-ci permet de réguler la dénitrification et la nitrification en fonction des besoins, sans qu'il soit nécessaire d'étalonner la sonde. La régulation, qui a fonctionné de manière robuste pendant trois ans, a permis de réduire la charge de travail de l'exploitant de la station d'épuration.

Auteurs :

Roman Schäfer, FHNW (Haute école spécialisée du nord-ouest de la Suisse)

Stefan Vogel, Endress+Hauser (Schweiz) AG

Thomas Stenz, Association des eaux usées de la région de Stetten

Reto Steinemann, Chestonag Automation AG

Patrick Dobler, Chestonag Automation AG

Jonas Löwenberg, CSD Ingenieure AG

Franziska Müller-Golz, CSD Ingenieure AG

Anna Bösel, Endress+Hauser (Schweiz) AG

Michael Thomann, FHNW (Haute école spécialisée du nord-ouest de la Suisse)

Résumé

Afin d'optimiser le fonctionnement du procédé SBR, il est pertinent de réguler les processus de nitrification et de dénitrification de manière dynamique et en fonction des besoins. Pour la régulation dynamique, une technique de mesure robuste est nécessaire, capable de mesurer de manière fiable la concentration d'ammonium et de nitrate à un moment donné. Cette mesure peut être réalisée à l'aide d'électrodes sélectives d'ions (ISE). Ces capteurs déterminent la concentration d'un ion spécifique à l'aide d'une électrode de référence. L'étalonnage permet de déterminer la concentration de l'ion à mesurer en fonction du signal brut (mV). Pour obtenir des valeurs de mesure correctes et fiables, il est nécessaire d'étalonner régulièrement les capteurs. Cela entraîne un travail relativement important pour l'exploitant de la station d'épuration. C'est pourquoi une régulation du gradient, basée sur le signal brut des capteurs ISE, a été développée pour la station d'épuration de la région de Stetten. Le concept de régulation mis en œuvre avec succès régule la durée des phases de dénitrification et de nitrification en fonction du signal brut des sondes de nitrate ou d'ammonium. L'étalonnage chronophage des capteurs ISE n'est ainsi plus nécessaire. De plus, la régulation du gradient conduit à un déroulement optimal de la réaction dans le réacteur SBR et permet ainsi une élimination accrue de l'azote. Grâce à la régulation, il est possible, même pour les petites ou moyennes stations d'épuration, de réguler le traitement des eaux usées dans le réacteur SBR en fonction des besoins et avec un minimum de travail.

Station d'épuration de la région de Stetten

La station d'épuration de la région de Stetten traite les eaux usées de six communes du canton d'Argovie : Bellikon, Fischbach-Göslikon, Künnten, Niederwil, Remetschwil et Stetten. En 2013, la station d'épuration de la région de Stetten a été agrandie et trois stations ont été regroupées en une seule installation centrale (fermeture des stations d'épuration de Fischbach-Göslikon / Niederwil et Bellikon / Künnten). Le débit moyen journalier entrant est d'environ 5 400 m³/jour avec une charge moyenne de DCO d'environ 1 800 kg/jour (quantile 85 % : 2 200 kg), ce qui correspond à environ 18 000 EH. La station d'épuration peut être étendue à 19 000 EH et dispose donc encore d'une certaine réserve de capacité.

Le traitement mécanique préliminaire mis en œuvre dans la station d'épuration de Stetten comprend des grilles, un dessableur et un dégraisseur, ainsi qu'un décanteur primaire (270 m³). Les eaux usées pré-épurées arrivent ensuite dans le réservoir SBR. L'un des trois réacteurs SBR existants est périodiquement rempli à partir du réservoir SBR. Chaque réacteur SBR dispose d'un volume maximal de 1 490 m³. Il en résulte un volume biologique spécifique de 235 l/EH. C'est dans le réacteur SBR qu'a lieu le traitement biologique, c'est-à-dire la dégradation des matières organiques, la nitrification et la dénitrification. De plus, l'ajout d'agents précipitants (sels de fer et d'aluminium) permet de précipiter chimiquement le phosphate et de l'éliminer. Les eaux usées traitées sont rejetées dans la Reuss. Les boues primaires et les boues excédentaires produites sont stabilisées sur place par anaérobiose, le biogaz produit permettant de générer de l'énergie électrique à l'aide d'une micro-turbine à gaz. Le centrifugat séparé lors de la déshydratation des boues est réintroduit dans le traitement biologique des eaux usées.

Un rejet industriel provoque ponctuellement des pics de potassium, qui perturbent les capteurs sélectifs d'ions (voir également les capteurs sélectifs d'ions et la fig. 6).



Fig. 1 : Vue aérienne de la station d'épuration de la région de Stetten avec la décantation primaire (4), le réservoir SBR (5), les trois réacteurs SBR (6) et la digestion anaérobie mésophile (10)

Vue d'ensemble du procédé SBR

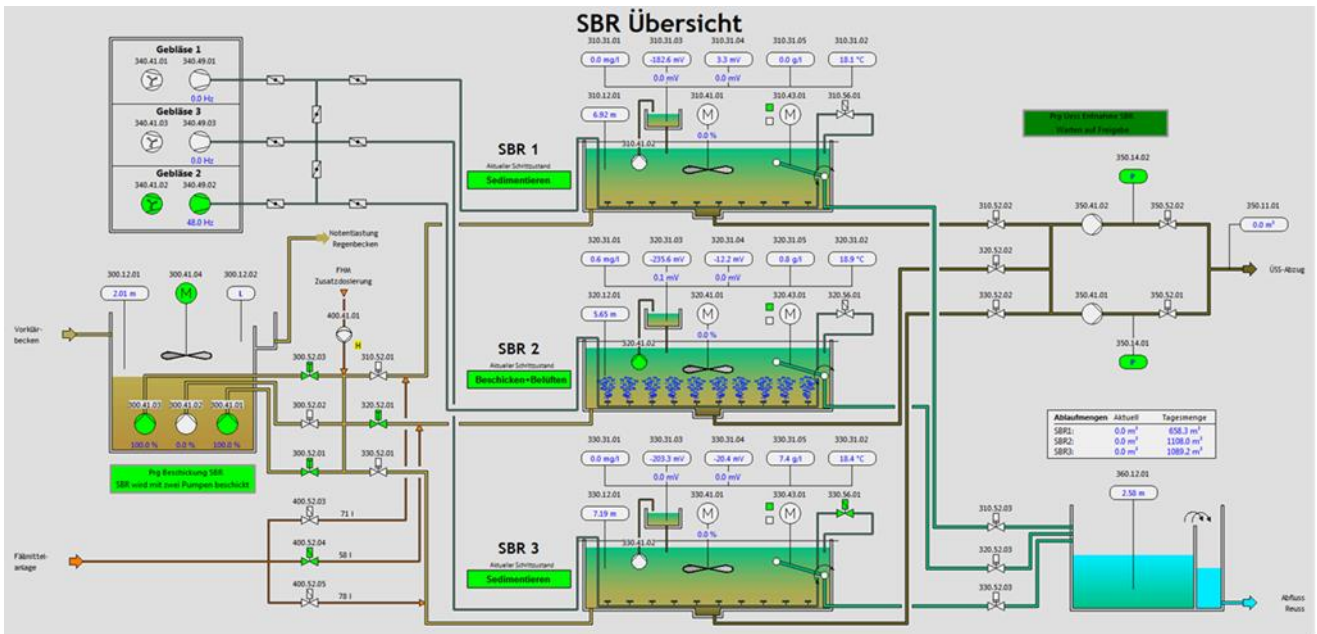


Fig. 2 : Extrait du système de commande de la station d'épuration de la région de Stetten. Vue d'ensemble des trois réacteurs SBR.

Techniques de mesure

Chacun des trois réacteurs SBR est équipé d'un bassin de mesure alimenté par une pompe (Fig. 3). La pompe est active pendant toutes les phases du procédé SBR, à l'exception de la phase de sédimentation et de la phase d'évacuation des eaux claires. Dans le bassin de mesure se trouvent les sondes pour l'oxygène dissous, le pH, la teneur en matière sèche et les électrodes sélectives d'ions (ISE) pour la mesure de la concentration d'ammonium et de nitrate.

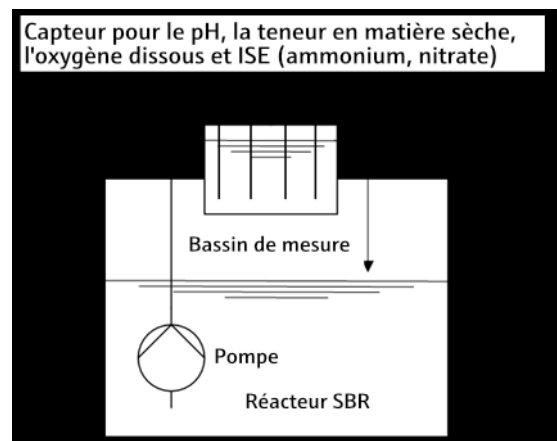


Fig. 3 : Bassin de mesure dans l'un des trois réacteurs SBR avec la sonde sélective d'ions (à droite) et les sondes pour la teneur en matière sèche, le pH et la concentration en oxygène dissous (à gauche).

Il était initialement prévu de faire fonctionner les trois réacteurs SBR de la station d'épuration de la région de Stetten de manière dynamique à l'aide des sondes ISE. Lors de l'exploitation, il s'est avéré que l'étalonnage des sondes ISE entraînait un grand investissement en temps et des travaux de maintenance non planifiés récurrents. Cela a eu pour conséquence que les sondes ISE n'ont plus été utilisées de manière dynamique, et que les réacteurs SBR ont été régulés de manière classique au moyen d'une commande temporelle.

C'est pourquoi la question s'est posée de savoir comment les trois réacteurs SBR pouvaient être régulés de manière dynamique avec des possibilités alternatives et à moindre coût. Daniel Iten et Stefan Vogel d'Endress+Hauser ont élaboré un concept général. Anna Bösel a effectué un stage chez Endress+Hauser afin d'affiner ce concept. Elle a été aidée par Reto Steinemann et Patrick Dobler de Chestonag Automation pour la commande et la régulation et par Michael Thomann de la Haute école spécialisée du nord-ouest de la Suisse pour les questions de technique des procédés. Des essais par lots avec les capteurs ISE ont permis de recueillir de premières expériences et, sur cette base, d'écrire un premier concept de régulation. Après diverses optimisations, la régulation du gradient a été mise en place de manière durable sur la station d'épuration de la région de Stetten.

Contexte du procédé SBR ("Sequencing Batch Reactor" – en français : Réacteur discontinu séquentiel)

Le procédé SBR est un procédé de traitement des eaux usées dans lequel les processus d'épuration biologique et de sédimentation sont séparés dans le temps, mais effectués dans le même réacteur. Contrairement aux procédés conventionnels, où ces processus ont lieu dans différents bassins, dans le procédé SBR, ils ont lieu dans un seul réacteur par le déroulement de différentes séquences successives. ^[1]

Une installation SBR typique se compose de plusieurs réacteurs afin d'assurer une alimentation continue. Le réacteur est précédé d'un réservoir SBR qui sert de bassin de pompage et de bassin tampon pour l'arrivée des eaux usées. Les principales séquences du procédé SBR comprennent le remplissage, l'épuration biologique, la sédimentation et la décantation. ^[1]

- 1- Remplissage : le réacteur est alimenté en eaux usées prétraitées provenant du réservoir de pompage. La commande du remplissage se fait soit par le volume à remplir, soit par un temps prédéfini.
- 2- Traitement biologique : pendant le remplissage, la pré- dénitrification commence en parallèle, au cours de laquelle le nitrate présent dans le cycle précédent est dénitrifié en azote élémentaire avec le substrat (composés carbonés) présent dans les eaux usées fraîches. Vient ensuite la nitrification, au cours de laquelle l'ammonium est oxydé en nitrate sous aération et les composés carbonés sont dégradés en conditions aérobies.
- 3- Sédimentation : après la réaction biologique, les boues activées se déposent et les eaux usées épurées peuvent être évacuées. Le temps de cycle nécessaire pour la sédimentation dépend des caractéristiques des boues, de la concentration en matière sèche dans le réacteur SBR et de la vitesse de sédimentation qui en résulte.
- 4- Décantation : les eaux usées épurées sont évacuées au moyen d'un décanteur. La décantation s'arrête lorsqu'un niveau prédéfini est atteint ou que le temps prédéfini est écoulé.

Après la décantation, le réacteur SBR passe soit au cycle suivant, soit en position d'attente jusqu'à ce que suffisamment d'eaux usées soient disponibles dans le réservoir de pompage.

Temps de cycles typiques

Dans le cas le plus simple, le réacteur SBR fonctionne en fonction du temps. Cela signifie que pour chaque cycle, des temps fixes sont imposés, définis et adaptés par les exploitants de l'installation. Le temps de cycle est influencé par le nombre de réacteurs, l'âge des boues aérobies souhaité et l'équipement des réacteurs. En règle générale, on distingue les programmes de cycle pour le temps sec et le temps de pluie. Par temps de pluie, le cycle est adapté de manière à pouvoir traiter davantage d'eaux usées par jour. En revanche, le temps de cycle total est réduit et le procédé "Alimentation/mélange" sans aération est remplacée par le procédé "Alimentation/aération". Il est également possible d'augmenter le volume d'échange en augmentant le niveau du réacteur SBR ou en abaissant le niveau de décantation. ^[2]

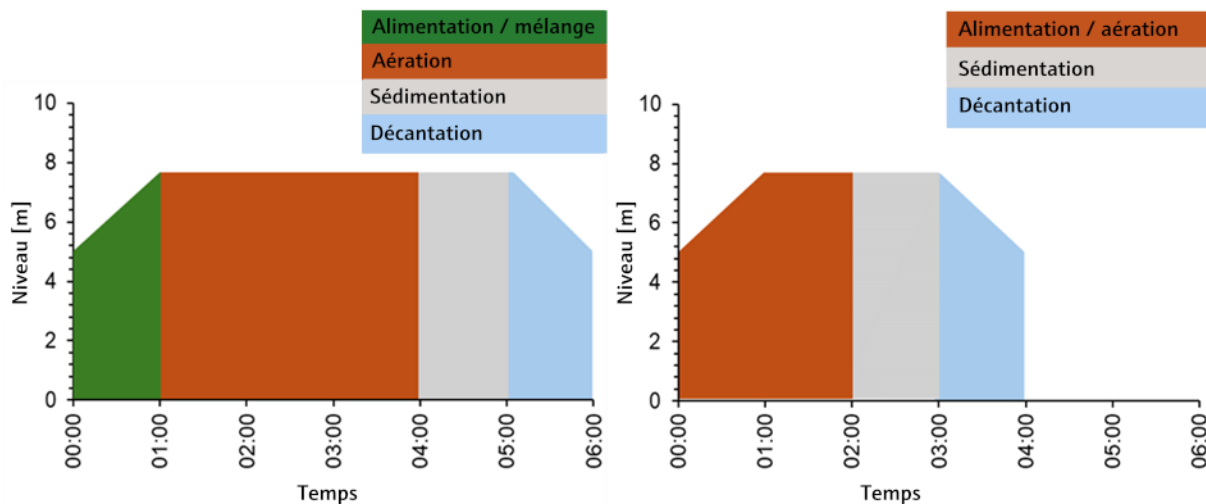


Fig. 4 : Comparaison du cycle dans le réacteur SBR par temps sec et par temps de pluie avec les temps de cycle correspondants, tels qu'ils sont utilisés à la station d'épuration de la région de Stetten.

Élimination de l'azote dans le procédé SBR

En règle générale, le réacteur SBR est exploité de manière à être agité lors de l'alimentation et à permettre la dénitrification du nitrate restant du cycle précédent avec le substrat frais. Indépendamment de la dénitrification, l'azote est également incorporé par la biomasse formée, ce qui entraîne également l'élimination de l'azote par l'évacuation des boues excédentaires. Pour obtenir une élimination accrue de l'azote, le procédé SBR peut être optimisé comme suit :

Plusieurs phases de remplissage : pour obtenir une élimination accrue de l'azote, le réacteur SBR peut être alimenté en plusieurs phases. Le volume d'échange est alors réparti entre les différentes phases de remplissage. Lors du premier remplissage, le nitrate du cycle précédent est dénitrifié. Ensuite, le remplissage

est arrêté et l'aération est effectuée. Un nouveau nitrate est alors formé par nitrification, lequel est dénitrifié lors de la phase de remplissage suivante, grâce au substrat frais.

Post-Dénitrification : une fois la nitrification terminée, l'aération est arrêtée et le réacteur est mélangé. Dès que l'oxygène dissous a été consommé, des conditions anoxiques s'installent dans le réacteur et la dénitrification se produit. Comme le carbone disponible a été dégradé en aérobiose pendant le cycle d'aération précédent, la post-dénitrification se fait sur des produits d'hydrolyse. Le taux de dénitrification est inférieur à celui de la pré-dénitrification en raison de la limitation du substrat par l'hydrolyse lors de la post-dénitrification.

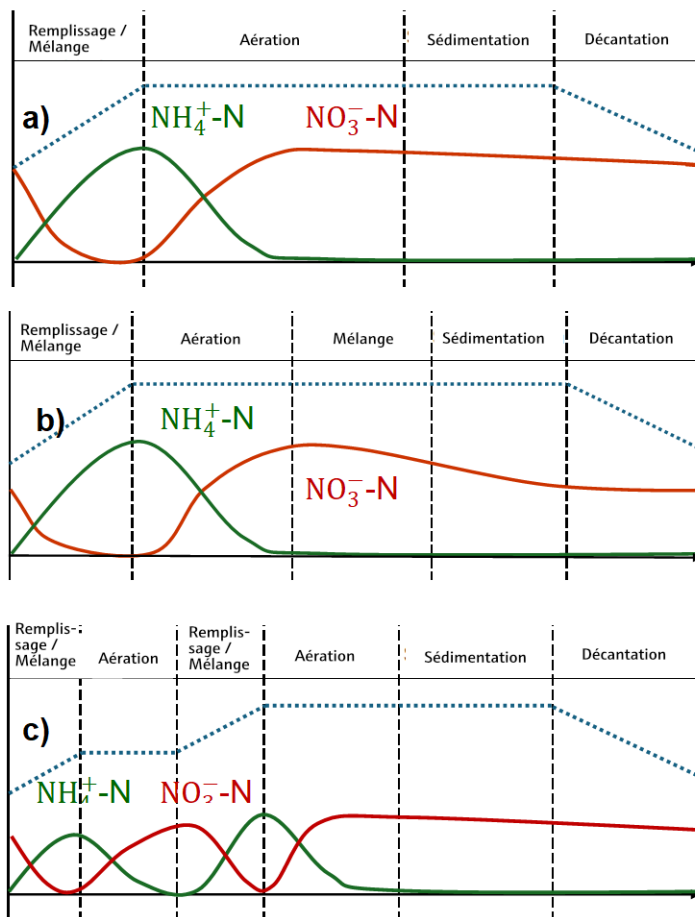


Fig.5 : Évolution de la concentration d'ammonium et de nitrate dans le réacteur SBR avec différents cycles : a) Alimentation en une étape b) Alimentation en une étape avec une post-dénitrification c) Alimentation en deux étapes.

Régulation dynamique

Dans le mode de fonctionnement basé sur le temps, les temps de cycle du réacteur SBR sont fixes et ne changent pas, quelle que soit la composition des eaux usées. Cela peut compliquer l'élimination optimale de l'azote, car les concentrations et les quantités d'eaux usées varient au cours de la journée. ^[3]

Pour tenir compte de ces variations et obtenir une meilleure élimination de l'azote, il convient de faire fonctionner le réacteur SBR de manière dynamique. Cela signifie que les temps de cycle sont adaptés aux conditions actuelles. Pour une telle régulation dynamique, il est impératif de disposer d'une technique de mesure robuste, capable de mesurer les concentrations d'ammonium et de nitrate présentes à un moment donné dans le réacteur SBR et de transmettre ces informations à la commande SBR. Ces mesures permettent à la commande d'adapter les temps de cycle dans le réacteur SBR à la charge correspondante des eaux usées. Cela permet de garantir un traitement plus efficace des eaux usées. ^[4]

Les capteurs sélectifs d'ions et les capteurs optiques (photomètre ou spectromètre UV-VIS) conviennent à la mesure continue du nitrate et de l'ammonium. La régulation de la nitrification peut également se faire par le biais de la teneur en oxygène. La régulation dynamique du temps de cycle pour la sédimentation et l'évacuation de l'eau claire n'est pas abordée en détail ici. ^[4]

Capteurs sélectifs d'ions (ISE)

Dans le cas des électrodes sélectives d'ions (ISE), une différence de potentiel entre deux demi-cellules est mesurée en millivolts (mV). Cette valeur brute est en relation logarithmique avec la concentration de l'ion à mesurer et est convertie en concentration en mg/l à l'aide de l'équation de Nernst. On utilise à cet effet dans le capteur ISE un matériau membranaire spécial (ionophore), qui est sélectif pour certains ions. Les ionophores présentent la sélectivité la plus élevée pour l'ammonium ou le nitrate, mais ils sont également sensibles à d'autres ions. Ces ions perturbateurs doivent être pris en compte : un étalonnage de la sonde dans la matrice des eaux usées correspondante permet de compenser partiellement ces influences croisées. Une modification de la matrice des eaux usées a donc toujours une influence sur la précision des valeurs mesurées : dans la pratique, les valeurs mesurées inférieures à 2 mg/l N présentent une incertitude accrue.

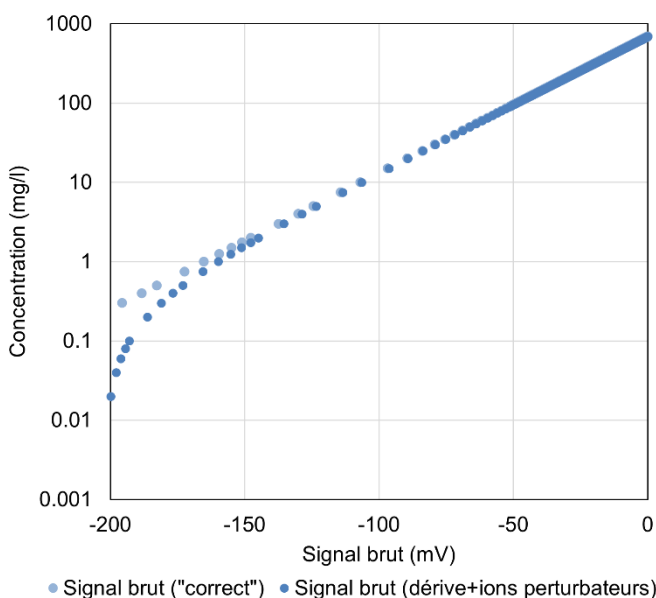


Fig. 6 : Relation entre le signal brut [mV] et la concentration d'ammonium qui en résulte [mg/l].

De plus, les électrodes subissent un vieillissement naturel dû à des intercalations dans la membrane et à la lixiviation de la demi-cellule de référence. Ce vieillissement s'observe dans le procédé comme une lente dérive de la valeur mesurée, c'est pourquoi il faut régulièrement étalonner et remplacer les pièces d'usure.

Les capteurs ISE sont très bien adaptés pour suivre de grandes variations de concentration, des mesures précises dans la gamme inférieure à 2 mg/l N ne peuvent être obtenues dans les eaux usées municipales qu'au prix d'un très gros effort de maintenance.

Régulation avec des valeurs absolues

La régulation du procédé SBR au moyen de valeurs absolues (= concentrations) peut se faire de deux manières différentes : par des valeurs limites ou à l'aide du gradient.

Régulation au moyen de valeurs limites : dans ce cas, des valeurs de concentration spécifiques sont fixées pour la nitrification et la dénitrification. Si ces valeurs ne sont pas atteintes, cela entraîne l'interruption de la phase concernée. Cela signifie que le procédé s'arrête lorsqu'une valeur limite est atteinte.

Régulation au moyen du gradient : dans cette méthode, le gradient est calculé à partir des concentrations mesurées. Le gradient indique dans quelle mesure la concentration d'une substance varie au fil du temps. Si le gradient se rapproche de la valeur "0", cela signifie qu'il n'y a plus de changement de concentration dans le procédé. Lors de la dénitrification, le gradient se rapproche de la valeur "0" lorsqu'il n'y a plus de nitrate (limitation du nitrate) ou plus de substrat (carbone) disponible (limitation du substrat). Lors de la nitrification, le gradient atteint la valeur "0" dès que tout l'ammonium a été nitrifié.

Régulation au moyen du signal brut

Pour la station d'épuration de la région de Stetten, le gradient est calculé à partir du signal brut ISE [mV] à l'aide de la formule suivante :

$$\text{gradient}(t) = \frac{\text{signal brut}(t) - \text{signal brut}(t - \Delta t)}{\Delta t}$$

Lorsque Δt devient infinitésimal, on parle de dérivée. Mais comme on ne dispose que de valeurs de mesure discrètes et que les sondes ont une précision limitée, il est judicieux de choisir Δt de l'ordre de la minute ou de la seconde. Sur la station d'épuration de Stetten, on a choisi $\Delta t = 5$ minutes. Le gradient est donc une approximation de la pente. Pour le calcul du gradient, le signal brut est moyenné sur une minute et le gradient est calculé à l'aide de la valeur moyenne.

La régulation au moyen de gradients se base sur l'hypothèse qu'à la fin d'un procédé biologique (dénitrification / nitrification), la concentration et donc le signal brut restent constants ou ne varient que très peu. Cela signifie que le signal a une pente d'environ "0" et donc un gradient d'environ "0".

Dénitrification : un gradient de nitrate constant autour de "0" indique qu'il n'y a plus de changement dans la concentration de nitrate. On peut en déduire soit qu'il n'y a plus de nitrate dans le réacteur, soit qu'il n'y a plus de substrat.

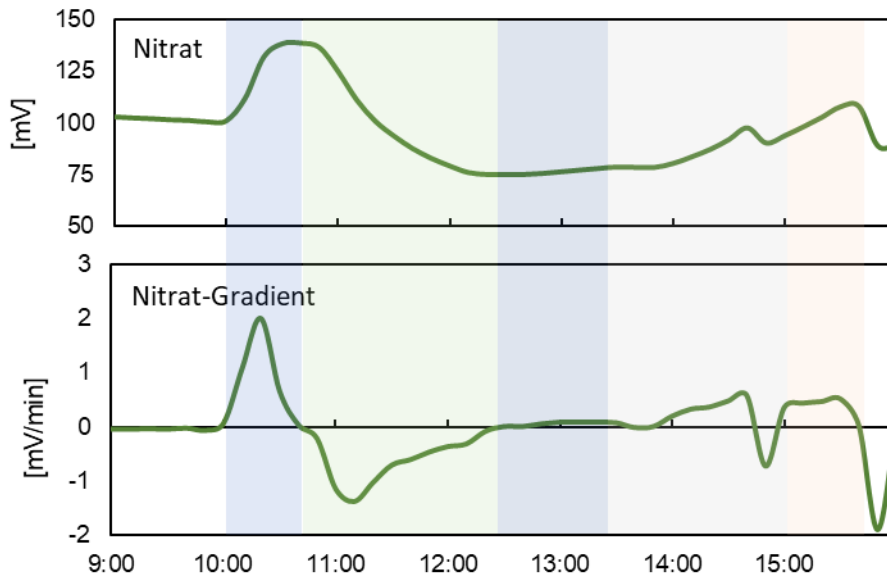


Fig. 7 : Évolution du signal brut et des gradients correspondants pour le nitrate pendant un cycle SBR. Le signal brut de nitrate est inversement proportionnel à la concentration effective de nitrate. Cela signifie qu'une diminution de la concentration effective de nitrates entraîne une augmentation du signal brut.

Nitrification : à la fin du processus de nitrification, la concentration d'ammonium ne change pratiquement plus (concentration très faible et constante). La concentration de nitrates reste également stable (aucun nouveau nitrate n'est formé, car il n'y a plus d'ammonium et aucune dénitrification des nitrates ne peut avoir lieu en raison des conditions aérobies). Les deux gradients sont donc constants à "0". Pour le gradient d'ammonium, la sensibilité des capteurs ISE dans la gamme de concentration basse s'avère être un avantage : en raison de la fonction logarithmique, les changements de concentration dans une gamme de concentration basse entraînent une grande différence dans le signal brut.

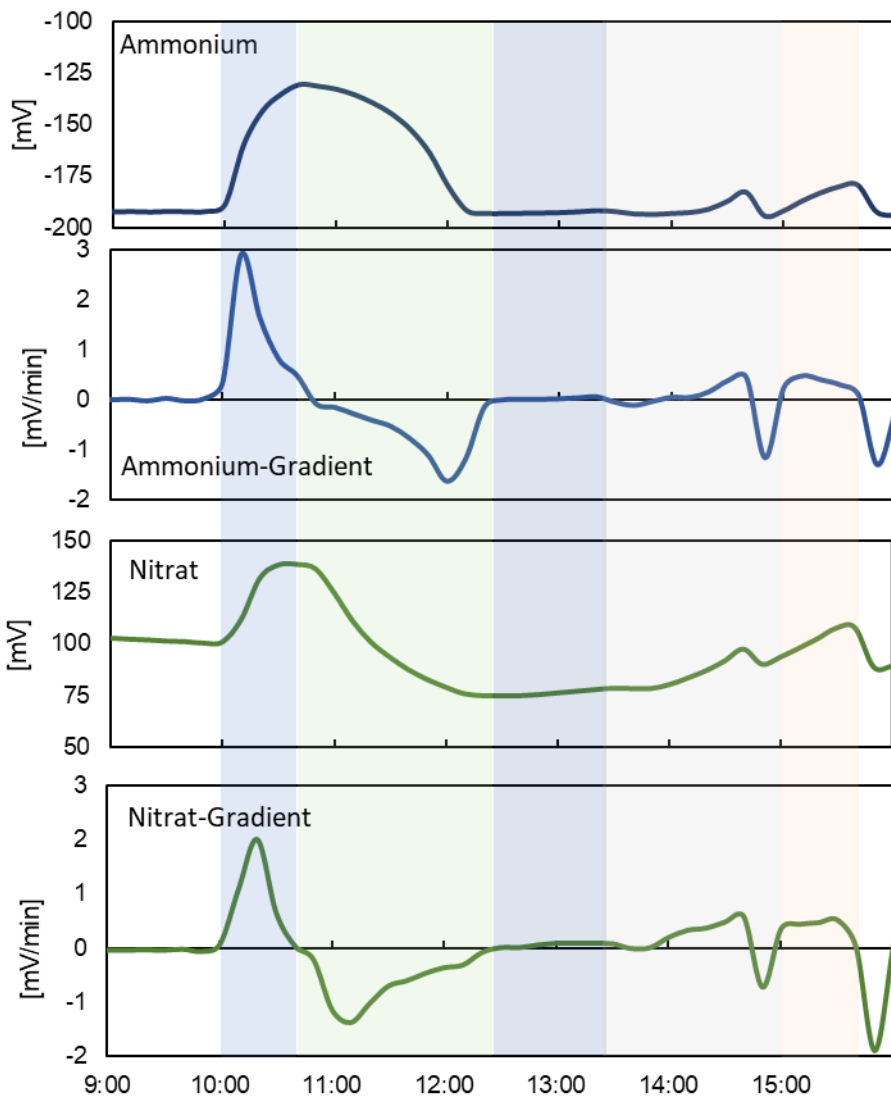


Fig. 8 : Évolution du signal brut pour l'ammonium et le nitrate pendant un cycle SBR. Le signal brut de nitrate est inversement proportionnel à la concentration effective de nitrate. Cela signifie qu'une diminution de la concentration effective de nitrate entraîne une augmentation du signal brut.

Régulation du gradient de la station d'épuration de Stetten

Dans la station d'épuration de la région de Stetten, la régulation du gradient n'est utilisée activement que dans le cycle de temps sec. Le temps de cycle total est de 6 heures. Parmi ce total de 6 heures, 2 heures (sans régulation dynamique) sont nécessaires pour les cycles de sédimentation et d'extraction de l'eau claire. Les 4 heures restantes sont utilisées de manière dynamique pour la dénitrification, la nitrification et la post-dénitrification.

Temps de cycle pour l'étape de régulation "alimentation/mélange"

L'étape "Alimentation/mélange" est active pendant 10 minutes fixes (fig. 9). Ensuite, le régulateur de gradient est actif et dès que, pendant 10 minutes, le gradient de nitrate est $\leq \pm 0,1$ mV, la validation pour l'étape suivante est rendue possible. Le processus "Alimentation/aération" est l'étape suivante. Pour que le temps d'alimentation total ne soit pas raccourci, l'étape "Alimentation/aération" suivante est prolongée du temps raccourci.

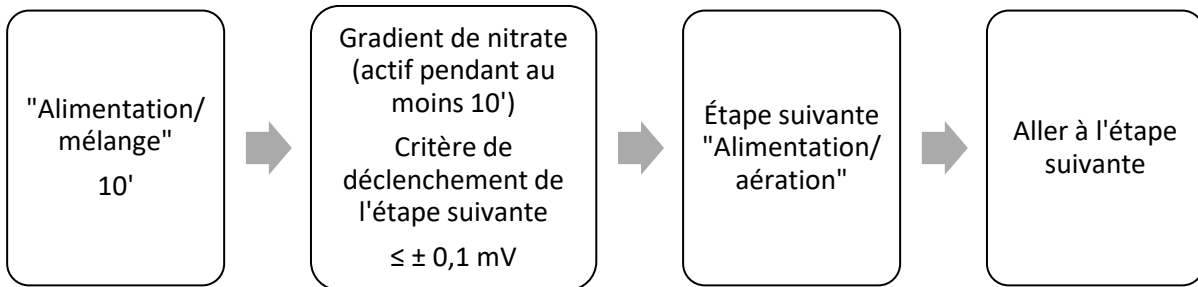


Fig. 9 : Schéma de la régulation du gradient pour le processus "Alimentation/mélange".

Cela signifie que la dénitrification peut être interrompue au plus tôt après 20 minutes. Si le critère d'interruption n'est pas rempli pendant le temps maximal défini, le réacteur SBR passe tout de même à la phase suivante en raison de la commande temporelle. Cela permet d'éviter que la commande ne soit bloquée dans une phase.

Régulation de la nitrification

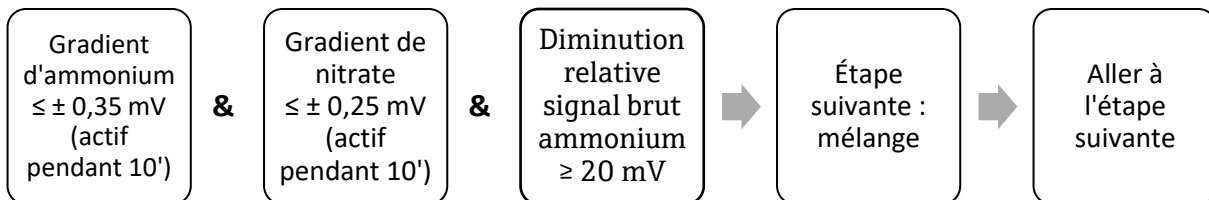


Fig. 10 : Schéma de la régulation du gradient pour le processus de nitrification.

La régulation de la nitrification s'effectue à l'aide du gradient d'ammonium et de nitrate, ainsi que de la diminution du signal brut d'ammonium. Si le gradient d'ammonium est compris dans la gamme $\leq \pm 0,35$ mV pendant 10 minutes, si le gradient de nitrate est compris dans la gamme $\leq \pm 0,25$ mV pendant 10 minutes et si le signal d'ammonium présente une baisse absolue ≥ 20 mV au total pendant le temps où le régulateur de nitrification était actif, l'étape de nitrification est interrompue. Si les trois conditions ne sont pas remplies, le passage à la phase suivante s'effectue au moyen du temps de cycle partiel maximal réglé pour l'étape "Aération". Par rapport au régulateur de dénitrification, plusieurs conditions doivent être remplies dans le cas de la nitrification pour que l'étape SBR puisse être interrompue. Cela permet de ne pas interrompre la nitrification trop tôt et de respecter la valeur de rejet d'ammonium selon l'ordonnance sur la protection des eaux. En outre, les conditions doivent être remplies pendant 10 minutes avant que le régulateur n'envoie le signal d'interruption et ne passe ainsi à l'étape SBR suivante. Le temps économisé dans la nitrification est utilisé pour l'élimination de l'azote, car la durée totale du cycle choisie à la station d'épuration de Stetten ne

devrait pas être raccourcie. Une fois la nitrification terminée vient l'étape du "mélange". Une fois que l'oxygène a été consommé, des conditions anoxiques règnent dans le réacteur. Il se produit alors une post-dénitrification sur les produits de l'hydrolyse. Après la post-dénitrification, l'écoulement tourbillonnaire est brisé par une aération par à-coups afin de garantir une sédimentation aussi efficace que possible.

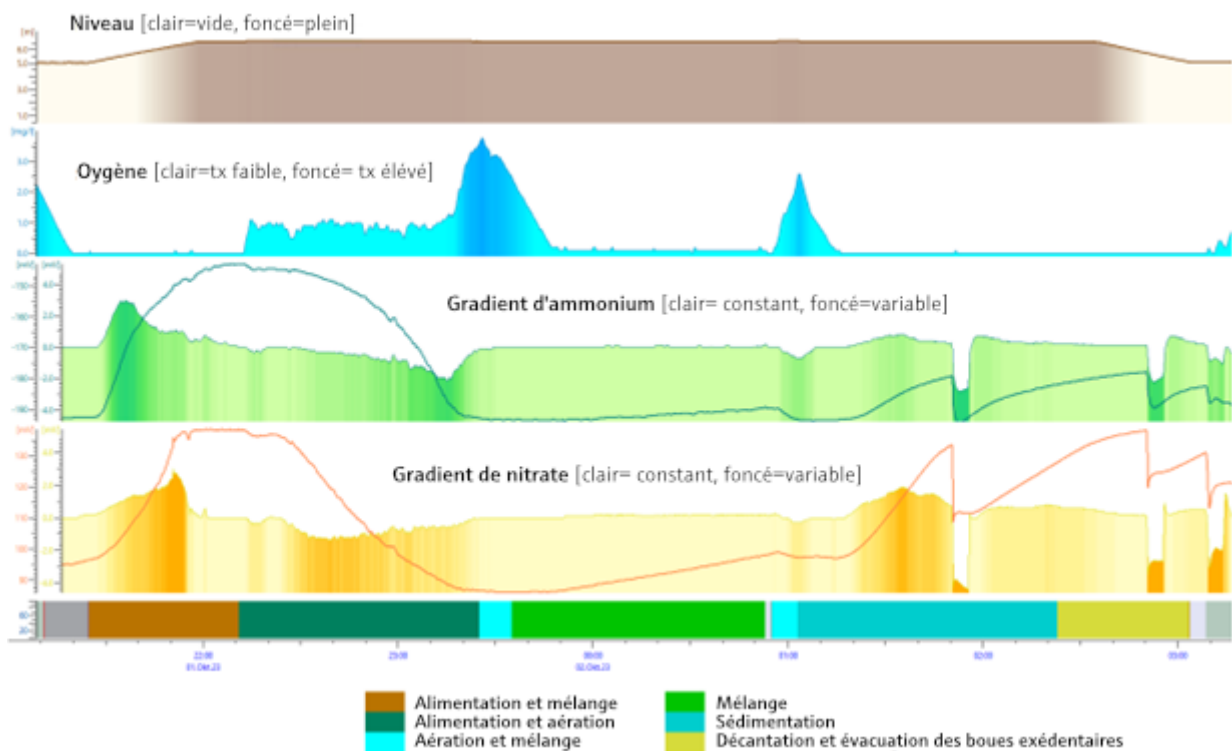


Fig. 11 : Extrait du système de commande de la station d'épuration de la région de Stetten. Les lignes verte et orange indiquent le signal brut du capteur ISE. La surface indique le gradient correspondant. Les lignes rouges indiquent le moment où la régulation du gradient est devenue active et a interrompu prématurément l'étape correspondante.

Avantages de la régulation du gradient via le signal brut

La régulation via le signal brut au lieu de la valeur absolue (valeur déterminée au moyen d'un étalonnage) apporte différents avantages. Comme l'étalonnage est supprimé, la régulation du gradient via le signal brut entraîne une charge de travail nettement moins importante pour l'exploitant de la station d'épuration. De plus, les facteurs perturbateurs tels que le vieillissement, la dérive du capteur et les ions perturbateurs n'entraînent aucune influence négative sur la régulation au moyen du gradient, contrairement à la régulation "classique" via la valeur absolue. De plus, la régulation du gradient via le signal brut permet également de remplacer facilement les sondes, puisqu'il n'est plus nécessaire de procéder à un ajustement de la matrice.

Tab. 1 : Avantages de la régulation du gradient via le signal brut par rapport à la régulation basée sur les valeurs absolues.

	Régulation au moyen de la valeur absolue (étalonnage)	Régulation du gradient via le signal brut
Vieillessement du système de référence ("dérive du capteur")	✗	✓
Vieillessement des cartouches à membrane ("dérive du capteur")	✗	✓
Sensibilité croisée (matrice des eaux usées)	✗	✓
Erreur mesure comparative / étalonnage	✗	✓
Incertitude intervalle d'étalonnage	✗	✓
Défauts sur cartouche à membrane ou sonde	✗	✗
Incertitude durées de vie des cartouches à membrane	✗	✗

Résultats et expériences

Depuis le printemps 2022, la régulation du gradient via le signal brut est active à la station d'épuration de la région de Stetten dans le cycle de temps sec. Cette régulation dynamique du gradient a permis des améliorations significatives dans le fonctionnement :

- 1- Raccourcissement de la nitrification et de la pré-dénitrification : la régulation du gradient a permis de raccourcir les phases aérées de 30 à 90 minutes par cycle, pour un temps de cycle total de 360 minutes. Ce temps économisé est utilisé au profit de la dénitrification, ce qui augmente l'élimination de l'azote.
- 2- Réduction de la charge de travail pour la maintenance : selon Thomas Stenz (exploitant de la station d'épuration), la charge de travail pour la maintenance des sondes s'est nettement réduite. Auparavant, il fallait consacrer environ 2 heures par semaine à l'étalonnage et à la maintenance des capteurs ISE (avec une incertitude considérable quant à la durée nécessaire). Ce temps a été réduit à environ 45 minutes par semaine depuis qu'il est possible de se passer de l'étalonnage.
- 3- Élimination accrue de l'azote et faibles valeurs de rejet : l'élimination totale de l'azote a pu être nettement augmentée grâce à l'optimisation de la régulation. En outre, les valeurs de rejet pour l'ammonium et les nitrites se sont légèrement améliorées et se situent en moyenne à un niveau de concentration très bas (fig. 11 et 12).

La régulation dynamique du gradient a permis d'optimiser le mode de fonctionnement du procédé SBR à la station d'épuration de Stetten, ce qui a conduit à une plus grande efficacité en termes d'élimination de l'azote et à une meilleure surveillance du procédé.

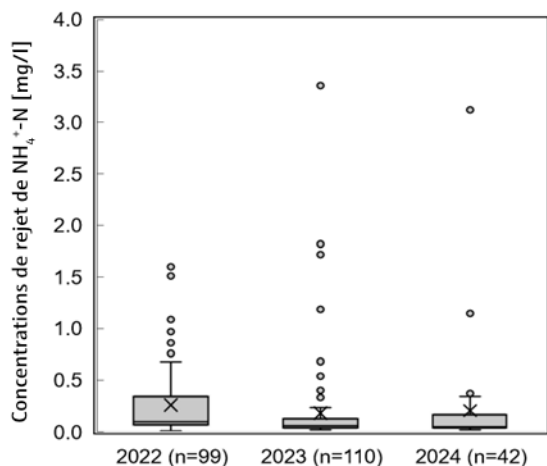


Fig. 12 : Valeurs de rejets d'ammonium pour les années 2022, 2023 et 2024 (janvier-août) avec régulation active du gradient. Les concentrations moyennes de rejet de NH_4^+-N étaient de 0,26 mg/l, 0,18 mg/l et 0,2 mg/l pour chaque année.

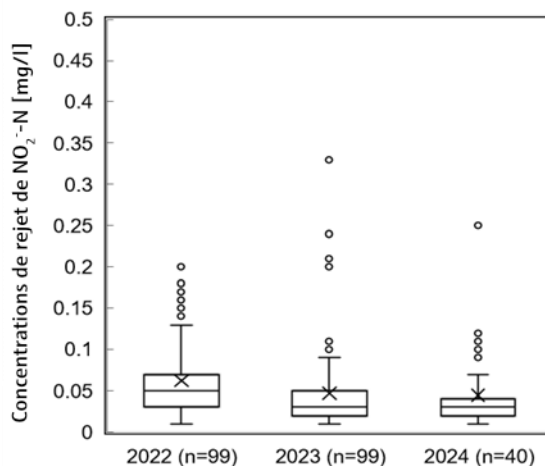


Fig. 13 : Valeurs de rejet des nitrites pour les années 2022, 2023 et 2024 (janvier-août) avec régulation active du gradient. Les concentrations moyennes de rejet de NO_2--N étaient de 0,06 mg/l, 0,05 mg/l et 0,05 mg/l pour chaque année.

Depuis la mise en service de la régulation du gradient, les concentrations de rejet de NH_4^+-N ont été en moyenne comprises entre 0,18 et 0,26 mg/l et les concentrations de rejet de NO_2--N entre 0,05 et 0,06 mg/l (fig. 12 et 13).

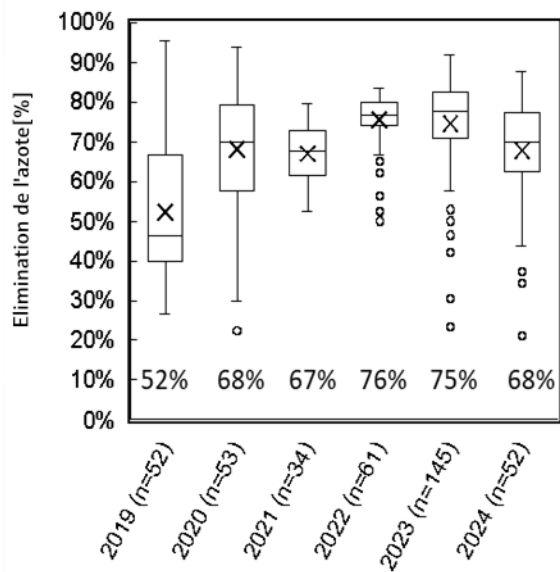


Fig. 14 : Élimination de l'azote pour les années 2019-2024, y compris l'élimination moyenne de l'azote. Les années 2019-2021 montrent l'élimination de l'azote sans fonctionnement optimisé. Depuis 2022, la régulation du gradient est active et l'élimination de l'azote a pu être nettement optimisée.

Entre 2019 et 2024, l'élimination de l'azote en moyenne annuelle a varié assez fortement et se situait entre 52 et 75 % (fig. 14). Depuis que l'élimination de l'azote a été optimisée, il y a moins de fluctuations, avec des valeurs de l'ordre de 75 à 76 % en 2022 et 2023. Pendant les phases sèches en été, on a même observé des éliminations d'azote plus élevées, de l'ordre de 85 à 90 %. Pour l'année 2024 (janvier à août), les éliminations d'azote sont à nouveau légèrement inférieures, ce qui s'explique par les précipitations fréquentes (fig. 15).

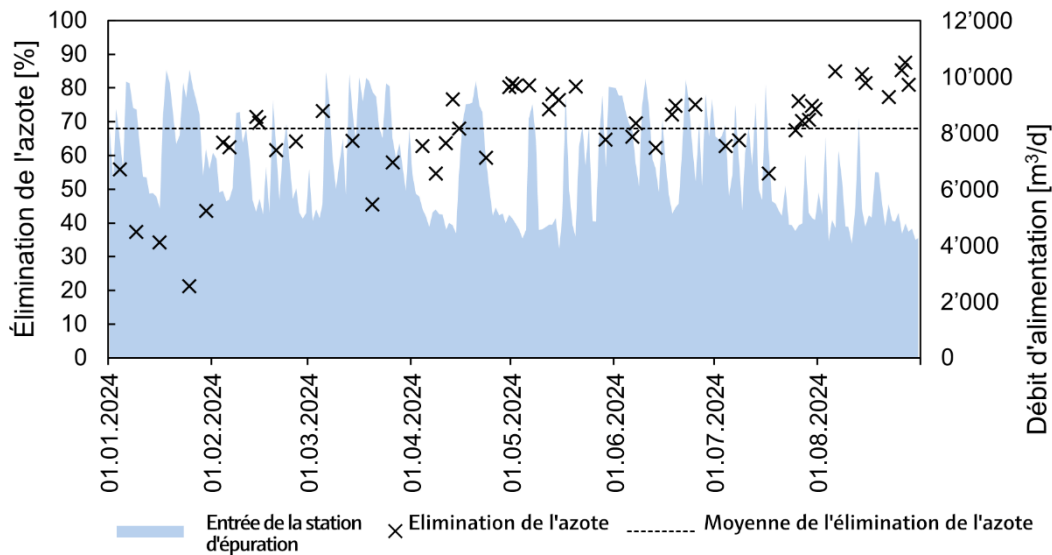


Fig. 15 : Élimination de l'azote par la station d'épuration (entrée brute, sortie y compris les retours internes) et volumes d'entrée pour la période de janvier 2024 à août 2024.

Dans la région de Stetten, l'évacuation des eaux se fait par le biais d'un système d'égout mixte, c'est pourquoi la pluie entraîne pendant plusieurs jours une production d'eaux usées plus importante que dans des conditions sèches. Ces quantités accrues d'eaux usées peuvent nuire à l'efficacité de l'élimination de l'azote. Pendant ces phases, l'élimination de l'azote était comprise entre 20 et 60 %, ce qui a eu un impact négatif sur le bilan annuel de l'élimination de l'azote.

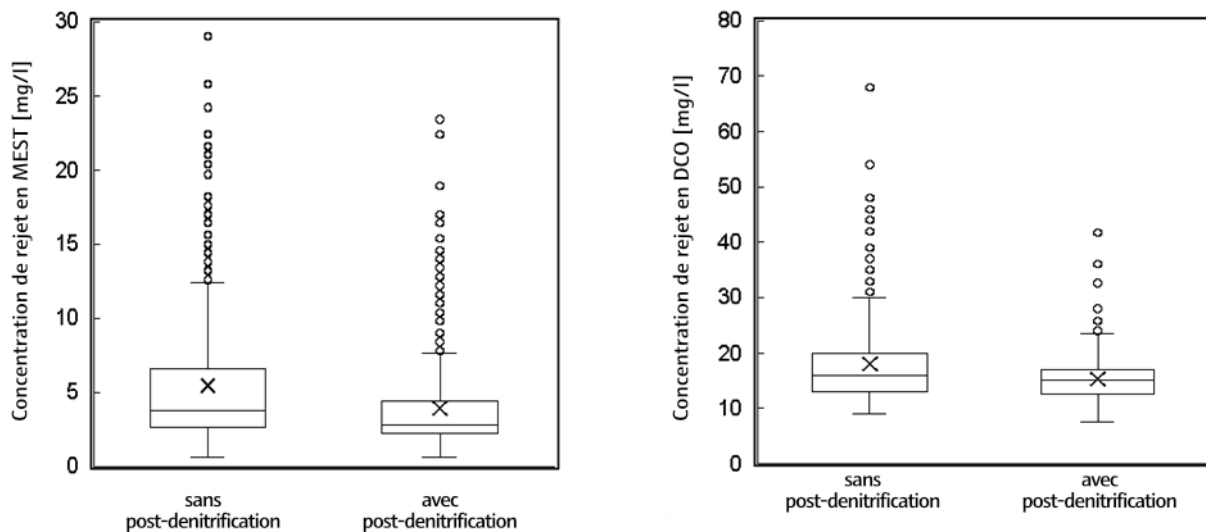


Fig. 16 : Concentration de rejet en MEST et concentration de rejet en DCO pour la période sans post-dénitrification (2019-2021) et avec post-dénitrification (2022-2024).

Comme le montre la fig. 16, la post-dénitrification n'entraîne pas une augmentation de la concentration de rejet en MEST, celle-ci ayant au contraire diminué en moyenne jusqu'à environ 4 mg/l. La même chose a pu être observée pour la concentration de rejet en DCO. La concentration moyenne de DCO à la sortie de la station d'épuration était d'environ 15 mg/l.

Défis

La régulation dynamique permet des temps flexibles pour la nitrification et la dénitrification. Une nitrification rapide diminue la partie aérée de la phase réactive, ce qui réduit l'âge aérobie des boues. C'est pourquoi le procédé SBR doit fonctionner avec un âge de boue suffisamment élevé pour éviter le lessivage des bactéries oxydant les nitrites (BON).

Au cours de l'été 2023, une période de sécheresse prolongée a entraîné un faible débit d'alimentation, ce qui a conduit à des taux d'élimination de l'azote très élevés, de 85 % à 90 %, sur une période prolongée. En raison de la faible concentration résiduelle de nitrates dans le procédé SBR, des conditions anaérobies se sont produites par moments pendant l'alimentation. Cela a favorisé la croissance d'organismes accumulant les phosphates, ce qui a entraîné une élimination biologique du phosphore. En conséquence, le dosage de l'agent précipitant a été réduit, ce qui a probablement entraîné une augmentation de la concentration de sulfure dans le procédé SBR. Cela a favorisé la croissance de *Thiotrix* spp., une bactérie filamenteuse oxydant les sulfures, ce qui a entraîné une augmentation rapide de l'indice de volume des boues à 180 ml/g.^[5] En raison de cette évolution, l'un des trois réacteurs a dû être entièrement vidé et réamorcé.

Conclusion

Dans le cas de la station d'épuration de la région de Stetten, la régulation du gradient a prouvé que la commande SBR utilisant les valeurs brutes d'une électrode sélective d'ions est fiable et robuste. Un avantage essentiel de cette régulation réside dans le fait que des facteurs tels que la dérive, les ions perturbateurs et le vieillissement de la membrane sélective d'ions n'ont aucune influence sur la commande au moyen d'un signal brut, par rapport à la régulation avec des valeurs absolues. De plus, le remplacement des sondes est moins compliqué, car il n'est pas nécessaire d'ajuster la matrice. L'absence d'étalonnage réduit la charge de travail et permet de mieux la planifier.

L'exemple de la station d'épuration de la région de Stetten montre que la régulation du gradient fonctionne de manière fiable et que les critères d'interruption sont suffisamment sensibles pour garantir de faibles valeurs de rejet pour le NH_4^+ , le NO_2^- et le NO_3^- . L'élimination de l'azote a en outre pu être améliorée par une post-dénitrification et une alimentation adaptée. L'utilisation du signal brut pour la régulation du gradient permet une commande SBR dynamique pour les stations d'épuration de taille moyenne et petite, ce qui permet de réduire nettement le temps investi.

Perspective

La régulation du gradient à l'aide du signal brut n'est pas seulement utilisée avec succès dans la station d'épuration de la région de Stetten ; entre-temps, d'autres stations utilisent également le procédé SBR ou prévoient de l'utiliser.

Pour le moment, le régulateur n'est actif que pendant un cycle de temps sec. Une autre application possible serait d'utiliser le régulateur également en période de pluie pour réguler la nitrification et l'arrêter plus tôt, afin de pouvoir épurer davantage d'eaux usées.

Références bibliographiques

- [1] DWA, „Merkblatt DWA-M 210 Belebungsanlagen mit Aufstaubetrieb (SBR),“ DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, 2009.
- [2] N. Stöcklin, R. Steinemann und G. Koch, „ARA Birs: dynamischer SBR-Verfahren,“ Aqua&Gas, Zürich, 2021.
- [3] R. Steinemann und G. Koch, „Dynamische SBR-Regelung,“ Aqua&Gas, pp. 64-72, Juli 2016.
- [4] D. Braun, P. Weber und L. von Känel, „Dynamische Regelung von Abwasserreinigungsanlagen,“ Verband der Schweizer Abwasser und Gewässerschutzfachleute, VSA, Dübendorf, 2019.
- [5] M. Y. Grabovich, N. V. Ravin und R. Boden, „Thiothrix,“ Bergey's annual of Systematics of Archaea and Bacteria, Philadelphia, 2023.