

Figure 9 : Temps d'arrêt journaliers courts : exemples de réglages satisfaisants.

menter un peu le temps total d'aération ; en effet, un tel résultat, qui peut paraître satisfaisant au regard des objectifs précisés plus haut, est instable : une augmentation, même inférieure à 1 g/l, du taux de boues ferait vite remonter cette concentration vers 10 mg/l.

Par contre, si l'on se trouve dans le cas de la figure 10, courbe n° 2, il convient de diminuer le

temps total d'aération, afin d'assurer un traitement économique.

Cette modification, en principe légère, s'accompagnera d'un **enregistrement d'oxygène dissous sur une période de 24 heures** et nécessitera donc, en général, la contribution du SATESE. Le résultat de cette mesure permettra d'affiner les temps de fonctionnement du

En hiver, lorsque la température de l'eau dans la station d'épuration est inférieure à 10 °C, il est exclu que la flore nitrifiante puisse s'établir d'elle-même. Il est alors obligatoire de procéder à l'ensemencement évoqué ci-dessus. En pratique, on peut se fixer le seuil de 12 °C comme limite au-dessous de laquelle il est nécessaire d'ensemencer en flore nitrifiante pour initier la nitrification. Il ne semble pas exister de limite pratique de température dans le cas où une flore nitrifiante est développée (en théorie 4 à 5 °C).

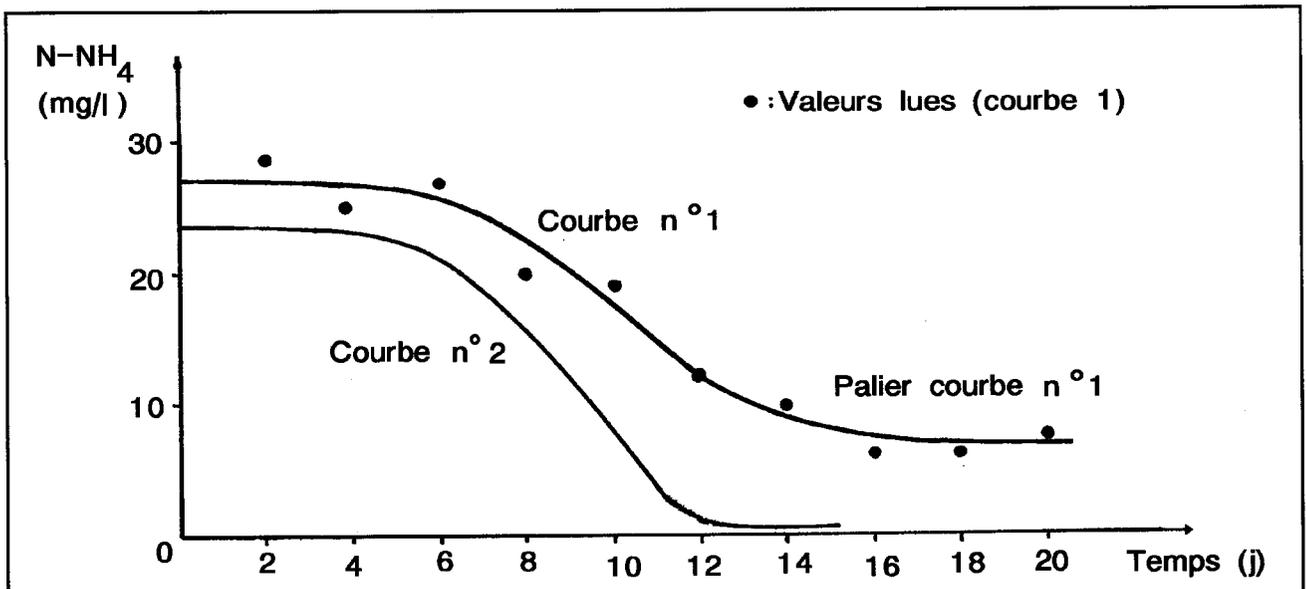


Figure 10 : Démarrage de la nitrification. Évolution des concentrations en azote ammoniacal dans l'effluent épuré.

système d'aération pour obtenir, à la fin des temps de marche des concentrations d'oxygène dissous du même ordre de grandeur tout au long du cycle journalier.

Le suivi par le préposé (tests) des résultats en ammoniacque (en sortie du bassin d'aération) permettra de constater si le réglage "définitif" est acquis. Si ce n'est pas le cas, une retouche légère des réglages doit aboutir aux résultats escomptés (ces légères modifications sont d'autant plus aisées que l'on dispose d'une horloge programmable et que l'on joue sur quelques minutes de durée de tous les temps de marche de l'aérateur).

Les variations journalières des concentrations en ions ammonium et nitriques sont illustrées par la figure n° 11.

Si les variations constatées sont nettement plus accusées, il y a lieu d'analyser si cela provient d'une répartition anormale des temps de marche ou de problèmes de "courts-circuits" évoqués plus haut, et d'y remédier. Une amélioration de la dénitrification peut, dans d'autres cas, être assurée par un décalage de la fourniture d'oxygène par rapport aux arrivées de charge.

Sensibilité du réglage

Le réglage optimal vise donc à obtenir des concentrations résiduelles très faibles en ammoniacque (de l'ordre du mg/l) et en nitrates (< 5 mg/l en sortie du bassin d'aération). Il per-

met une certaine souplesse par rapport à des fluctuations de demande en oxygène (une demande momentanément plus forte peut faire monter la concentration de sortie de $N - NH_4^+$ vers 5, voire 8 mg/l).

Les expérimentations réalisées sur sites réels ont permis de situer les tolérances du réglage à besoins constants en oxygène. La figure 12 montre l'amplitude possible dans les cas les plus difficiles que nous ayons rencontrés.

Dans ce graphique, l'optimum est fixé au centre de segment mM de manière à obtenir la qualité de traitement et la fiabilité maximum. L'optimum est rapproché du point m (à la valeur $m + 10\%$) pour assurer le traitement fiable le plus économique possible lorsque la plage de réglage satisfaisant est plus étendue (figures 13 et 17).

Cette sensibilité peut être minimisée par des aménagements déjà évoqués et, notamment, par l'installation d'un système d'agitation dans le bassin d'aération qui améliorant la dénitrification permet d'accroître la tolérance autour du temps de marche (augmentation des valeurs de M et donc de O_{pt}). La logique voudrait que l'on dépasse alors nettement 10% de possibilités de variations de part et d'autre de l'optimum ; on pourra alors choisir d'assurer le traitement fiable le plus économique possible en se calant sur le réglage $m + 10\%$.

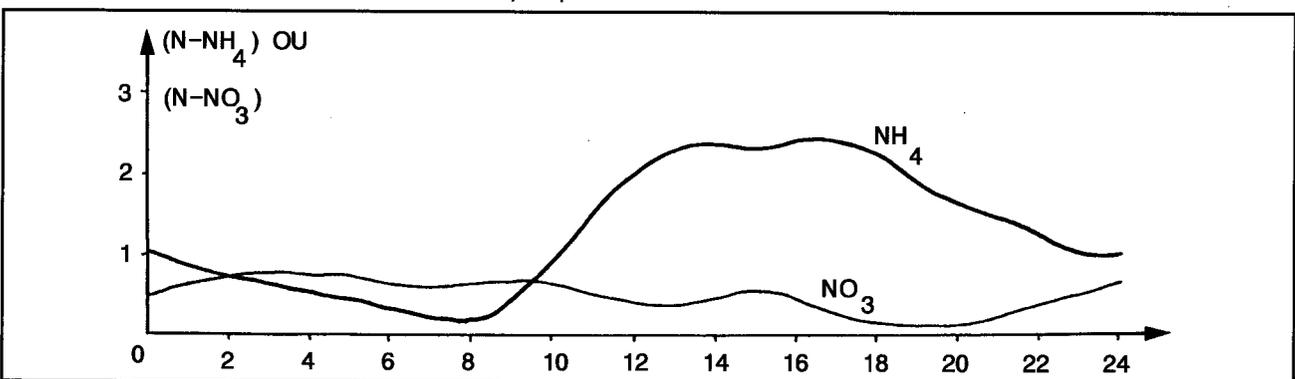


Figure 11 : Variations normales des concentrations résiduelles.

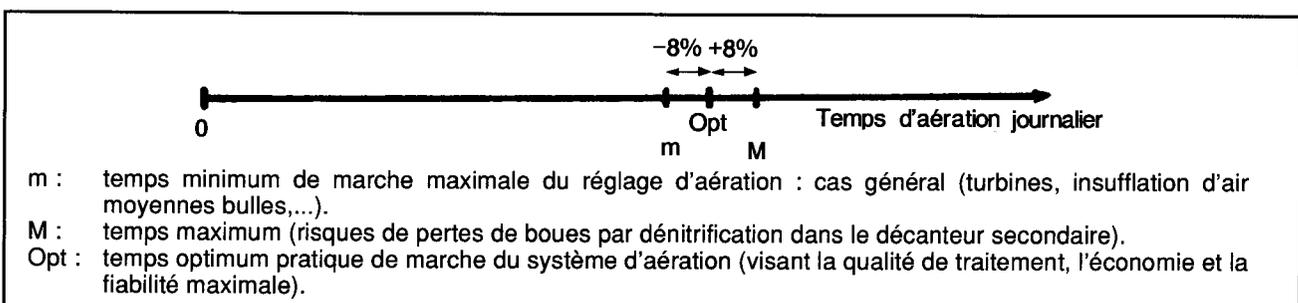


Figure 12 : Sensibilité maximale du réglage d'aération : cas général (turbines, insufflation d'air moyennes bulles,...)

Nécessité d'un suivi du réglage

Le réglage permettant une très bonne élimination de l'azote sans risque de remontées de boues sur le décanteur étant assez précis, les modifications affectant la demande en oxygène doivent être compensées par des modifications de réglage.

Cependant, à condition d'effectuer régulièrement, et par quantités raisonnables, les extractions de boues en excès, la variation de demande d'oxygène due à l'augmentation de la concentration des boues n'oblige pas à procéder à des modifications de réglage d'aération (cf. plus loin).

A l'inverse, les variations de charge à traiter (nouveaux raccordements, ...) et les variations de demande en oxygène en fonction de la température déplacent l'optimum de temps de marche total des aérateurs.

Ces variations et la précision nécessaire du réglage demandent un suivi de l'azote nitrique dans le bassin d'aération et de l'azote ammoniacal en sortie de station pour, le cas échéant, modifier le réglage suffisamment tôt.

Sur des stations recevant des effluents uniquement domestiques, il semble que le nombre de modifications du réglage d'aération nécessaires en un an soit faible (de l'ordre de quatre) et lié aux vacances estivales et aux changements importants de température de l'eau dans la station.¹²

Réglage de la recirculation

Si le réglage d'aération est correct, il n'y a pas lieu d'adopter des réglages spécifiques de la recirculation du fait de l'élimination d'azote.

Un taux de recirculation de 100 à 150 % du débit journalier convient pour des débits reçus

importants par rapport à la capacité nominale hydraulique. Ce taux peut même être moindre si le facteur de concentration (= concentration des boues recirculées/concentration des boues du bassin d'aération) est élevé (de l'ordre de 2,5 à 3). En réseau unitaire, on veillera cependant à fixer des taux de recirculation relativement élevés (150 à 200 % du débit moyen de temps sec) afin de réduire les risques de pertes de boues lors des apports hydrauliques supplémentaires liés aux pluies.

Lorsque les installations reçoivent un débit très faible, comparé au débit nominal du projet, le taux de recirculation est assez normalement de l'ordre de 300 à 400 %.

La répartition des périodes de recirculation peut rester indépendante des autres cycles journaliers et donc être commandée par un doseur cyclique. Toutefois, il paraît plus sûr de moduler grossièrement les temps de fonctionnement proportionnellement aux variations de débits reçus par la station, modulation qui tend à rendre constante la masse de boues présente dans le décanteur secondaire). On veillera néanmoins, dans ce schéma, à renforcer la recirculation du début de nuit afin que les temps de séjour des boues ne soient pas trop importants durant cette période de faible alimentation où la masse de boues accumulées au cours de la journée peut encore être forte.

D'autre part, une amélioration notable de la dénitrification peut être procurée en faisant coïncider les périodes de recirculation avec les périodes d'arrêt du dispositif d'aération.

Il est donc globalement souhaitable d'assurer la recirculation à l'aide d'une horloge à plots (les plots d'1/4 d'heure permettent toute la souplesse désirée).

Suivi des résultats

Le responsable de l'exploitation doit contrôler les concentrations résiduelles en N - NH₄⁺ et N - NO₃⁻. Là encore, l'utilisation des bandelettes - test est le moyen recommandable.

Ces tests doivent être pratiqués deux fois par semaine, à heure fixe.

S'il y a dérive notable du système il est conseillé de ne pas retoucher le réglage immédiatement mais de suivre l'évolution de la tendance le lendemain en recommençant les tests.

Les valeurs commandant l'intervention sur le réglage pourront être de :

10 mg/l en azote ammoniacal en sortie : augmentation du temps total d'aération de 3 à 5 %

20 mg/l¹² en nitrates en sortie de bassin d'aération : diminution du temps d'aération de 3 % environ.

12. 10 mg/l en NH₄ (les réponses des bandelettes sont exprimées en ions), 20 mg/l en NO₃, = 5 mg/l en N - NO₃.

Influence de la température

La température joue sur l'équilibre demande en oxygène - fourniture d'oxygène dissous, de deux manières. Lorsque la température décroît, il y a :

- augmentation de la fourniture d'oxygène. Dans la fourchette usuelle de température des boues des bassins d'aération, l'effet peut être globalement de l'ordre de 3 %.
- diminution de la respiration des boues. Alors que les performances des stations ne sont pas affectées tant sur la dégradation de la matière organique ("carbone") que sur l'oxydation de l'azote (les vitesses de réaction décroissent mais le temps de séjour est suffisant pour qu'elles tendent à être complètes), la consommation d'oxygène due au métabolisme des boues et, en particulier, à l'endogenèse est diminuée. L'ordre de grandeur que nous avons pu établir est de 10 % quand on passe de 18 à 7 °C.

Compte tenu de la part variable de l'endogenèse dans la consommation total d'oxygène en fonction de la charge massique, cette variation a une incidence de 3 à 5 % à la baisse sur cette demande en oxygène total.

Au total des deux phénomènes en jeu, les différences de température été-hiver conduisent à des variations de 6 à 8 % qui nécessitent des retouches du réglage d'aération compte tenu de la sensibilité de celui-ci.

Concentration des boues dans la station

Taux de boues

La concentration des boues doit correspondre à un âge de boues suffisant et donc respecter la charge organique de l'aération prolongée ($\leq 0,1$ kg de DBO/kg MVS.j). Il est donc possible d'abaisser le taux de boues, par souci d'économie et de sécurité au niveau du décanteur secondaire, en fonction de la charge organique réelle de la station d'épuration. Une concentration de 3,5 g/l de MES représente le minimum à conserver pour ne pas compromettre l'ensemble du traitement.

Variation tolérable

Nous constatons (annexe 1) que l'autooxydation (endogenèse) des boues représente le tiers de la demande totale en oxygène en aération prolongée, à la charge nominale, et plus si la charge massique est plus faible : à une charge couramment rencontrée de 0,05 kg DBO/kg MVS.j cette part constitue la moitié de la demande totale.

En admettant que la demande de l'endogenèse soit sensiblement proportionnelle à la masse de boues présente, et connaissant la sensibilité du réglage optimum pour la meilleure élimination de l'azote, on en tire facilement la fourchette de taux de boues dans laquelle il faut se maintenir **si l'on ne désire pas avoir à rec-**

tifier le réglage d'aération en fonction du taux de boues. L'ampleur de telles rectifications est illustrée indirectement par le tableau ci-dessous.

Incidence d'une variation de concentration des boues de 1 g/l dans le bassin d'aération sur la demande totale en oxygène.

Concentration initiale des boues dans le bassin d'aération	$C_m = 0,1$	$C_m = 0,05$	$C_m = 0,03$
5 g/l	8 %	12 %	13,5 %
4 g/l	9 %	13 %	15 %

La sensibilité des systèmes **les plus délicats**, environ 15 % au total, (pourcentage dans lequel il faut prendre en compte les effets des variations de charges reçues) fixe les conditions d'extraction des boues. **En conditions favorables** (partie sur fond bleu du tableau), **on ne doit pas laisser monter le taux de boues de plus de 1 g/l** : il faut donc procéder à l'extraction environ une fois par semaine. Dans les conditions les moins favorables des extractions de masses de boues réduites doivent être effectuées, abaissant par exemple la concentration dans le bassin d'aération de 0,6 g/l de MES (soit chaque semaine ou toutes les deux semaines dans les cas considérés). Mieux encore, dans tous les cas, il est préférable de

disposer d'installations (concentrateurs et silos - cf. document FNDAE N°9) permettant une extraction automatisée pratiquée quotidiennement¹³.

3.2.2. Cas de chenaux

La bonne adaptation de chenaux à l'élimination de l'azote est une idée répandue depuis longtemps. Il est pourtant difficile de mettre en évidence, surtout sur de petits chenaux d'aération, la simultanéité des phénomènes de nitrification et de dénitrification évoquée comme cause de cette qualité particulière. Sauf exception, (coïncidence des demandes en oxygène et des apports d'oxygène), il n'y a pas de zone anoxique en amont du dispositif d'aération (brosse ou turbine en montage carrousel) et en tout cas pas de conditions propices à une dénitrification active (phase C de la figure n° 5). Tout au plus peut-on déceler une stratification verticale pendant quelques minutes après le démarrage de l'aérateur séparant une zone supérieure où la nitrification est possible et une zone inférieure où la dénitrification peut être active.

En tout état de cause, l'expérience montre qu'il y a une différence entre les chenaux et les bassins en mélange intégral visés au cas général.

Celle-ci réside effectivement dans une sensibilité moins grande du réglage par amélioration de la dénitrification.

Le graphe suivant, construit de manière analogue à la figure 12, le met en lumière.

La figure 13 se rapporte aux conditions dans lesquelles, comme pour le graphique n° 12, nous avons constaté les sensibilités les plus contraignantes aux variations de la demande en oxygène totale dans le chenal d'aération.

Il est très vraisemblable que cette aptitude particulière des chenaux à l'élimination de l'azote tienne, au moins pour partie, au brassage qui se maintient plus longtemps que dans les autres types de bassins d'aération.

Cette souplesse plus grande autour du réglage optimum du temps total d'aération conduit à nuancer les commentaires présentés pour le cas général :

— Le risque de fixer un réglage technique satisfaisant, mais dispendieux en énergie, est plus élevé. Cela conduit à adopter une approche à la baisse des temps de fonctionnement lors de l'établissement des "réglages définitifs".

— Les contraintes pesant sur les extractions de boues sont moins accentuées ; il importe, toutefois, de respecter des augmentations maximales de 1 g/l de la concentration des boues dans le bassin d'aération, notamment pour éviter des à-coups de charge préjudiciables à l'ensemble du traitement.

— Cette souplesse n'évite pas non plus qu'il **faille faire fonctionner les aérateurs de façon synchrone** lorsque l'installation en comporte plusieurs, comme d'ailleurs dans le cas général, de manière à obtenir des temps suffisamment longs de dénitrification intense.

Une amélioration de la dénitrification peut, d'autre part, être obtenue en disposant les arrivées d'eaux prétraitées et de la recirculation des boues en aval du dispositif d'aération, (mais aussi en aval du départ de la liqueur aérée vers le décanteur secondaire pour éviter les courts-circuits d'eaux non traitées). Cette disposition permet d'améliorer la vitesse de décroissance de la concentration d'oxygène dissous immédiatement après l'arrêt de l'aérateur.

3.2.3. Cas de l'insufflation d'air fines bulles

Les installations d'insufflation d'air à fines bulles comportent des dispositifs de diffusion céramique qui se colmatent rapidement s'ils ne sont pas alimentés en air de façon continue.

Deux régimes au moins d'alimentation en air sont donc prévus dans ces cas, dont l'un est caractérisé par un débit d'air faible et fonctionne en continu.

Les stations à insufflation d'air sont susceptibles de nitrifier, au même titre que les autres, voire mieux, du fait de temps plus longs à teneurs positives en oxygène. Par contre, les conditions d'une dénitrification intense dépendent du rapport de la capacité d'oxygénation (à débit d'air faible) à la charge reçue. A chaque période de la journée [où ce rapport est donc

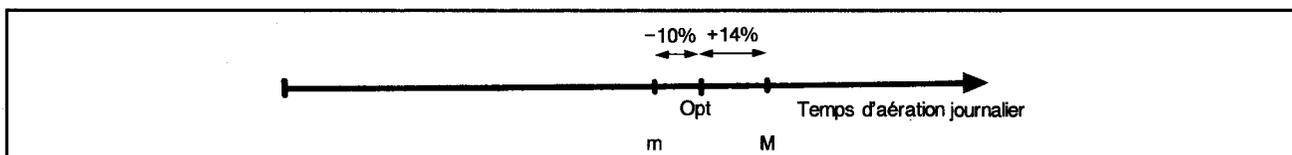


Figure 13 : Sensibilité du réglage d'aération. Cas des chenaux.

13. Cette technique très répandue dans de nombreux pays européens tarde à se développer en France, notamment parce que les équipements et les débouchés des boues ont été jusqu'ici trop souvent négligés.

supérieur à 1], où la concentration d'oxygène dissous est supérieure à 0, la dénitrification ne peut s'opérer correctement. Il en résulte alors des remontées de boues à la surface du décanteur secondaire.

Une élimination d'azote fiable dans toutes les conditions de charge ne peut donc être sérieusement envisagée sur les stations d'épuration équipées d'insufflation d'air fines bulles de ce type qu'à la condition de leur adjoindre un bassin d'anoxie (cf. chapitre IV).

Par contre, les installations d'insufflation d'air en fines bulles équipées de diffuseurs à membranes synthétiques pour lesquels l'alimentation en air peut être stoppée sans risque de colmatage sont capables d'assurer une nitrification et une dénitrification poussée des effluents en l'absence d'un bassin d'anoxie en tête.

3.2.4. Cas des stations d'épuration très sous-chargées

La valeur du taux de charge délimitant ce cas est fonction de l'apport horaire d'oxygène et de la masse de boues présente dans le système. Elle se situerait toujours à **moins de 20 %** de la charge organique nominale. La durée totale d'aération est alors fixée par les besoins de brassage, en principe à 1/4 d'heure de marche pour 2 heures d'arrêt, et il n'est pas évident d'obtenir les conditions d'anoxie favorables à la dénitrification. Des remontées, voire des pertes, de boues liées à la dénitrification dans le décanteur se produisent.

Dans ce cas, il conviendra d'éviter les conditions anaérobies dans le décanteur en augmentant le taux de recirculation¹⁴ pour laisser le décanteur secondaire vide de boues. Si cette mesure est insuffisante, on diminuera les temps d'arrêt du système d'aération de manière à alimenter le décanteur avec des boues suffisamment oxygénées. Cette solution très onéreuse (risquant d'aboutir à des consommations spécifiques de l'ordre de 8 à 10 kWh/kg DBO éliminé) est bien sûr transitoire. Si la situation de sous-charge devait être persistante, une autre solution consisterait à installer un agitateur dans le bassin d'aération pour optimiser la dénitrification et, ainsi, se ramener au principe de réglage du cas normal.

14. Par rapport à de faibles débits reçus, ce taux peut être très élevé (des valeurs de 700 % par exemple se rencontrent fréquemment lorsque le taux de raccordement est faible). Il convient, toutefois, de ne pas dépasser des limites de perturbations hydrauliques propres à chaque installation. Une vérification des niveaux du voile de boues du décanteur secondaire à heure fixe après modification des réglages permet de fixer l'optimum.

15. L'évocation d'eaux brutes d'origine industrielle, non concernées par le présent ouvrage, donne l'occasion de préciser qu'il faudrait modifier un certain nombre de raisonnements et ratios établis ici. Pour ces derniers, on peut mentionner : la facilité d'obtention d'une ammonification complète, la part d'élimination en rapport avec l'assimilation, les teneurs en N_{kj} fixées en objectif, etc.

3.2.5. Asservissements à l'oxygène dissous ou au potentiel d'oxydo-réaction

3.2.5.1. Cas dans lesquels l'asservissement est souhaitable

Sur de petites stations d'épuration, la raison principale motivant la mise en place d'un asservissement des temps d'aération à un paramètre mesuré est l'existence de variations de charges reçues.

En matière d'élimination de l'azote, l'expérience montre que des variations n'affectant qu'une journée ont des conséquences assez modérées. Du fait des temps de séjour de l'eau supérieurs à la journée en aération prolongée les qualités de l'effluent épuré se modifient lentement (dilution des eaux les moins bien traitées par celles déjà présentes et celles produites après l'incident).

Ainsi des rejets dominicaux différents (et même très différents dans le cas de panne du système de relèvement !) n'ont pas d'incidence durable sur l'élimination d'azote et ne font pas sortir des normes que l'on peut se fixer ou se voir fixer (par exemple $N - NH_4^+ < 10 \text{ mg/l}$...).

Lorsque les variations sont plus intenses, et surtout concernant des périodes plus longues (tourisme, vacances scolaires de C.E.S. dans les petits bourgs, activités industrielles¹⁵, ...), il est trop difficile de faire suivre au réglage manuel les évolutions de la charge à traiter. Il est alors envisageable de passer à un asservissement à un paramètre lié à la charge à traiter.

Asservissement à l'oxygène dissous

Ce type d'asservissement est classique sur des stations de capacité supérieure à celles dont nous traitons ici. Il est, depuis quelques années, techniquement compatible avec de petites installations du fait des améliorations apportées aux capteurs :

- vérifications d'étalonnage moins fréquentes (1 fois/semaine)
- systèmes "auto-nettoyants" efficaces
- facilité de changement de membrane
- étalonnage à 0 simplifié et tables d'étalonnage intégrées, ...

— Valeurs maximales différentes selon qu'il y a ou non nitrification.

— Réponses significatives lorsque la concentration d'oxygène est très faible ou nulle.

— Décrochements des valeurs lorsque la dénitrification commence et s'arrête.

Ces caractéristiques sont tout à fait prometteuses pour la régulation des phénomènes de nitrification-dénitrification.

Pour des électrodes de platine soumises périodiquement (1 à 2 fois par semaine) à un

polissage mécanique, les valeurs de consigne haute et basse permettant l'optimisation de l'élimination de l'azote sont voisines de 400 et 150 mV / Electrode Hydrogène Normale. Ces valeurs sont à affiner au cas par cas et des temporisations fixant des temps minimum et maximum de fonctionnement et d'arrêt des aérateurs doivent être associés à ce type de régulation.

C'est à l'évidence une opération réalisable de préférence sur un nombre limité de stations d'épuration de fortes capacités.

Les boues activées en aération prolongée avec bassin d'anoxie

4

Nous avons vu au chapitre précédent que l'on peut concilier avec efficacité les conditions contradictoires favorables aux processus de nitrification et de dénitrification grâce à des phases successives de fonctionnement imposées à des stations d'épuration en boues activées en aération prolongée non prévues, à l'origine, pour assurer l'élimination de l'azote.

L'idée de séparer les deux phénomènes dans **des bassins différents** afin de mieux maîtriser chacun d'entre eux a, bien sûr, été explorée depuis longtemps. Après des tâtonnements aboutissant à des installations à plusieurs étages, compliquées (Afrique du Sud, ...), la disposition la plus pertinente s'est dégagée (notamment en France). Il s'agit de la technique du bassin d'anoxie placé en amont du bassin d'aération.

— L'intérêt de ce type de station d'épuration à zone d'anoxie en tête, comparé aux stations à bassin unique, réside en deux points :

- l'obtention de conditions assurant une dénitrification plus intense en moyenne,
- un gain de souplesse afférant aux réglages du bassin d'aération : l'aération peut être supérieure à l'optimum défini au chapitre III sans que la concentration résiduelle de nitrates soit suffisamment importante pour générer des remontées de boues sur le décanteur secondaire par dénitrification.

4.1. Conception des stations à bassin d'anoxie

4.1.1. Conception générale

— Le **bassin d'anoxie**, dont le but est d'assurer la dénitrification, doit favoriser la mise en contact des nitrates avec la microflore dénitrifiante dans les conditions, vues au chapitre I, à savoir, essentiellement : absence d'oxygène dissous et carbone organique disponible abondant (fig. 14).

Ces conditions sont réunies, dans le bassin d'anoxie, du fait de :

- l'arrivée des **eaux brutes prétraitées** fournissant le carbone organique et contribuant à abaisser rapidement le niveau d'oxydo-réduction (et en premier lieu à éliminer l'oxygène introduit par d'autres apports).
- La **recirculation de la liqueur aérée** apportant les nitrates à éliminer (formés dans le bassin d'aération), que nous conviendrons de nommer désormais "circulation des nitrates".
- l'arrivée de la **recirculation des boues** amenant la flore dénitrifiante privée d'oxygène après son séjour dans le décanteur secondaire et, éventuellement, un peu de nitrates résiduels.

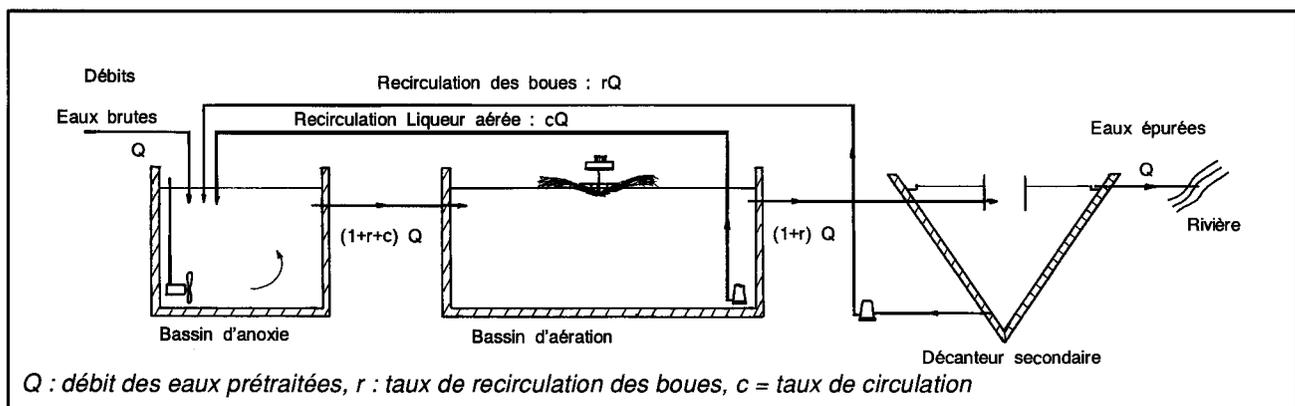


Figure 14 : Schéma de principe des boues activées avec bassin d'anoxie et débits en chaque point.

- un dispositif de brassage permettant une bonne mise en contact des divers éléments.

— **Le bassin d'aération** est, en principe, essentiellement chargé d'assurer le traitement de la charge organique et l'oxydation de l'azote.

— **Le décanteur secondaire** est conçu traditionnellement normalement¹, tout au plus faut-il veiller, comme dans tout cas de figure où l'élimination de l'azote est visée, à ce qu'il permette une minimisation du temps de séjour des boues.

4.1.2. Recirculation des boues

En conditions normales de fonctionnement, le débit de recirculation n'a pas à être différent du débit classique utilisé : 100 à 200 % du débit

des eaux brutes selon les charges hydrauliques reçues si elles ne sont pas faibles au regard de la capacité hydraulique nominale.

Si une dénitrification gênante intervient, il faut pouvoir diminuer le temps de séjour des boues. La recirculation de 100 % du débit de pointe (= 300 % du débit moyen) est, la plupart du temps, suffisante dans ce cas.

Le poste de recirculation sera donc classiquement équipé de deux pompes (pour assurer le secours et le fonctionnement non continu² d'un débit égal au débit de pointe des eaux brutes. Il serait judicieux de prévoir trois pompes dont une, au moins, de débit inférieur (actuellement, cet investissement supplémentaire ne semble pas économiquement réaliste).

Relation entre le taux de recirculation et l'objectif de nitrates résiduels

- Rendement de dénitrification à l'entrée sur le décanteur

$$\frac{\frac{N \cdot \text{NO}_3^- \text{ max}}{1+r} - N - \text{NO}_3^-}{N - \text{NO}_3^- \text{ max}} = \frac{c}{c+r+1}$$

avec :

$N - \text{NO}_3^- \text{ max}$: concentration de nitrates obtenue s'il n'y a pas de dénitrification

$\frac{N - \text{NO}_3^- \text{ max}}{1+r}$: concentration de nitrates produite dans les mêmes conditions après dilution par le débit de recirculation dont la teneur en nitrates s'est annulée après passage dans le bassin d'anoxie

$N - \text{NO}_3^-$: concentration résiduelle en nitrates

- et rendement global de dénitrification :

$$\frac{N - \text{NO}_3^- \text{ max} - N - \text{NO}_3^-}{N \cdot \text{NO}_3^- \text{ max}} = \frac{c+r}{c+r+1}$$

puisque :

— la quantité de $N - \text{NO}_3^-$ éliminée au bassin d'anoxie est $(N - \text{NO}_3^-)_0 (cQ + rQ)$

— la quantité de $N - \text{NO}_3^-$ formée est égale à la quantité éliminée augmentée des nitrates sortant avec l'effluent épuré, soit $N - \text{NO}_3^- (Q + cQ + rQ)$

Ces deux relations sont équivalentes et donnent comme résultat :

$$c = \frac{N - \text{NO}_3^- \text{ max}}{N - \text{NO}_3^-} - (1+r)$$

1. Compte tenu des débits réellement reçus par la station d'épuration, il y a lieu, dans tous les cas d'aération prolongée, d'augmenter la sécurité hydraulique des stations d'épuration en réduisant la "norme" ancienne de 0,8 m/h de vitesse ascensionnelle (sur le débit de pointe) à des valeurs de 0,65 ou 0,7 m/h qui permettent, pour des concentrations de boues de 6 g/l de ne pas poser de problème jusqu'à des indices de boues de 125 ml/g.
2. Le fonctionnement continu des pompes de recirculation accroît très fortement les risques de colmatage partiel (chute des débits). En régime continu, il est souhaitable d'alterner les pompes toutes les 1/2 h.

4.1.3. Circulation des nitrates

Le principe de ramener, par cette circulation, vers le bassin d'anoxie les nitrates du bassin d'aération, est illustré à la figure n° 14.

En réalisant un bilan de masse avec comme **hypothèses** qu'aucune dénitrification ne se produit dans le bassin d'aération ni dans le décanteur secondaire (hypothèse simplificatrice) et que les **eaux entrant au bassin d'anoxie en ressortent totalement dénitrifiées**, il vient :

$$c = \frac{N - \text{NO}_3 \text{ max}}{N - \text{NO}_3} (1 + r)$$

C : taux de circulation des nitrates
r : taux de recirculation

En pratique, un taux de recirculation de 150 % du débit moyen journalier est observé et on visera, à l'entrée du décanteur secondaire, une concentration ($N - \text{NO}_3$) de 3 mg/l³ au maximum d'où :

$$c = \frac{N - \text{NO}_3 \text{ max}}{3} - 2,5$$

A partir de ce schéma, il est possible de conclure que des taux de circulation croissants améliorent le rendement de dénitrification. Cependant, pour des raisons économiques, mais surtout techniques (obtention de conditions anoxiques et de rapports C/N suffisants

dans le bassin d'anoxie), il est souhaitable de **limiter le taux de circulation des nitrates (ou de recirculation de la liqueur aérée) à 400 % du débit moyen** (fig. 15).

Ce taux de 400 % permet d'assurer le bon fonctionnement des installations pour des concentrations de nitrates obtenues sans dénitrification ($N - \text{NO}_3$ max) de 20 mg/l. Sur effluents domestiques non dilués, la concentration maximale (= N_{KJ} des eaux brutes - N assimilé - N "inévitablement" éliminé) est de l'ordre de 50 mg/l.

Il apparaît donc **nécessaire de procéder à une dénitrification partielle dans le bassin d'aération**. Cette obligation va, d'ailleurs, dans le sens d'une économie d'énergie et de l'obtention plus facile des conditions d'anoxie dans le bassin d'anoxie.

La recirculation de la liqueur mixte doit être réglable, son débit doit pouvoir être vérifié.

A cet effet, elle sera assurée par pompes. Trois pompes de débit double du débit moyen horaire sont souhaitables pour faire face aux diverses situations rencontrées (charge hydraulique effective et variations journalières). Elles seront programmables par horloges à plots et éventuellement asservies.

Les tuyaux des pompes plongeant de préférence dans le liquide du bassin d'anoxie, les

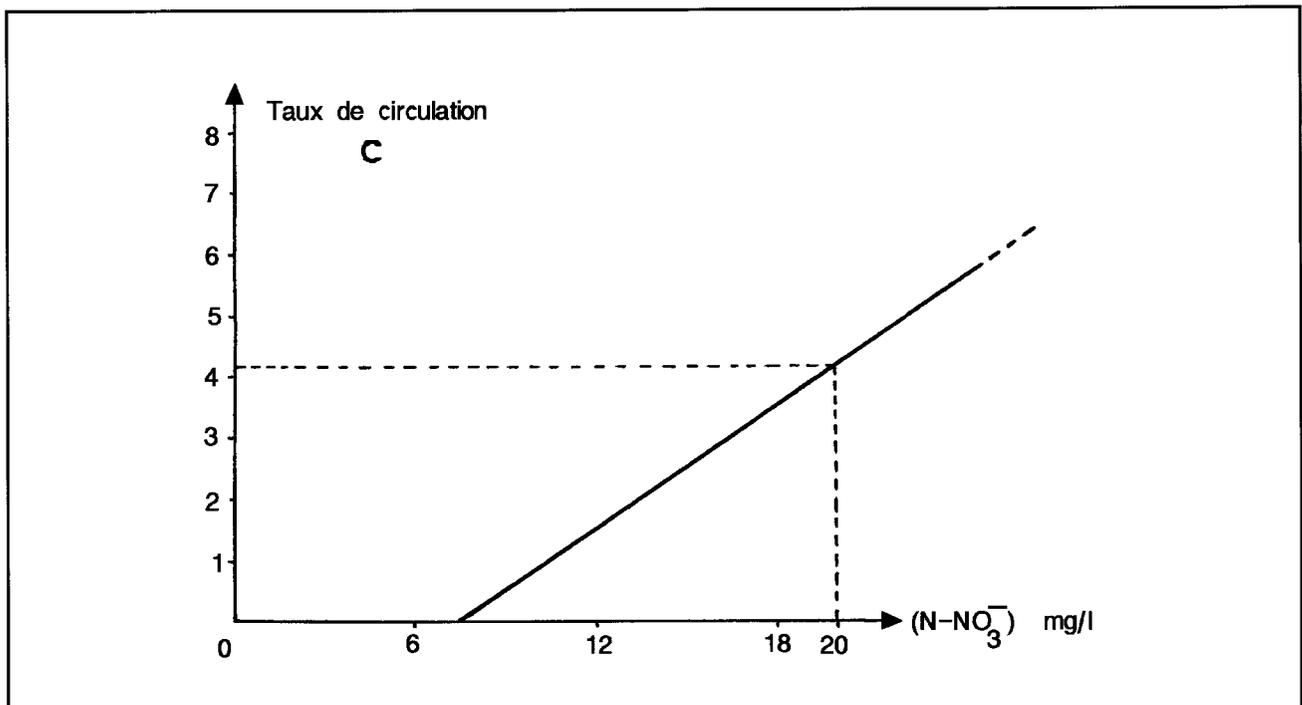


Figure 15 : Relation entre le taux de circulation et les concentrations de nitrates produites sans dénitrification en dehors du bassin d'anoxie.

- Le passage des boues vers le bassin d'aération doit s'effectuer par surverse pour éviter l'accumulation de flottants ou de mousses sur le bassin d'anoxie. Des concentrations supérieures (de l'ordre de 6 mg/l) peuvent être momentanément acceptables si le temps de séjour des boues dans le clarificateur est faible, la température fraîche et en l'absence de bactéries filamenteuses. Il y aura quand même alors systématiquement pertes de fines mais sans grande incidence sur la qualité du traitement.

pompes seront installées suivant le schéma de la figure 16, avec la possibilité d'isoler le bassin d'anoxie (en vue de tarages par empotements, les tuyaux - en général courts - ne permettant pas les mesures par ultra-sons dans de bonnes conditions ou de le court-circuiter si les conditions de charge ne justifient pas son emploi).

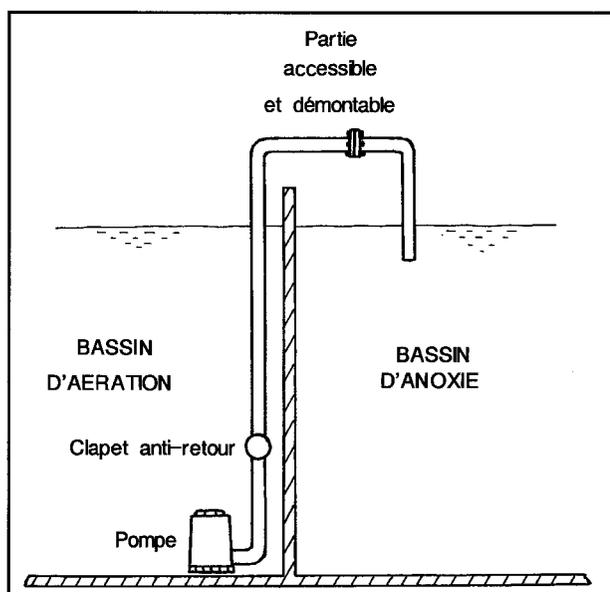


Figure 16 : Schéma d'installation d'une pompe de recirculation de la liqueur aérée.

4.1.4. Bassin d'anoxie

4.1.4.1. Volume

Le bassin d'anoxie alimenté par les eaux brutes, la recirculation des boues et la circulation des nitrates, reçoit un débit égal à $Q(1 + r + c)$ (cf. figure 14) soit, dans les conditions définies précédemment, $6,5 Q$. L'expérience montre que le temps de passage du mélange dans la zone d'anoxie ne doit pas être inférieur à 1 h. Le volume de la zone d'anoxie doit donc correspondre à un "temps de séjour", calculé sur la base de débit moyen horaire de **7 heures**. Les vitesses de dénitrification constatées sur des stations bien chargées sont de l'ordre de 2 à 3 mg N. $\text{NO}_3/\text{g MVS.h}$ une fois l'anoxie établie, soit de 7 mg/l. h en moyenne si les nitrates ne sont pas limitants. Ces vitesses sont donc capables d'équilibrer l'excès de concentration de nitrates fictivement produit en une heure de pointe. On répond bien ainsi à l'hypothèse de base du système, à savoir que tous les nitrates entrant au bassin d'anoxie doivent être dénitrifiés.

Des temps de passage moyens supérieurs à 2 heures n'étant pas souhaitables, il convient,

dans le cas de stations appelées à recevoir une charge faible par rapport à la capacité nominale, de limiter ce volume, en première phase, à une valeur de 4 fois le débit moyen nominal par exemple.

Agitation

La concentration en MES dans le bassin d'anoxie est très proche de celle du bassin d'aération :

$$\frac{1 \text{ MES}_{\text{EB}} + 4 \text{ MES}_{\text{BA}} + 1,5 \text{ MES}_{\text{recirc}}}{6,5} = \text{MES}_{\text{BA}}$$

L'agitation sera assurée, de préférence, par un agitateur immergé lent (grande hélice). Suivant les dispositions géométriques, les puissances à installer sont variables (de 3 à 8 W/m³). Les bassins d'anoxie cylindriques avec agitation périphérique nécessitent les puissances minimales.

4.1.5. Bassin d'aération

4.1.5.1. Volume

La règle de base est de respecter la charge massique de l'aération prolongée. Cette charge doit être calculée sur la masse totale de boues présente en AERATION et en ANOXIE. En effluents domestiques, la sécurité sur le dimensionnement est déjà prise par les valeurs choisies pour les charges de l'"équivalent-habitant", et il n'y a pas de raison de surdimensionner les installations.

Le volume total de cuverie est donc classiquement calculé par :

$$C_m = 0,1 \text{ kg DBO/kg MVS/j}$$

$$\text{MVS} = 0,7 \text{ MES}$$

$$[\text{MES}] = 5 \text{ g/l} \rightarrow [\text{MVS}] = 3,5 \text{ g/l}$$

$$V_T \text{ m}^3 = \frac{\text{masse DBO journalière (kg)}}{0,1 \times [\text{MVS}] (\text{kg/m}^3)}$$

soit, avec les ratios habituels (50 g, 150 l/eh), pour 1 000 habitants :

$$V_{\text{anoxie}} = 7 \times \text{volume horaire moyen d'effluent}$$

$$V_{\text{aération}} = 15,8 \times \text{volume horaire moyen d'effluent}$$

Aération

Pour ce calcul des besoins en oxygène, on procédera de façon identique à celle utilisée pour les boues activées en aération prolongée (cf. annexes I, II et III). La différence se situe au niveau du temps de marche quotidien à ne pas dépasser. La quantité de nitrates à éliminer étant moindre du fait du bassin d'anoxie, on peut tabler sur 6 heures d'arrêt minimum quotidien sans prendre de facteur de sécurité sup-

plémentaire (à condition de bien connaître les performances de l'aérateur).

Les résultats de puissance à installer acquis au chapitre III sont donc à affecter d'un coefficient égal au rapport des temps de marche totaux envisagés ($14/18 = 0,78$). Les puissances spécifiques sont de plus à corriger par le

rapport inverse des volumes, soit un coefficient global de :

$$\frac{14}{18} \times \frac{22,8}{15,8} = 1,12$$

ce qui donne, **en moyenne**, pour les divers systèmes d'aération :

Type d'aérateur	Puissance à installer pour 1 000 eh (kW)	Puissance spécifique ⁴ (aération) (W/m ³)
Aérateur de surface lent	4,6	46
Turbine rapide	6,8	68
Insufflation d'air moyennes bulles	6,2	62
Insufflation d'air fines bulles	3,8	38

4.2. Réglages des stations à bassin d'anoxie

4.2.1. Réglages manuels

4.2.1.1. Aération

Le réglage du **temps total d'aération** est obtenu de la manière suivante :

1° - Obtention d'une nitrification complète (pour une estimation du temps d'aération se reporter aux annexes I à III). Si le démarrage a lieu en période hivernale, procéder à un ensemencement par des boues d'une autre station assurant la nitrification.

2° - Réduction du temps d'aération jusqu'à apparition d'une concentration résiduelle stable d'azote ammoniacal de l'ordre de 5 mg/l.

3° - Augmentation de ce temps de 6 à 12 %

La répartition des plages de fonctionnement et d'arrêt de l'aérateur (ou des aérateurs simultanément⁵) sera faite comme indiqué au chapitre III : réglages manuels de l'aération. Il y a, en effet, tout intérêt à optimiser la dénitrification dans le bassin d'aération puisque cette optimi-

sation procure non seulement un abaissement du temps de marche des aérateurs, mais aussi celui du débit à recirculer du bassin d'aération vers le bassin d'anoxie : s'il est possible d'assurer une dénitrification presque complète dans le bassin d'aération, les pompes de circulation pourraient être mises à l'arrêt et la zone d'anoxie court-circuitée **si la seule contrainte était l'obtention de résultats de traitement** (le taux de recirculation permettant alors, comme le montre la figure n° 15, d'obtenir des résultats satisfaisants).

Ces remarques vont, d'une certaine manière, dans le sens d'une réduction de l'intérêt du bassin d'anoxie. Toutefois, sa présence renforce la fiabilité du système. De manière analogue à celle ayant guidé l'établissement des figures 12 et 13, le schéma suivant montre la sensibilité du réglage du procédé (fig. 17).

Le gain de fiabilité est important. Le point M est situé en fonction d'un abaissement de "NO₃ max" par **dénitrification partielle dans le bassin d'aération** à partir d'un effluent non dilué. toute diminution du taux de circulation diminue la fiabilité du système.

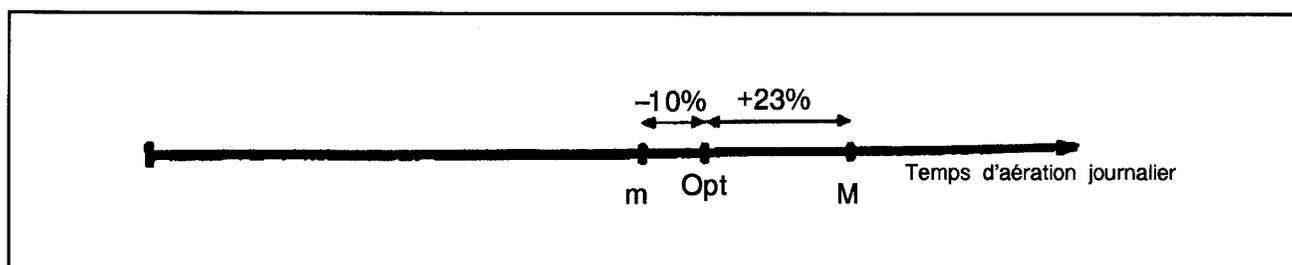


Figure 17 : Sensibilité du réglage optimum des stations à bassin d'anoxie.

4. Pour temps de séjour dans le bassin d'aération de 15,8 h.

5. Si le bassin d'aération peut être considéré comme non homogène, l'aérateur situé le plus près de la reprise de la circulation pourra avoir un fonctionnement simultané mais réduit à la couverture des besoins de brassage, de manière à minimiser le flux d'oxygène dissous amené au bassin d'anoxie.

4.2.2. Circulation des nitrates

4.2.2.1. Taux de circulation

En phase de démarrage ou de récupération d'une situation dégradée (nitrates résiduels trop élevés), le taux de circulation sera fixé à 400 % du débit moyen des eaux brutes.

Une fois acquise une situation satisfaisante au plan de l'élimination des nitrates, le

taux de circulation C peut être réduit progressivement, en surveillant à l'aide de bandelettes-tests les concentrations de nitrates résiduelles, avec comme limite d'assurer un temps de passage moyen dans le bassin d'anoxie inférieur à 2 heures.

Si l'on prend trois situations très différentes :

Exemples	1	2	3
$\frac{\text{Volume de la zone d'anoxie}}{\text{Débit horaire moyen nominal des eaux brutes}} = TB$	7	7	4
% de la charge hydraulique nominale reçue	100 %	25 %	25 %
Taux de recirculation des boues (par rapport au débit reçu)	150 %	200 %	400 %
Pourcentage de circulation minimum à assurer en situation satisfaisante du réglage d'aération par rapport au débit nominal ⁶	100 %	275 %	125 %
Taux de circulation (par rapport au débit reçu)	100 %	1 300 %	500 %

L'exemple n° 2 illustre bien le coût supplémentaire du traitement procuré par une sous-alimentation des stations à bassin d'anoxie. Le taux minimum de circulation de l'exemple n° 1 peut conduire à une faible intensité de la dénitrification dans le bassin d'anoxie, ce qui n'a pas de conséquences trop graves compte tenu de la concentration limitée des nitrates à éliminer à chaque passage.

Répartition de la circulation dans la journée

L'expérience acquise ne montre pas d'intérêt particulier à moduler fortement le débit de circulation des nitrates en fonction des arrivées d'eau. Il reste préférable d'assurer des temps de séjour plus importants lorsque la charge organique est faible, notamment la nuit. Cette variation est déjà en partie assurée par les variations des débits admis et de la recirculation des boues. Elle peut être légèrement renforcée en jouant sur la circulation, tout en gardant présente à l'esprit la nécessité de ne pas imposer des temps d'anoxie trop longs aux boues actives.

Agitation du bassin d'anoxie

Deux modes de réglage sont possibles : si les puissances spécifiques de brassage sont très faibles, l'agitateur doit être laissé en marche continue. A l'inverse, si les puissances spécifiques sont élevées (plus de 6 W/m³ par exemple avec des appareils bien adaptés) un syncopage à 50 % du temps est possible,

l'ordre d'idée étant 15 minutes d'arrêt/15 minutes de marche et des cycles plus courts s'ils permettent la bonne reprise des dépôts.

Recirculation des boues

Ces réglages ne sont pas spécifiques aux stations à bassin d'anoxie. Les mêmes remarques que celles du paragraphe correspondant au chapitre III s'imposent.

Le taux de recirculation, normalement de 100 à 200 %, peut être supérieur, par exemple 400 %, sans inconvénient lorsque le débit reçu par la station ne représente qu'une faible part de la capacité nominale.

Il est préférable de moduler grossièrement les temps de fonctionnement proportionnellement aux débits reçus (avec un certain excédent en début de nuit) et, à cet effet, de disposer d'une horloge à plots (plots d'1/4 heure) pour commander le fonctionnement de chaque pompe de recirculation.

4.2.3. Asservissements

4.2.3.1. Bassin d'aération

Dans des conditions de variation de charges importantes (site touristique, par exemple) une régulation de la fourniture d'oxygène est nécessaire. Elle est facilement réalisable à l'aide d'une sonde à oxygène dissous. Le type d'asservissement souhaitable est décrit au chapitre III.

La possibilité d'asservissement au potentiel d'oxydo-réduction, encore évoquée en terme de perspective d'avenir pour les stations d'épu-

6. Temps de passage maximum = $\frac{\text{Volume d'anoxie}}{Q_m(1+r+c)} = \frac{T_{\text{séjour}}}{1+r+c} = 2$ heures d'où la relation $\frac{TS}{2} = 1+r+c$.

ration classiques, est aussi intéressante dans le cas de station à bassin d'anoxie, du fait du décrochement du potentiel lorsque la concentration de nitrates est nulle dans les milieux anoxiques.

Les valeurs "absolues" de consigne en aération sont de l'ordre de + 400 mV (seuil d'arrêt) et = 150 mV (seuil de démarrage) par rapport à l'électrode à hydrogène normale.

Les valeurs correspondantes lues sur le millivoltmètre avec les sondes classiques (référence, Ag - AgCl) sont, de l'ordre de + 200 et - 50 mV⁷.

Circulation des nitrates

Deux voies d'asservissement sont possibles :

— en fonction des débits :

Sur des réseaux unitaires, le taux de circulation peut être adapté au débit des eaux brutes et, notamment, au fonctionnement des dispositifs de relèvement des eaux brutes. Les diverses conditions à respecter, décrites dans le paragraphe correspondant "réglage manuel" du présent chapitre, créent toutefois des difficultés, nécessitant sans doute la plupart du

temps de disposer d'un automate (ce qui n'est actuellement guère envisageable sur des stations d'épuration de petite capacité).

— en fonction de potentiel d'oxydo-réduction :

La logique est de diminuer la circulation de liqueur aérée si le potentiel mesuré dans le bassin d'anoxie est supérieur à une valeur de consigne (+ 200 mV/EHN ; environ 0 mV/Ag-AgCl - valeurs indicatives) et de permettre le libre déroulement d'une programmation manuelle lorsque la mesure donne une valeur inférieure.

Cette programmation manuelle peut, alors, être réalisée sur un doseur cyclique dont on modifie le temps de marche en fonction de la charge reçue par la station d'épuration (un réglage plus affiné demanderait, là encore, la disposition d'un automate programmable).

Le potentiel d'oxydo-réduction est, par ailleurs, le seul indicateur instantané permettant de juger si les conditions de fonctionnement du bassin d'anoxie sont satisfaisantes. C'est donc l'outil privilégié de contrôle du bassin d'anoxie.

7. Pour de plus amples explications, se reporter à : CEMAGREF QEPP PARIS (1990) Potentiel d'électrode de platine dans les boues activées - cahier technique de l'épuration n° 17, 8 p.

Une élimination partielle de l'azote est assurée par l'ensemble des traitements d'épuration des eaux usées, notamment du fait de la présence de bactéries, responsables de l'épuration, ayant besoin d'azote pour transformer les molécules organiques. Certains procédés, tel que le lagunage naturel, présentent même des rendements d'élimination de l'azote des eaux usées élevés, l'assimilation bactérienne n'étant pas le seul mécanisme en jeu.

L'amélioration de la qualité moyenne des effluents épurés révèle de plus en plus nettement la nécessité de faire progresser de façon importante l'élimination de l'azote, que ce soit sous forme réduite (ammonium) ou oxydée (nitrates). Dans de nombreux cas, la fixation de normes de rejet concernant l'azote, plus contraignantes que par le passé, est susceptible d'améliorer considérablement la qualité du milieu naturel récepteur. En témoignent diverses évolutions récentes telles la prise en compte de la qualité de traitement de l'azote dans la modulation des incitations financières à la bonne épuration par les Agences Financières de Bassin et la fixation, de plus en plus fréquente, d'un niveau de concentration maximum d'azote dans les autorisations de rejet.

Parmi les stations d'épuration équipant les petites et moyennes collectivités, la technique des **boues activées en aération prolongée** est la plus fréquemment utilisée. Ces équipements remplissent, dans leur majorité, les principales conditions permettant d'envisager une importante élimination d'azote. La principale de ces conditions est de disposer d'une capacité d'oxygénation importante, ce qui est en général le cas compte tenu du faible taux moyen de charge organique reçue par les stations d'épuration. Sauf conditions particulières, **il est possible d'obtenir une élimination d'azote très poussée** répondant facilement au niveau NK2 et capable de respecter le niveau NGL2 de la

circulaire du 4 novembre 1980. Cette amélioration considérable du traitement prévu pour ces installations est obtenue au prix :

- d'un réglage d'aération précis, ménageant des plages d'arrêt du système d'aération suffisamment longues,
- d'une extraction régulière et par quantités raisonnables des boues en excès,
- d'une consommation électrique du système d'aération accrue **théoriquement** de 30 %¹ mais bien souvent, en pratique, d'un facteur bien inférieur grâce à la précision imposée au nouveau réglage ou, si la charge massique est nettement inférieure, à la charge nominale.

Un réglage suffisamment précis de l'aération est à la portée de la plupart des exploitants conseillés par les Services d'Assistance Technique départementaux (SATESE).

Certaines conditions (charges reçues proches de la charge nominale, procédés d'aération mal adaptés, quantités d'azote relativement importantes dans l'effluent brut, niveau d'épuration requis extrêmement contraignant, ...) ne permettent pas d'envisager une élimination suffisante en amplitude et en fiabilité par la technique de réglage décrite dans le présent document.

La technique des **boues activées en aération prolongée avec bassin d'anoxie en tête** est alors disponible. Elle donne de bons résultats (N_{K3} et N_{GL2}) à condition de procéder au même mode de réglage que sur les stations en aération prolongée traditionnelle. La précision nécessaire à ces réglages est, toutefois, significativement moindre, accroissant ainsi la fiabilité du traitement.

Les coûts de fonctionnement supplémentaires (agitation de la zone d'anoxie et, surtout, recirculation de la liqueur aérée) peuvent être minimisés par des choix technologiques judicieux et les réglages optimisés.

1. Correspondant à un accroissement de la consommation totale de l'ordre de 20 % et, dans le cas des stations d'épuration des petites collectivités, à un accroissement du coût de fonctionnement de l'ordre de 5 à 10 %.

Calcul des besoins d'oxygène en boues activées en aération prolongée avec élimination d'azote

La consommation de l'oxygène par la masse bactérienne est liée à trois facteurs :

— l'**oxydation de la matière organique** (fonction croissante de la matière organique dégradée),

— le **métabolisme endogène des boues** (fonction croissante de la masse bactérienne présente dans le bassin ; fonction décroissante de l'âge des boues),

— la **nitrification** (fonction croissante de la quantité d'azote ammoniacal nitrifié).

Une partie de l'oxygène consommé pour la nitrification peut être récupérée par dénitrification.

La formule suivante peut être appliquée pour le calcul des besoins en oxygène d'une boue activée sur une période d'au moins quelques heures.

$$O_2 = a'Le + \frac{t}{24} b'Sv + 4,3 N - 2,85 c'N$$

avec :

O_2 : quantité d'oxygène à apporter pendant la période considérée (kg)

a' : quantité d'oxygène nécessaire à l'oxydation d'un kg de DBO_5 ($a' = 0,65$ kg O_2 /kg DBO_5 en aération prolongée)

Le : quantité de DBO_5 à éliminer pendant la période considérée (kg)

t : durée de la période (h)

b' : quantité d'oxygène nécessaire au métabolisme endogène de 1 kg de matières volatiles en suspension des boues (MVS), par jour ($b' = 0,07$ kg O_2 /kg MVS.j en aération prolongée)

Sv : masse de MVS dans le bassin d'aération (kg)

4.3 : taux de conversion de l'azote ammoniacal en azote nitrique

N : quantité d'azote à nitrifier durant la période considérée (kg)

2,85 : taux de conversion de l'azote nitrique en oxygène

c' : fraction de l'oxygène des nitrates récupéré par dénitrification.

La quantité d'azote à nitrifier est égale à la quantité d'azote Kjeldahl admise dans le bassin d'aération pendant la période considérée à laquelle on soustrait :

– l'azote assimilé par les bactéries

– l'azote Kjeldahl rejeté

Application

Pour ces calculs, on se fonde sur un effluent dont l'équilibre carbone - azote est typique en effluent domestique et qui, sans dilution¹ de l'effluent par des eaux parasites, présente les **concentrations** suivantes (mg/l) :

<i>DBO</i>	<i>DCO</i>	<i>N_{KJ}</i>	<i>N-NH₄</i>
330	850	80	65

Pour une population de 1 000 équivalent-habitants, **les charges à traiter** sont :

DBO_5 : 50 kg/j (50 g DBO_5 /eqh.j)

N_{KJ} : 12 kg/j (12 g N_{KJ} /eqh.j)

Débit journalier : 150 m³/j.

1. Une éventuelle (mais fréquente) dilution par des eaux parasites n'a d'ailleurs pas d'influence notable sur les résultats des calculs développés ici.

Hypothèses de dimensionnement :

Charge volumique C_v	=	0,35 kg DBO/m ³ .j
80 % de la charge arrive en 16 h		
Concentration des boues	=	5 g/l
Fraction volatile des boues	=	0,7
Rendement en DBO	=	95 %
Concentration d'azote Kjeldahl en sortie	=	5 mg/l
Concentration d'azote oxydé en sortie	=	3 mg/l
Taux de récupération d'oxygène lors de la dénitrification (C')	=	0,7 ²

Oxydation de la matière organique (a' Le)

DBO éliminée en 16 h de jour	: 50 x 0,8 x 0,95	=	38 kg DBO
Besoins en O ₂ pour ces 16 h	: 0,65 x 38	=	24,7 kg O ₂
Besoins horaires de pointe	: 24,7/16	=	1,54 kg O₂/h
Besoins en O₂ sur la journée	: 24,7/0,8	=	30,9 kg O₂/j

Métabolisme endogène des boues (b' Sv)

Volume du bassin d'aération	: 50/0,35	=	145 m ³
Masse de matières volatiles en suspension Sv	: 5 x 0,7 x 145	=	507,5 kg
Besoins journaliers en O₂	: 0,07 x 507,5	=	35,5 kg O₂/j
Besoins sur 16 h de jour en O ₂	: 35,5 x 16/24	=	23,7 kg O ₂ /h
Besoins horaires en O₂	: 23,7/16	=	1,48 kg O₂/h

Nitrification (4,3 N)

Quantité d'azote admise en 16 h de jour	: 12 x 0,8	=	9,6 kg N
Quantité d'azote assimilé en 16 h de jour	: 38 x 5 %	=	1,9 kg N
Quantité d'azote Kjeldahl rejetée en 16 heures de jour	: 16/24 x 150 x 0,005	=	0,5 kg
Quantité d'azote à nitrifier en 16 h	: 9,6 - (1,9 + 0,5)	=	7,2 kg
Besoins en O ₂ sur 16 h	: 4,3 x 7,2	=	31 kg O ₂
Besoins horaires en pointe	: 31/16	=	1,94 kg O₂/h
Besoins en O₂ journaliers	: 4,3 [12 - ($\frac{1,9}{0,8} + 0,5 \times \frac{24}{16}$)]	=	38,2 kg O₂/j

Oxygène récupéré par dénitrification (2,85 c'N)

Quantité d'O ₂ récupéré par jour	: 2,85 x 0,7 x $\frac{7,2}{0,8}$	=	18 kg O ₂ /j
Quantité horaire d'O ₂ récupéré	: 18/24	=	0,75 kg O ₂ /h
Besoins d'oxygène pour l'élimination d'azote			
Sur la journée	: 38,2 - 18	=	20,2 kg O ₂ /j
Sur 1 h de jour	: 1,94 - 0,75	=	1,19 kg O ₂ /h

Récapitulation :

Pour 1 000 équivalent-habitants en boues activées en aération prolongée

Besoins en O₂ journaliers :

30,9	+	35,5	+	20,2	=	86,6 kg O ₂ /j
oxydation carbone		endogénèse		élimination azote		
(36 %)		(41 %)		(23 %)		

Besoins en O₂ sur 1 heure de pointe :

1,54	+	1,48	+	1,19	=	4,2 kg O ₂ /h
(37 %)		(35 %)		(28 %)		

2. Ce coefficient constitue un facteur de sécurité dans le dimensionnement et comprend les départs d'azote oxydé de l'effluent épuré.

Dimensionnement des aérateurs en boues activées aération prolongée avec élimination d'azote

Les performances des aérateurs s'expriment en terme d'apport spécifique brut en eau claire (ASB en kg O₂/kWh absorbé).

En boues activées, ces performances sont différentes. Le premier facteur correctif à appliquer est appelé α : rapport du coefficient de transfert en boues au coefficient de transfert en eau claire à la même température, ses valeurs moyennes figurent dans le tableau ci dessous selon le type d'aérateur. D'autres correctifs doivent être appliqués liés à la température, à la

pression, à la viscosité et, surtout, au fait que la fourniture d'oxygène n'est pas réalisée à concentration nulle d'oxygène.

Le produit de l'ensemble de ces facteurs correctifs (y compris α) est appelé **coefficient de transfert global** (noté ici "CTG").

Les résultats de mesures accumulés par le CEMAGREF sur tous les types d'aérateurs installés en France permettent de dresser le tableau suivant :

Type d'aérateur	ASB moyen	α moyen	CTG	ASB en boues (= ASB x CTG)
<i>Aérateur de surface lent (turbines lentes et brosses)</i>	1,5	0,9	0,7	1,05
<i>Turbine rapide</i>	1	0,9	0,7	0,7
<i>Insufflation d'air moyennes bulles</i>	1,1	0,9	0,7	0,77
<i>Insufflation d'air fines bulles</i>	2,5	0,65	0,5	1,25
<i>Systèmes déprimogènes de fond</i>	0,6	0,65	0,5	0,3

La couverture des besoins en oxygène de pointe, notés O_{2p} est assurée par les puissances absorbées d'aérateur Pa en fonction de la relation simple :

$$O_{2p} = ASB_{\text{boues}} \times Pa$$

En reprenant l'exemple de l'annexe n° 1
(1 000 éq. habitants) :

— les puissances absorbées nécessaires (colonne 1 du tableau ci-dessous)

— les puissances spécifiques ou énergies dissipées par m³ de bassin d'aération (colonne 2)
peuvent être établies.

— le temps de fonctionnement pour couvrir les besoins journaliers est égal à :

$$\frac{\text{besoins journaliers}}{\text{apport horaire}}$$

et dans le cas typique de notre exemple à :

$$\frac{86,6}{4,2} = 20,6 \text{ heures}$$

La puissance horaire à installer sera donc fonction du temps de marche souhaité de l'aérateur. (Dans le cas présent, 14 h de manière à permettre 10 h d'arrêt des aérateurs).

Les colonnes 3 et 4 du tableau sont donc déduites des colonnes 1 et 2 en multipliant les données par $\frac{20,6}{14} = 1,47$.

Type d'aérateur	Puissance absorbée nécessaire kW	Puissance spécifique nécessaire W/m ³	Puissance à installer kW	Puissance spécifique à installer W/m ³
Aérateur de surface lent	3,98	27,4	5,85	40
Turbine rapide	5,97	41,2	8,77	60
Insufflation d'air moyennes bulles	5,42	37,4	7,97	55
Insufflation d'air fines bulles	3,34	23	4,91	34
Systèmes déprimogènes de fond	13,9	95,9	–	–

L'énorme puissance spécifique nécessaire (colonne 2) exclut l'emploi de systèmes déprimogènes de fond dans des stations destinées à traiter l'azote.

Les puissances à installer, pour les systèmes d'aération les plus performants, aérateurs lents de surface, insufflations d'air fines bulles, sont supérieures de près de 50 % aux puissances installées actuellement sur des bassins d'aération sans objectif de traitement de l'azote.

En dehors du surplus de consommation électrique qu'ils induisent, les autres systèmes d'aération nécessitent des puissances spécifiques très élevées peu recommandables dans des installations qui, en majorité, restent à un taux de charge organique faible de nombreuses années. Cette remarque est à nuancer pour l'insufflation d'air moyennes bulles, à condition de disposer de possibilités de fourniture d'air étagée (plusieurs surpresseurs, surpresseurs à deux vitesses, ...).

Le calcul de la puissance à installer peut aussi être effectué en considérant simplement que la quantité journalière d'oxygène (86,6 KgO₂) doit être apportée en 14 heures, l'apport horaire devant alors être égal à $86,6/14 = 6,18$ KgO₂/heure. Les puissances obtenues de cette façon sont identiques à celles calculées selon la méthode précédente (colonne 3 du tableau).

Calcul du temps de fonctionnement supplémentaire du système d'aération pour éliminer l'azote en boues activées en aération prolongée

Données mesurées		Exemple
N_{KJO}	Concentration d'azote Kjeldahl en sortie de station (en décomptant éventuellement l'azote de pertes de boues) ¹	30 mg/l
N_{OXO}	Concentration de nitrates en sortie de station	0 mg/l
Q_J	Débit journalier	150 m ³ /j
P_a	Puissance absorbée par l'aérateur	4 kW
$ASB \times CTG$	Apport spécifique en boues (cf. annexe 2)	1,05 kg O ₂ /kWh

Calcul des besoins d'oxygène supplémentaires

$$O_{2N} = \frac{Q}{1000} [N_{KJO} - 5] 4,3 - (N_{KJO} + N_{OXO} - 8) \times 0,7 \times 2,85]$$

$$O_{2N} = \frac{Q}{1000} (2,3 N_{KJO} - 2 N_{OXO} - 5,5)$$

Exemple :

$$\frac{150}{1000} [(25 \cdot 4,3) - (22 \cdot 2)] = 9,52 \text{ kg O}_2/\text{jour pour 1 000 habitants}$$

Calcul du temps d'aération supplémentaire :

$$T = \frac{O_{2N}}{ASB_B \times P_a} \quad \text{Exemple : } \frac{9,52}{1,05 \times 4} = 2,3 \text{ heures}$$

1. Une estimation correcte est 0,06 x MES de l'effluent épuré.

Analyse des eaux résiduaires

MES : Matières en suspension

— Norme AFNOR NF T 90 105 - juin 1978

Masse de matières particulières mesurée après filtration ou centrifugation et séchage en étuve à 105 °C jusqu'à obtention d'une masse constante ; expression des résultats en mg/l.

MVS : Matières volatiles en suspension

Masse de matières particulières organiques obtenue par différence entre les MES et leurs résidus secs obtenus après passage au four à 550 °C ; expression des résultats en mg/l ou en pour cent des MES

DBO : Demande biochimique en oxygène

— Norme AFNOR NF D T 90 103 - juin 1971

Test biologique visant à s'approcher, au laboratoire, des phénomènes de dégradation qui ont lieu dans le milieu naturel. La DBO est la quantité d'oxygène consommée par les bactéries pour assurer la dégradation des matières présentes dans l'eau. On la mesure par la différence des concentrations initiales et finales d'oxygène, dans des flacons remplis d'eau à analyser diluée et placés pendant cinq jours en étuve à 20 °C (DBO₅). Il suffit donc de multiplier cette différence, diminuée de la consommation d'oxygène de l'eau de dilution elle-même, par le facteur de dilution pour exprimer le résultat en mg d'oxygène par litre. Lorsqu'il y a risque de nitrification rapide (eaux traitées de station nitrifiant partiellement), il convient d'ajouter à l'eau de dilution de 5 mg/l d'allylthiourée, inhibiteur spécifique de la nitrification.

DCO : Demande chimique en oxygène

— Norme AFNOR NF 90 101 - septembre 1971

Quantité d'oxygène consommée pour oxyder les matières contenues dans l'eau par voie chi-

mique, en milieu acide et à chaud (deux heures d'ébullition). Cette analyse, normalisée et précise, est une approche de la quantité totale d'oxygène nécessaire pour achever la minéralisation de l'effluent. La DCO s'exprime en mg d'oxygène par litre.

NKJ : azote Kjeldahl

— Norme AFNOR NF T 90 110 - décembre 1981

Du nom du chimiste ayant proposé la méthode de dosage, N_{KJ} représente la somme de l'azote organique et de l'azote ammoniacal. On le mesure par dosage de l'azote sous forme ammoniacale après minéralisation de l'azote organique (alors transformé en azote ammoniacal) par ébullition en milieu acide. Le résultat du dosage est exprimé en mg d'azote par litre.

Azote minéral

Les dosages de l'azote ammoniacal (N - NH₄), de l'azote nitreux (N - NO₂) et de l'azote nitrique (N - NO₃) permettent de dresser le bilan du degré d'oxydation de l'azote minéral. Ils sont normalisés respectivement dans les normes **AFNOR NF T 90 015, T 90 013 et T 90 012 d'août 1975**. En épuration des eaux, les résultats sont exprimés en mg d'azote par litre. Les deux derniers termes permettent de calculer l'azote total ou azote global (N_{GL}) puisqu'il s'agit de la somme N_{KJ} + N - NO₂ + N - NO₃.

Conservation des échantillons¹

L'azote Kjeldahl est stable après prélèvement, tout au plus l'ammonification peut se poursuivre, conservant constante la somme N_{org} + N - NH₄.

1. Sur cette question, le lecteur pourra se reporter, pour de plus amples informations, à : D. GRANGE et al., Analyse des eaux - influence des conditions de conservation. Rapport des laboratoires L.C.P.C. Janvier 1988.

Cette ammonification fait conseiller des dosages intervenant peu de temps après prélèvement. La conservation au froid (4 °C) est vivement recommandée.

Les nitrates et nitrites sont les formes les moins stables, notamment lorsque les prélèvements sont riches en bactéries.

Cela implique la confection d'un échantillon spécifique du dosage de l'azote oxydé qu'il convient au moins de filtrer sur place. On peut de plus bloquer toute évolution par addition d'un ml/l de HgCl à 50 g/l.

Adresses utiles

Administrations Centrales :

- Ministère de l'Agriculture,
Direction de l'Espace Rural et de la Forêt
Sous-direction du Développement Rural
19, avenue du Maine
75732 PARIS CEDEX 15
Téléphone : (1) 45.44.38.86
- Ministère de l'Environnement
Direction de la Prévention des Pollutions
Service de l'Eau/Service des déchets
14, boulevard du Général Leclerc,
92524 NEUILLY-SUR-SEINE
Téléphone : (1) 47.58.12.12
- Ministère de l'Intérieur et de la Décentralisation
Direction Générale des Collectivités Locales
Sous-direction des services publics locaux
et des techniques municipales
4 - 12, rue d'Aguesseau,
75800 PARIS
Téléphone : (1) 42.61.51.40
- Ministère de la Santé
Direction Générale de la Santé
Sous-direction des actions de prévention
8, avenue de Ségur,
75700 PARIS
Téléphone : (1) 45.67.55.44

Organismes publics

- Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (CEMAGREF) - Unités Qualité des Eaux, Pêche et Pisciculture :
 - BORDEAUX - 50, avenue de Verdun,
Gazinet, B.P. 3
33610 CESTAS PRINCIPAL
Téléphone : 56.36.09.40
 - LYON - 3, Quai Chauveau
69336 LYON Cedex 09
Téléphone : 72.20.87.87
 - PARIS - 14, avenue de Saint-Mandé
75012 PARIS
Téléphone : (1) 43.43.97.84
- Agence de Bassin Seine-Normandie
51, rue Salvador Allende
92027 NANTERRE CEDEX
Téléphone : (1) 47.76.44.24
- Agence de l'Eau Artois-Picardie
764 boulevard Lahure, B.P. 818
59508 DOUAI
Téléphone : 27.87.01.94

- Agence de Bassin Rhône-Méditerranée-Corse
31, rue Jules Guesde,
69310 PIERRE BÉNITE
Téléphone : 78.50.16.40
- Agence de Bassin Adour-Garonne,
90, rue du Férétra,
31078 TOULOUSE CEDEX
Téléphone 61.36.37.38
- Agence de Bassin Loire-Bretagne
Avenue Buffon - B.P. 6339
45063 ORLEANS CEDEX 2
Téléphone : 38.63.08.16
- Agence de Bassin Rhin-Meuse,
Le Longeau - Rozerieulles - B.P. 19
57160 MOULINS LES METZ
Téléphone : 87.60.48.88
- Agence Nationale pour la Récupération
et l'Élimination des Déchets (A.N.R.E.D.)
2, square Lafayette - B.P. 406
49004 ANGERS CEDEX
Téléphone : 41.87.29.24

Services départementaux

- Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt (D.D.A.F.)
- Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales (D.D.A.S.S.)
- Direction Départementale de l'Équipement (D.D.E.)
- Service Départemental d'Assistance Technique à l'Exploitation des Stations d'Épuration (SATESE)

Centres de documentation

- Association Française pour l'Étude des Eaux (A.F.E.E.)
23, rue de Madrid,
75008 PARIS
Téléphone : (1) 45.22.14.67
- Centre de documentation du Ministère de l'Agriculture D.E.R.F.
19, avenue du Maine,
75732 PARIS CEDEX 15
Téléphone : (1) 45.44.38.86

Organismes professionnels

- Chambre syndicale nationale des entreprises et industries de l'hygiène publique (C.S.N.H.P.) :
Syndicat national des industries du traitement des eaux résiduaires (S.N.I.T.E.R.)
10, rue de Washington
75008 PARIS
Téléphone : (1) 45.63.70.40

LISTE DES DOCUMENTS TECHNIQUES F.N.D.A.E.

n° 1 – L'exploitation des lagunages naturels	1985	disponible
n° 2 – Définition des caractéristiques techniques de fonctionnement et domaine d'emploi des appareils de désinfection	1986	en réimpression
n° 3 – Manuel pratique pour le renforcement de l'étanchéité des réservoirs d'eau potable	1986	disponible
n° 4 – Plan de secours pour l'alimentation en eau potable	1986	disponible
n° 5 – Les stations d'épuration adaptées aux petites collectivités	1986	disponible
n° 6 – Les bassins d'orage sur les réseaux d'assainissement	1988	disponible
n° 7 – Le Génie Civil des Bassins de lagunage naturel	1990	disponible
n° 8 – Guide technique sur le foisonnement des boues activées	1990	disponible
n° 9 – Les systèmes de traitement des boues des petites collectivités	1990	disponible
n° 10 – Élimination de l'azote dans les stations d'épuration biologique des petites collectivités	1990	disponible

DOCUMENTS HORS-SÉRIE

– La gestion des Services d'eau potable Guide à l'usage des maires des communes rurales	1987	disponible
– Situation de l'alimentation en eau potable des communes rurales en 1985	1987	disponible

L'ensemble de ces documents est disponible au Ministère de l'Agriculture et de la Forêt – Bureau des Infrastructures Rurales – 19 Avenue du Maine, 75032 Paris Cedex 15 – Tél : (1) 49.55.54.83.

Par ailleurs, les documents portant les numéros 7 – 8 – 9 – 10 peuvent être commandés au CEMAGREF – DICOVA – BP 22, 92162 Antony Cedex – Tél : (1) 40.96.61.32.

Prix de vente unitaire : 85 F TTC Franco

Les "ÉTUDES" du CEMAGREF

Série : Ressources en eau

- N° 1 Potentiel d'électrode de platine en épuration biologique
1990, 17 x 24, broché - 164 pages, 72 illustrations noir et blanc - Prix : 200 F
- N° 2 Le phosphore et l'azote dans les sédiments du fleuve Charente : variations saisonnières et mobilité potentielle
1990, 17 x 24, broché - 228 pages, illustrations noir et blanc - Prix : 250 F

Série : Hydraulique agricole

- N° 1 Etude de la qualité des eaux de drainage . Diagnostic de risque de lessivage d'azote en fin de campagne culturale . La tranchée de drainage . Une nouvelle expression de la hauteur équivalente . A propos des coefficients de forme de la nappe libre drainée
1986, 21 x 29,7 - 182 pages - Prix : 200 F
- N° 2 Hydraulique au voisinage du drain. Méthodologie et premiers résultats. Application au diagnostic du colmatage minéral des drains
1987, 21 x 29,7 - 220 pages - Prix : 200 F
- N° 3 Secteurs de références drainage. Recueil des expérimentations
1988, classeur 20 x 26 - 92 fiches, 106 illustrations noir et blanc - Prix : 150 F
- N° 4 Fonctionnement hydrologique et hydraulique du drainage souterrain des sols temporairement engorgés : débits de pointe et modèle SIDRA
1989, 17 x 24, broché - 334 pages, 98 illustrations noir et blanc - Prix : 250 F
- N° 5 Transferts hydriques en sols drainés par tuyaux enterrés. Compréhension des débits de pointe et essai de typologie des schémas d'écoulement
1989, 17 x 24, broché - 322 pages, 117 illustrations noir et blanc - Prix : 250 F
- N° 6 Réseaux collectifs d'irrigation ramifiée sous pression. Calcul et fonctionnement
1989, 17 x 24, broché - 1989, 17 x 24, broché - Prix : 150 F
- N° 7 Géologie des barrages et des retenues de petites dimensions
1990, 17 x 24, broché - 144 pages, illustrations noir et blanc - Prix : 200 F

Série : Equipement des IAA

- N° 1 Carbonisateur à pailles et herbes pour les pays en développement
1990, 17 x 24, broché - 56 pages, illustrations noir et blanc - Prix : 100 F

Série : Forêt

- N° 1 Annales 1988
1989, 17 x 24, broché - 126 pages, 30 dessins et photos noir et blanc - Prix : 150 F
- N° 2 Le Massif Central Cristallin Analyse du milieu - Choix des essences
1989, 17 x 24, broché - 104 pages, 14 illustrations noir et blanc - Prix : 150 F
- N° 3 Les stations forestières du pays d'Othe
1990, 17 x 24, broché - 174 pages, 45 illustrations noir et blanc - Prix : 150 F

Réalisation Société AZIMUT
2 rue Léon Blum — Résidence Le Ponchelet — BP 103 — 62110 HÉNIN-BEAUMONT
Imprimé par JOUVE PARIS - Décembre 1990