

La problématique du traitement de l'azote sur des installations confrontées à des charges variables et à des basses températures. Application au procédé biofiltration.

NOTE DE SYNTHÈSE

CANLER J.-P^{*1}., PERRET J.-M ^{*1}, IWEMA Arthur ^{*2}

*1 Cemagref ; 3 bis, quai Chauveau CP 220 69336 LYON cedex 09 France

*2 Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, 2-4 Allée de Lodz, 69 363 LYON Cedex 07 France

PREAMBULE

Cette note relate les résultats de plusieurs études successives réalisées sur deux stations de biofiltration fonctionnant dans des conditions de fortes variations de charges et de basse température. Son but est de mieux aborder pour l'avenir le dimensionnement et la conception des installations de biofiltration fonctionnant dans ces conditions particulières, de préciser les règles optimales d'exploitation, de lister les facteurs ou mécanismes qui peuvent occasionner le non-respect du rejet lors des pointes de charges et d'identifier le facteur de variation de charge limite de ce procédé. Elle s'adresse particulièrement aux maîtres d'œuvre en charge de la conduite de projets de stations d'épuration dans les régions des Alpes et des Pyrénées et aux services des Départements, des Régions, des Agences de l'Eau et de la police de l'eau de ces régions.

Nos remerciements s'adressent :

à l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse et à l'Unité de Recherche Qualité des Eaux et Prévention des Pollutions du Cemagref de Lyon pour leur financement conjoint,

aux Maîtres d'ouvrages des stations d'épuration suivies : le Syndicat Intercommunal de la Vallée de l'Ubaye et le Syndicat d'Assainissement des Aravis, pour leur accueil et la mise à disposition de leur installation,

aux constructeurs des ouvrages étudiés : Sociétés OTV (Barcelonnette - 05) et VA TECH WABAG (Saint Jean de Sixt - 74),

aux exploitants : en particulier aux équipes locales de la CGE et de GTM Environnement

à M. LENGRAND (stagiaire au Cemagref), à l'équipe traitement des eaux résiduaires du Cemagref à Lyon ainsi qu'au personnel de laboratoire de Chimie,

et à toutes les personnes qui, à un moment donné, ont facilité le déroulement de l'étude : D.D.A.F, Maîtrise d'œuvre, Police des eaux...

RESUME

Le dimensionnement des stations d'épuration situées en zone de montagne à forte activité touristique et équipées du procédé biofiltration s'avère délicat pour la période hivernale en raison de la très faible température des influents, des augmentations de charge à traiter rapides et de forte amplitude et des performances élevées demandées sur le traitement de l'azote ammoniacal à cette période.

Face à cette problématique, le suivi de deux sites touristiques équipés de biofiltres sur une voir deux saisons hivernales consécutives ont permis de mieux appréhender le sujet et d'étudier les points importants du traitement, en particulier :

- la capacité nitrifiante maximale pour une température donnée,
- le rythme de développement journalier de cette biomasse pour des faibles températures,
- les différents modes techniques de gestion envisageables pour répondre aux variations de charge comme l'apport d'une source azotée externe afin d'augmenter la biomasse présente et la rotation des cellules,

Les installations étaient équipées de systèmes spécifiques de gestion pour répondre à la problématique charges variables, à savoir :

- un procédé de gestion des biofiltres par rotation pour répondre aux fluctuations de charge développé par OTV (Système RégulFiltre).
- une gestion du nombre de cellules à alimenter par rapport à une concentration fixée en $N-NH_4^+$ grâce à la mise en place d'un analyseur en continu sur les eaux rejetées en sortie d'installation.

A partir des suivis poussés de ces différentes techniques, un certain nombre de paramètres et de modes de fonctionnement ont été étudiés. Les résultats obtenus ont permis d'apporter des éléments de réponse sur les possibilités de traiter des charges variables, d'étudier plusieurs scénarios de gestion d'installations confrontées à différents facteurs d'augmentation de charge et de fixer leurs limites respectives.

MOTS CLES

Biofiltres – Nitrification – Charge variable – Basse température - Biostyr

1 INTRODUCTION

L'évolution de la réglementation européenne et française dans le domaine du traitement des eaux résiduaires urbaines implique, pour les agglomérations de plus de 2000 EH, un niveau de rejet nécessitant au moins un traitement biologique de leurs eaux usées. En cas de rejet dans des eaux réceptrices sensibles à l'azote ammoniacal, ce traitement comprendra également une nitrification.

Parmi les stations d'épuration françaises situées en zone de montagne à forte activité touristique hivernale et estivale, de nombreuses installations ne disposent actuellement que d'un simple traitement physico-chimique. Cette situation s'explique par la difficulté technologique à mettre en place un traitement biologique dans ces conditions (très fortes et rapides variations de charges, faible température des eaux usées, présence d'eaux parasites) et par la relative faible sensibilité des eaux réceptrices (débits élevés, forte ré-aération, période de rejet courte) compatible avec le rejet

d'effluents de traitement moins poussé (traitement physico-chimique).

La mise en place de traitements biologiques pour répondre à la nouvelle réglementation - et notamment la mise en place d'un traitement par nitrification - n'est donc pas sans difficultés et suscite les interrogations suivantes :

Sur le plan des performances, la qualité du rejet doit-elle être garantie tout au long de l'année et donc également pendant la période de pointe hivernale (souvent de quelques semaines seulement) ou un traitement "dégradé" est-il admissible momentanément ?

Sur le plan technologique, quel type de traitement biologique, plus particulièrement nitrifiant, est compatible avec les contraintes spécifiques de forte variation de charge et de faible température ? De plus, quel facteur d'accroissement de charge est acceptable pour le maintien du niveau de rejet demandé ?

Et sur le plan économique, comment ventiler de façon équitable les coûts d'investissement et d'exploitation parmi les usagers compte tenu des très courtes périodes d'utilisation des ouvrages à leur capacité nominale (3 semaines à Noël et 3 semaines en février).

Quoi qu'il en soit, dans l'hypothèse où la nitrification est effectivement demandée en raison du débit d'étiage hivernal qui est concomitant avec la charge de pointe, le Cemagref avec la collaboration de l'agence de l'eau Rhône-Méditerranée et Corse ont engagé une étude portant sur une technique qui semble particulièrement adaptée à la problématique - la biofiltration - et ce pour plusieurs raisons :

sa compacité permet sa mise en place dans des conditions topographique et climatique difficiles, sa modularité permet une adaptation relativement aisée à la variation saisonnière des charges,

Cette note de synthèse aborde de nombreux aspects à connaître pour répondre à la problématique :

elle rappelle les variations de charge standard pour ce type de collectivité, les principaux mécanismes de la nitrification et ses facteurs limitants,

elle évalue la capacité nitrifiante à des faibles températures,

elle définit, à partir de la technique dite de rotation (maîtrisée ou aléatoire) mise en place par les constructeurs, les autres solutions envisageables comme l'ajout de substrat azoté et une gestion des ouvrages plus appropriée à l'approche de la saison de pointe, afin d'assurer la mise en place d'une capacité de nitrification adéquate pour répondre à la montée de charge brutale.

De plus, ce suivi a permis d'étudier l'impact des eaux de lavage (riches en nitrates) des biofiltres sur la décantation primaire, ces retours pouvant, en raison de la dénitrification, entraîner une perte de MES préjudiciable à la biofiltration.

2 METHODOLOGIE

L'étude a été menée sur deux sites réels équipés de biofiltres, les stations d'épuration intercommunale de la vallée de l'Ubaye (05) et de la vallée des Aravis (74). Elle s'est déroulée durant plusieurs périodes hivernales (de 1999 à 2003) avec des suivis principalement de 24 h à différentes fréquences selon les objectifs recherchés. Elle a permis d'apprécier :

l'évolution de la température des influents,
l'évolution des débits, concentrations et flux de polluants,
les performances réelles des installations.

Le principal problème des stations biologiques à charge variable étant leur faible capacité nitrifiante existante à l'approche de la saison de pointe, le mode de préparation des cellules à un fort accroissement de la charge a été étudié selon plusieurs approches.

Ensemencement.

Une cellule a étéensemencée avec des boues nitrifiantes issues des lavages des filtres nitrifiants ainsi qu'avec des bactéries nitrifiantes du commerce pour étudier l'effet de cet ensemencement sur la capacité nitrifiante. Dans le cas de l'utilisation d'eaux sales (ou eaux de lavages), l'ensemencement a été effectué sur une période de plusieurs jours en alimentant alternativement les filtres avec des eaux de lavage (biomasse) et des eaux décantées (substrat). L'alimentation en eaux décantées se faisait à faible vitesse afin de faciliter l'accrochage de la biomasse. Dans le cas de l'utilisation de bactéries du commerce, l'ensemencement s'est déroulé sur une période très courte (1 heure), la cellule a ensuite été mise en veille durant 2 jours avec un apport limité d'eau usée pour permettre le développement de biomasse nitrifiante et son accrochage sur le support.

Apport d'azote ammoniacal externe.

Pour pallier la sous-charge d'azote ammoniacal et développer la biomasse adaptée à la pointe de charge, des cellules ont été alimentées avec un effluent enrichi en azote ammoniacal.

Mise en rotation des cellules alimentées.

Cette technique, mise en place sur les installations étudiées, consiste à adapter avant la saison le nombre de cellules en fonctionnement simultané à la charge à traiter de façon à ce que chaque cellule en filtration traite une charge équivalente à sa charge nominale. Lors de son alimentation, chaque cellule constitue donc une biomasse nitrifiante correspondant à la charge nominale de la cellule. Les cellules sont alimentées par rotation et l'ensemble de cellules élabore donc une biomasse nitrifiante correspondant à la *charge nominale de la station d'épuration*.

Cette alimentation par rotation conduit à des périodes alternées d'arrêt et d'alimentation. Ce mode de fonctionnement repose donc sur la capacité d'une cellule non alimentée à conserver sa biomasse nitrifiante en activité. Des cellules en rotation ont été suivies afin d'apprécier l'impact de la durée et des conditions de veille (aérées ou non-aérées) sur l'évolution de la capacité nitrifiante. Différents cycles de rotation (1 jour à 5 jours d'arrêt) ont ainsi été testés.

Par ailleurs, certaines cellules ont été mis au repos complet entre les périodes de pointe de charge à traiter (été – hiver). Leurs redémarrages ont été suivis afin de connaître la capacité d'un filtre non alimenté durant plusieurs mois à conserver sa biomasse nitrifiante active.

3 MATERIELS ET METHODES

Installations de traitement

Les deux stations d'épuration suivies traitent des effluents uniquement domestiques collectés par des réseaux mixtes (séparatifs et unitaires), issus de communes connaissant une très forte activité touristique (stations de sports d'hiver).

Les données qui ont servi de base au dimensionnement des installations sont résumées dans le tableau 1.

		Barcelonnette		Aravis	
		Haute Saison	Basse Saison	Haute Saison	Basse Saison
Capacité nominale	Eq. hab.	45 000	/	29 000	3 535
Température	°C	≥ 8		≥ 8	
Flux hydraulique					
Débit journalier nominal de temps sec	m ³ .j ⁻¹	9 000	2 250	5 800	530
Débit horaire nominal de pointe	m ³ .h ⁻¹	1 100		800 (biologique)	
Flux polluants à traiter					
DCO	Kg.j ⁻¹	4 950	1 236	4 348	530
DBO ₅	Kg.j ⁻¹	2 250	563	1 739	212
MES	Kg.j ⁻¹	4 050	1 013	1 963	181
NTK	Kg.j ⁻¹	540	135	282	28
PT	Kg.j ⁻¹	180	45	112	11
Amplitude variation de flux		4		8 – 10	

Tableau 1 : Données de dimensionnement

(On notera au passage les rapports NK/DCO très différents retenus pour les deux sites : 11% à Barcelonnette et 6,5% aux Aravis).

Ces stations doivent répondre aux objectifs de qualité présentés au tableau 2. Pour le site de Barcelonnette, le cahier des charges impose la prise en compte du paramètre le plus contraignant parmi la concentration et le rendement, ceci sur des échantillons moyens journaliers. De plus, la qualité du traitement doit être conforme aux exigences tant que l'augmentation du flux journalier de DBO₅ reçu par l'installation n'excède pas, du jour au lendemain, 650 %.

	Barcelonnette		Aravis
	Concentration maximale du rejet (en mg.L ⁻¹)	Rendement d'élimination minimum (en %)	Concentration maximale du rejet (en mg.L ⁻¹)
DCO	125	75	125
DBO ₅	25	80	15
MES	35	90	35
NTK	12	/	10
PT	2	/	2

Tableau 2 : Objectifs de qualité

A partir de ces données et compte tenu des contraintes locales, le système ayant été retenu est le procédé biofiltration :

pour le site de Barcelonnette, de type Biostyr[®], développé par la société OTV, avec un traitement du carbone et de l'azote en un seul étage (nitrification secondaire).

pour le site des Aravis, de type BIOPUR, développé par la société VA TECH WABAG, avec un

traitement du carbone et de l'azote en deux étages (nitrification tertiaire).

Les principales étapes du traitement et leurs caractéristiques spécifiques sont résumées dans le tableau 3 :

	Barcelonnette	Aravis
pré-traitements : pré-dégrillage, dégrillage fin, dessableur-deshuileur		
Maille du dégrillage	40 mm + 6 mm	15 mm + 3 mm
traitement primaire de type physico-chimique		
Type et nombre de décanteur	2 décanteurs lamellaires	
Réactifs physico-chimiques utilisés	FeCl ₃ ; polymère et lait de chaux	
Vitesse ascensionnelle de pointe exprimée(en surface totale projetée)	1.3 m ³ .m ⁻² .h ⁻¹	1.41 m ³ .m ⁻² .h ⁻¹
traitement biologique composé de cellules de biofiltration à courant ascendant		
Type de biofiltre (Nombre de cellules)	BIOSTYR [®] (8)	BIOPUR C (3) + BIOPUR NK (6)
Matériau	billes de polystyrène	Mella aqua + argile expansée
Hauteur de massif / Volume par cellule	3 m / 82 m ³	5,4 m / 97 m ³ + 4 m / 72 m ³
Particularités	alimentation spécifique par cellule (une pompe par filtre)	Absence d'alimentation spécifique par cellule

Tableau 3 : Caractéristiques dimensionnelles.

Les principaux paramètres de fonctionnement, basés pour chaque site sur la totalité des cellules en filtration, sont résumés au tableau 4.

		Barcelonnette		
			secondaire	tertiaire
Charge hydraulique en pointe	m.h ⁻¹	3.8	14.8	7.4
avec 1 cellule en lavage	m.h ⁻¹	4.4	22.2	8.9
Charge volumique DCO	Kg.m ⁻³ .j ⁻¹	2.6	4.77	2.12
Charge volumique DBO ₅	Kg.m ⁻³ .j ⁻¹	1.32	2.09	0.28
Charge volumique MES	Kg.m ⁻³ .j ⁻¹	0.57	1.35	0.43
Charge volumique NK	Kg.m ⁻³ .j ⁻¹	0.75	0.89	0.64

Tableau 4 : Principaux paramètres de fonctionnement

Compte tenu de la fraction disponible à la nitrification obtenue à partir de l'azote NK des eaux brutes (dont on retranchera l'azote organique particulaire réfractaire), la part assimilée et la

concentration en NK de sortie retenue, le dimensionnement des installations implique, à une température de 8°C, les capacités de nitrification suivantes :

	Barcelonnette	Aravis
Capacités de nitrification de dimensionnement (kg de N-NO ₃ ⁻ .m ⁻³ de matériau.jour ⁻¹)	0.58	0.45

Il est à noter, que le site des Aravis traite par digestion les boues d'une autre station d'épuration à capacité équivalente située à proximité, ce qui occasionne des flux de retours plus importants lors de la déshydratation des boues.

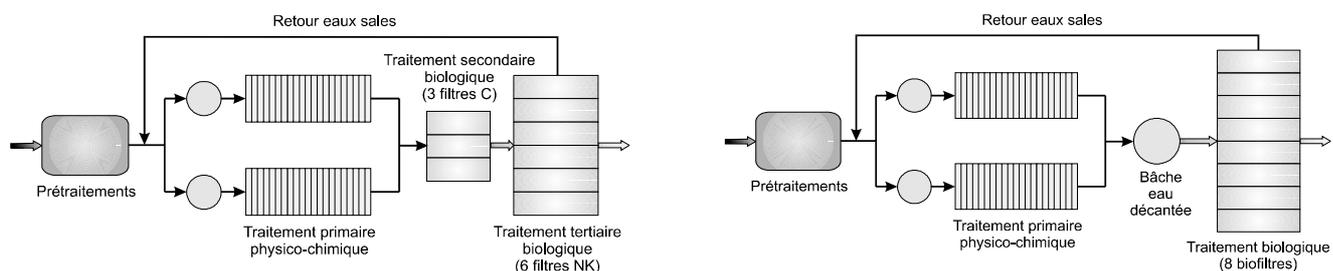


Figure 1 : Schémas des filières de traitement

Prélèvements, mesures de débits et capteurs divers

Des préleveurs réfrigérés et différents capteurs (pH, température, oxygène...) sont installés sur chaque site aux différentes étapes du traitement. L'analyse plus fine de la nitrification a nécessité le suivi amont (bâche eau décantée ou canal d'alimentation des filtres) et aval (courant ascendant : surface des cellules suivies) de certaines cellules.

Des mesures de débit ont été réalisées pour vérifier la validité des différents débitmètres installés sur les stations (ultra-son ou électromagnétiques sur conduite). Le volume d'eau traitée par les filtres est déterminé à partir du débit vérifié de chaque pompe alimentant les cellules (une pompe par cellule) ou par mesure directe en entrée filtre.

Analyses

Chaque échantillon collecté est analysé rapidement sur le terrain pour les paramètres à évolution rapide (DCO dissoute et totale) et ensuite réparti en deux flacons (un brut et un filtré) bloqués à l'acide et stockés à 4°C pour les autres paramètres avant analyses au Laboratoire de Chimie du Cemagref.

Tous les paramètres ont été obtenus par des dosages suivant les méthodes normalisées AFNOR [NF T 90-101, NF T 015-1, NF T 015-2, EN 25663, EN ISO 13395].

4 RESULTATS

4.1 Les eaux usées brutes

La température

L'évolution de la température à l'entrée des installations (poste de relèvement) sur deux années différentes est représentée à la figure 2.

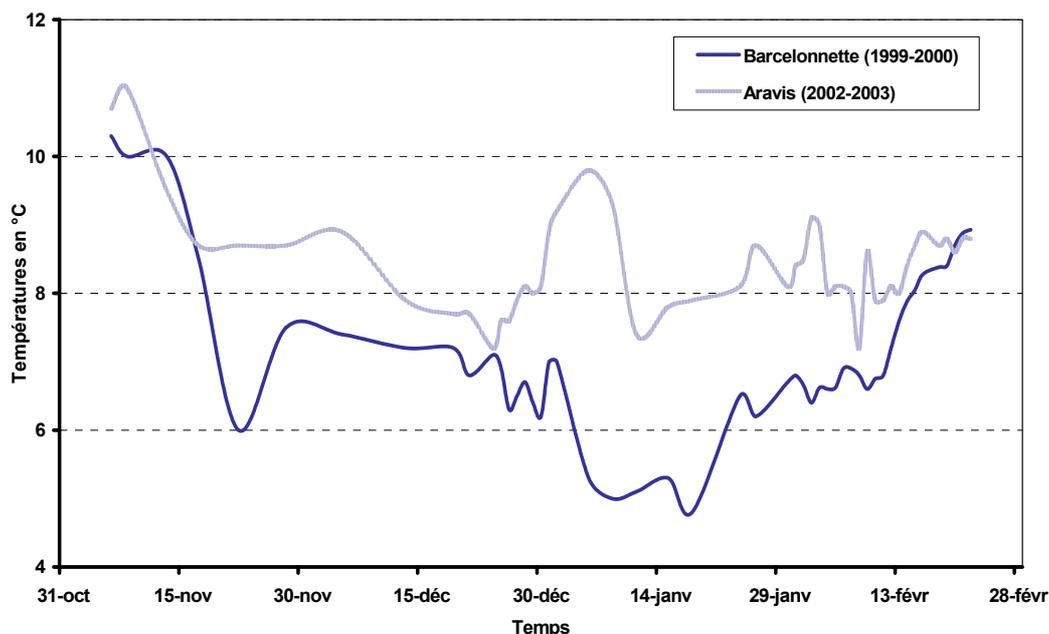


Figure 2 : Evolution de la température en entrée de station

La température de l'influent entre fin novembre et mi-février se situe en dessous de 8°C pour Barcelonnette, valeur sous laquelle les garanties de traitement demandées au cahier de charge pour cette installation ne peuvent plus être exigées. Elle est légèrement plus élevée pour les Aravis.

Durant cette période, la température de l'eau fluctue en fonction de la température de l'air et/ou des précipitations, l'augmentation d'un de ces deux paramètres entraînant la fonte des neiges qui, en retour, abaisse la température de l'influent.

La comparaison des températures mesurées en entrée station et en sortie réacteur biologique révèle une augmentation de 1,5 à 1,8°C. Cette élévation est fonction du temps de séjour dans les ouvrages (qui peut être relativement élevé en raison de la sous-charge hydraulique) et du réchauffement des effluents par l'air injecté dans certains ouvrages (dégraisseurs et biofiltres). On retiendra sur d'autres installations une augmentation moyenne de l'ordre de 1°C entre l'arrivée des influents et la sortie des biofiltres. Ce point est important à préciser lors des clauses de garantie.

Evolution du flux d'azote à traiter

L'évolution du flux d'azote entrant sur les installations au cours de l'hiver permet d'apprécier la montée en charge en fonction du temps (figure 3).

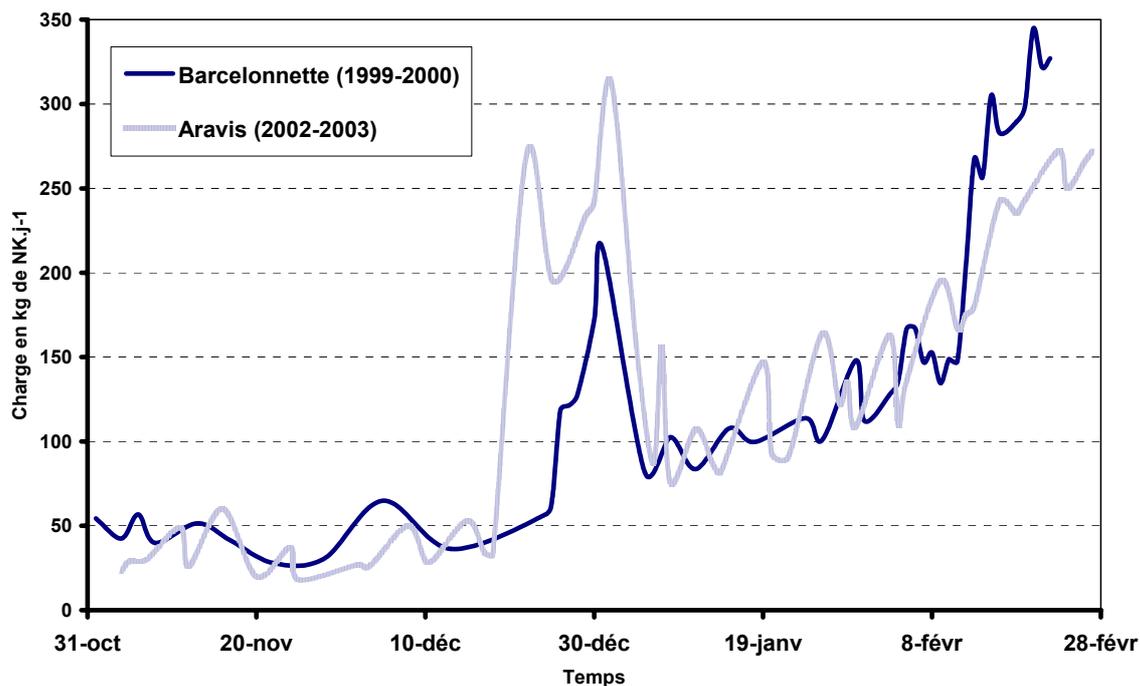


Figure 3 : Evolution du flux en NK entrant

On observe pour les deux installations des courbes relativement proches avec toutefois des allures différentes au moment des pointes de charges à traiter. Le comportement de ces pointes est principalement fonction du degré d'enneigement, favorable à l'arrivée de touristes.

Aux Aravis le flux avant saison se situe à 35 kg NK.j^{-1} et atteint des valeurs de 330 kg NK.j^{-1} à Noël. A Barcelonnette la charge à traiter avant saison se situe à 50 kg NK.j^{-1} et le maximum est atteint au mois de février avec un niveau de 350 kg NK.j^{-1}

L'amplitude maximale et la vitesse d'augmentation de charge pour chaque site sont résumées au tableau 5.

	Amplitude maximale	Facteur maximum d'augmentation par jour
Aravis	10	2
Barcelonnette	7	1.85

Tableau 5 : Caractéristiques des augmentations de charge observées

L'amplitude de la variation des charges d'un facteur 4, retenue pour le dimensionnement de Barcelonnette, n'est donc pas adaptée.

Les vitesses de variation les plus fortes sont observées principalement à l'occasion des vacances scolaires de Noël et dans une moindre mesure en février et révèlent une augmentation de l'ordre du doublement de la charge en 24 h.

Sur la base de ces observations, on retiendra pour la suite par hypothèse le scénario d'évolution de la charge à traiter suivant pour des collectivités touristiques d'activité hivernale:

Périodes	Taux de charge
Noël - Période critique pour le traitement (facteur d'augmentation maximale)	80 % de la charge
Nouvel an et périodes de vacances scolaires de février	100 % de la charge (= capacité nominale de la station)
1 ^{er} jour des vacances mais variable selon les collectivités	Passage de la Basse à la Haute saison

Tableau 6 : Scénario d'évolution dans le temps de la charge à traiter

L'ammonification

A l'entrée des stations, le taux d'ammonification est en moyenne de 68 % avec comme extrêmes 58 % et 76 %, en fonction du temps de séjour des effluents dans le réseau (pointe hydraulique).

Le flux d'azote ammoniacal mesuré en entrée des biofiltres nitrifiants est différent. Il augmente par la poursuite de l'ammonification sur le 1^{er} étage de traitement et par un apport de $N-NH_4^+$ lié aux retours des eaux de la filière boue (surtout pour les Aravis). Il diminue, dans le cas des Aravis, par l'assimilation au niveau des filtres à traitement du carbone préalable. Globalement il est réduit de l'ordre de 20 à 25 % en raison de l'assimilation bactérienne.

4.2 La capacité de nitrification

Capacité de nitrification en basse saison

Deux observations mettent en évidence que ces capacités sont faibles pendant la basse saison et plus particulièrement à sa sortie, avant la montée en charge.

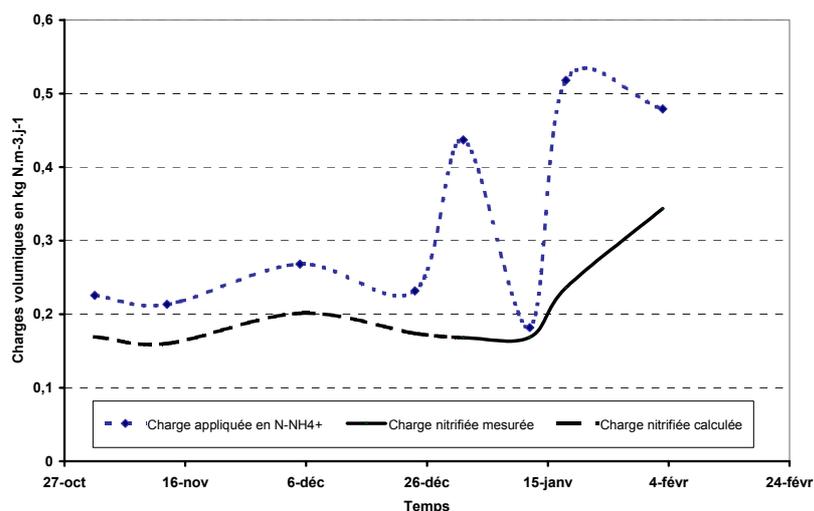


Figure 4 : Evolution des charges volumiques appliquées et nitrifiées sur la station de Barcelonnette

La **première** observation concerne l'année de démarrage de la station de Barcelonnette qui a été mise en route en septembre 1999. Les charges volumiques d'azote appliquées et nitrifiées sur l'ensemble de la filière pendant l'hiver 1999/2000 jusqu'au début février sont représentées à la figure 4. L'état d'ensemencement d'une cellule par de la biomasse nitrifiante est évalué par la

quantité de nitrates formés ramenée au m³ de matériau et par cycle de filtration de 24 heures consécutives.

On constate, dans un premier temps, une faible charge volumique appliquée qui limite la quantité de biomasse autotrophe et donc la quantité de nitrates formée. Toutefois la nitrification est complète car la quantité nitrifiée est proche de la différence entre l'azote appliqué moins l'azote assimilé. Puis, lorsque la charge volumique appliquée en azote augmente, la quantité de nitrate formée augmente également, mais d'une façon plus lente comparée à l'évolution importante de la charge appliquée. Cette faible évolution s'explique par la vitesse de croissance de la biomasse autotrophe relativement faible à la température étudiée. La capacité nitrifiante (biomasse) observée n'était donc pas suffisante pour le respect de la qualité des eaux rejetées.

	valeurs projet	valeurs mesurées
charge volumique appliquée en azote kjeldahl en kg de N.K.m ⁻³ de matériau.jour ⁻¹	0.75	de 0.25 à plus de 0.8 (soit 0.52 en N-NH ₄ ⁺)
charge volumique en nitrates formés en kg de N-NO ₃ ⁻ .m ⁻³ de matériau.jour ⁻¹	0.58	0.18 à 0.34

Tableau 7 : Charges volumiques appliquées et formées

Une **deuxième** observation concerne les capacités nitrifiantes de cellules mises à l'arrêt durant une période de plus de 100 jours (non alimentées et non aérées). Les résultats moyens obtenus, sur les deux sites, sont rassemblés dans le tableau 8.

	Barcelonnette	Aravis
Température dans le filtre	8.6°C	10°C
Temps d'arrêt	114 jours	112 jours
Protocole durant l'arrêt	Pas d'aération, pas de lavage, renouvellement de l'eau de surface	Pas d'aération, pas de lavage
Capacité nitrifiante en kg de N-NO ₃ ⁻ formé.m ⁻³ de matériau.jour ⁻¹	≈ 0.3 dès la seconde filtration	≈ 0.04 durant 15 jours de filtration

Tableau 8 : Capacité nitrifiante après mise à l'arrêt prolongée des cellules

Sur la station de Barcelonnette, lors de la remise en route d'une cellule nitrifiante et après 24 heures de filtration, un niveau de nitrification élevé se situant à une valeur proche de 0.3 kg de N- NO₃⁻ formé.m⁻³ de matériau.jour⁻¹ est observé. Ce résultat révèle qu'une partie de l'ancien ensemencement est immédiatement re-mobilisable, par contre le développement de biomasse est très lent par la suite.

Sur la station des Aravis, aucun développement de la capacité de nitrification n'est observé durant 15 jours de suivi. Ce résultat est à rapprocher de facteurs limitants la nitrification car le développement des autres filtres en fonctionnement était également très faible durant cette période.

Au vu de ces résultats, le niveau de la capacité de nitrification à l'issue de la basse saison est donc faible et le redémarrage d'une cellule trop lent pour pouvoir faire face à l'augmentation rapide de la charge. Un ensemencement préalable lors de la remise en route est donc nécessaire.

Capacité nitrifiante maximale

La capacité de nitrification maximale a été déterminée en augmentant la charge volumique appliquée permettant le développement de la biomasse autotrophe par la mise à l'arrêt d'un certain nombre de cellules et l'apport de l'ensemble du débit sur les cellules restant en fonctionnement (sans pour autant dépasser la capacité hydraulique de ces cellules).

Le suivi de ces biofiltres alimentés à une charge importante sur une longue période et en l'absence de facteur limitant (oxygène, pH, C minéral, P-PO₄...) a permis d'atteindre la capacité maximale de nitrification du système à une température donnée (figure 5).

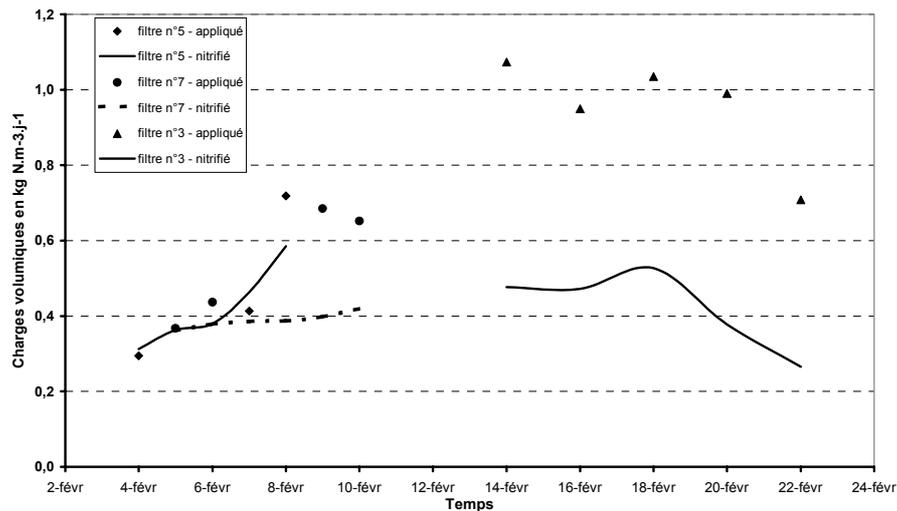


Figure 5 : Evolution des charges volumiques appliquées et nitrifiées sur la station de Barcelonnette après le 4 février

Sur la station de Barcelonnette, en régime stable et avec plusieurs essais, la capacité maximale de nitrification obtenue est de 0,59 kg de N-NO₃⁻ formé.m⁻³ de matériau.jour⁻¹ à une température de 6,5°C de l'influent, soit 8 °C dans le réacteur biologique. Cette capacité est maximale puisqu'un résiduel d'azote en sortie de quelques mg.L⁻¹ reste disponible à la nitrification (< 12 mg.L⁻¹ de NTK), illustrant une utilisation totale du volume de matériau.

Sur le site des Aravis, la capacité maximale en haute saison (et à basse température) n'a pas pu être obtenue, la charge volumique appliquée étant limitée par la capacité hydraulique des filtres et par de fortes concentrations en matières en suspension liées au traitement amont (décanteur primaire et filtres carbone) induisant des colmatages prématurés des cellules.

Vitesse d'augmentation de la capacité de nitrification

La vitesse d'augmentation de la capacité de nitrification, exprimée en kg de nitrate formé par m⁻³ de matériau et par cycle de 24 heures de filtration et par jour, est étudiée sur plusieurs périodes hivernales. Des valeurs très différentes, allant de 0,01 à 0,06 kg de N-NO₃⁻ formé. m⁻³ jour⁻² sont mesurées. Ces différences importantes sont étroitement liées à l'historique du filtre suivi, au taux d'ensemencement initial et aux paramètres influençant la nitrification, en particulier la part de DCO dissoute ou totale appliquée, le carbone minéral, le pH....

On retiendra, en régime stabilisé et en l'absence de facteur pénalisant la nitrification, une vitesse moyenne d'augmentation de la capacité nitrifiante de 0,03 kg de N-NO₃⁻ formé.m⁻³ j⁻², pour des températures de 8 à 11°C dans la cellule. Cette valeur correspond, pour une capacité nitrifiante

présente de l'ordre de $0,3 \text{ kg de N-NO}_3^- \text{ formé.m}^{-3} \text{ j}^{-1}$, à un accroissement de la biomasse autotrophe de l'ordre de 8 à 10 % par jour.

A ces faibles températures la vitesse de développement de la biomasse est donc trop lente pour répondre à un doublement, en 24 heures, de la charge appliquée. Ainsi, le respect de la qualité des eaux de sortie lors d'une montée en charge importante voir brusque nécessite la mise en route de cellules de filtration ayant déjà une capacité de nitrification considérable. Pour cela, une préparation des filtres doit être envisagée bien avant la période de pointe de charge.

4.3 Préparation des cellules de biofiltration

L'obtention d'une réponse rapide avec des performances élevées en nitrification de la part des cellules de biofiltration face à une brusque montée en charge nécessite une préparation préalable des filtres. Différents modes de préparation des cellules de biofiltration pour installer une biomasse autotrophe suffisante ont été testés.

Ensemencement par des boues issues de cellules nitrifiantes ou apport externe de bactéries du commerce

Une première manière d'augmenter avant la saison de pointe la biomasse nitrifiante est un ensemencement préalable des cellules, sous-alimentées ou à l'arrêt, par des boues autotrophes.

Sur la station de Barcelonnette, un filtre préalablement ensemencé avec des eaux de lavage issues de biofiltres nitrifiants, en fonctionnement lors de la basse saison, a fait l'objet d'un suivi (figure 6). La capacité de nitrification mesurée révèle un comportement proche des filtres non ensemencés avec une légère augmentation des capacités de nitrification dès les premiers cycles de filtration, ce qui montre une biomasse plus rapidement active compte tenu de son état de fraîcheur.

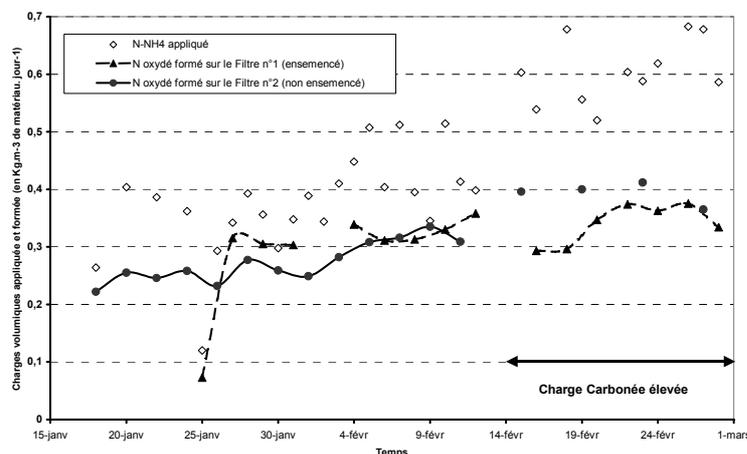


Figure 6 : Evolution des charges volumiques appliquées et nitrifiées sur un filtre non-ensemencé et un filtre ensemencé avec des boues nitrifiantes.

Il convient toutefois d'être prudent sur l'interprétation définitive de ces résultats puisque ces essais n'ont été réalisés qu'une seule fois. En outre, la faible concentration en matières en suspension ($< 0,5 \text{ g MES.L}^{-1}$) des eaux de lavage injectées dans le massif filtrant lors du pré-ensemencement a conduit à un faible ensemencement et les faibles charges appliquées en N-NH_4^+ à certaines périodes du suivi ont limité le potentiel de développement de cet ensemencement.

Des essais avec ajout de bactéries autotrophes du commerce ont également été réalisés. Les résultats

obtenus n'ont pas été significatifs concernant l'activité nitrifiante et s'expliquent par :

des quantités de bactéries trop faibles, mais des doses supérieures entraîneraient des coûts trop importants et non-envisageables.

un lessivage important de la biomasse introduite dès les premières heures de filtration.

Pour l'avenir, cette problématique d'ensemencement devra être approfondie, en particulier par l'utilisation de biomasse issue d'installation nitrifiante.

Ajout artificiel d'une source d'azote ammoniacal

Dans le cas où la biomasse autotrophe est certes implantée mais en faible quantité, une autre méthode d'augmentation de cette biomasse a consisté en l'ajout d'azote "exogène" sous forme d'ammoniaque : NH_4OH (nom commercial : alcali). En effet, avant la saison de pointe le flux d'azote est trop faible pour développer une biomasse nitrifiante et l'ajout artificiel d'une source d'azote peut combler ce manque. Cette technique a été étudiée sur différentes cellules. Les quantités journalières injectées ont été déterminées sur la base d'une vitesse de développement de la capacité nitrifiante de 10% par jour, afin d'éviter une trop forte concentration d'azote ammoniacal artificiel non traité en sortie d'installation.

A titre d'exemple on présente le suivi d'une cellule faiblementensemencée ($0.21 \text{ kg de N-NO}_3^- \text{ formé. m}^{-3} \text{ jour}^{-1}$) qui a été réalisé sur le site des Aravis fin août-début septembre 2002. La cellule suivie est en filtration continue (avec systématiquement un lavage par jour), l'apport d'alcali étant modulé journalièrement en fonction de l'évolution de la charge en eau usée pour ne pas dépasser 15% d'augmentation journalière (en relation avec le taux de croissance).

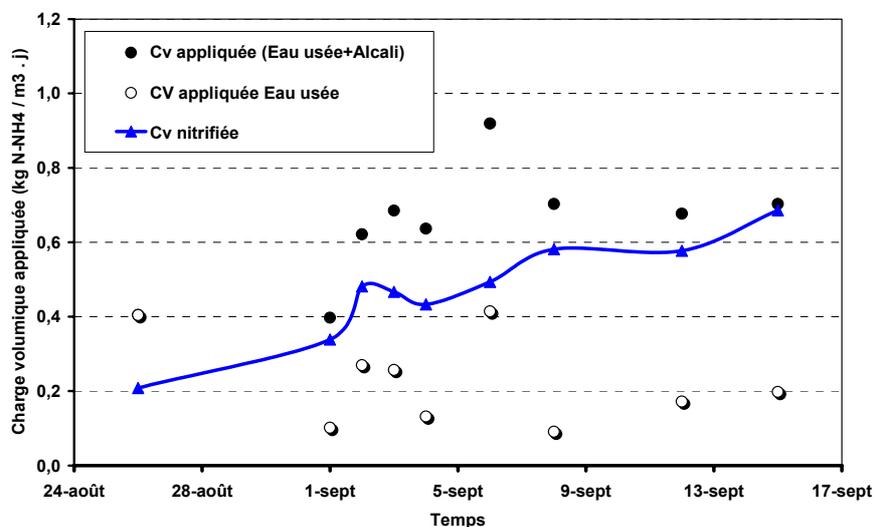


Figure 7 : Evolution des charges volumiques appliquées (avec apport d'Alcali) et nitrifiées sur un filtre.

Pour une température dans le réacteur de 18°C , le filtre atteint une capacité de nitrification de $0.69 \text{ kg de N-NO}_3^- \text{ formé. m}^{-3} \text{ jour}^{-1}$ après 20 jours de filtration. La vitesse d'augmentation de la capacité de nitrification était donc en moyenne $0.024 \text{ kg de N-NO}_3^- \text{ formé. m}^{-3} \text{ jour}^{-2}$. Le taux de croissance de la biomasse a donc évolué d'environ 11% initialement à environ 3 % à la fin de la période. Cette valeur finale n'est pas optimale et peut être rapprochée du faible pH et du carbone minéral (HCO_3^-) qui a fait défaut certains jours. L'obtention d'un tel développement de la nitrification à cette période n'aurait pas été possible sans l'apport d'une source azotée extérieure.

Cette technique implique des contraintes d'exploitation importantes dues au suivi journalier de l'injection (réglage journalier de la pompe d'alimentation, gestion des stocks d'ammoniacque, suivi du pH, de l'oxygène et du carbone minéral, apport extérieur de carbone minéral) et elle ne pourra être retenue que dans des conditions bien précises en complément de la méthode de « rotation » décrite ci dessous.

Application d'une charge élevée sur les cellules par rotation

La dernière méthode de préparation des biofiltres est la technique dite par « rotation ». Elle correspond à la technique la plus séduisante et a fait l'objet de suivis approfondis.

Le principe repose sur l'utilisation de l'azote des eaux usées pour la mise en place avant la saison de pointe d'une biomasse nitrifiante suffisante. A cet effet, chaque cellule, avant l'arrivée de la pointe de charge, est alimentée par rotation, à une charge volumique proche de la charge volumique de la période de pointe, grâce à l'arrêt d'un certain nombre d'autres cellules. Dans le schéma suivant, on suppose une installation à 4 cellules dont la charge nominale globale en pointe est 400, la charge étant seulement de 100 à la basse saison.

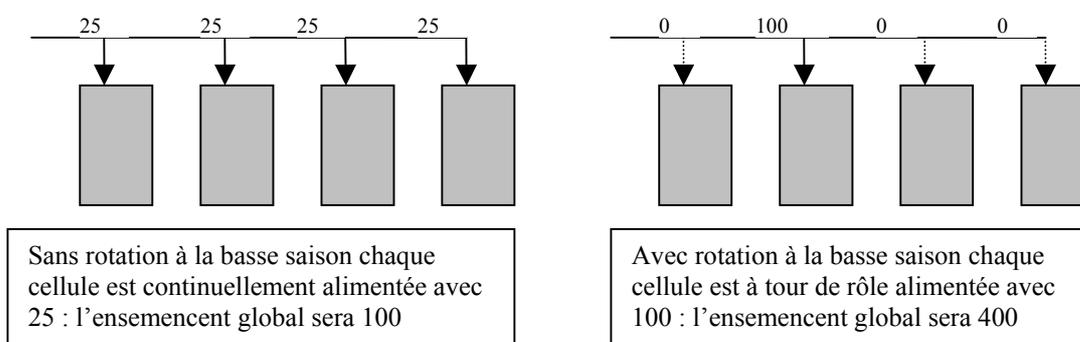


Figure 8 : Schéma de principe de la rotation des biofiltres.

Cette méthode permet de développer sur le matériau de chaque cellule la quantité de biomasse adaptée à cette charge de pointe. L'option prise est l'alimentation de chaque cellule pendant une journée et l'arrêt plus ou moins long en fonction du nombre de cellules total participant à la rotation.

Le succès du mode de fonctionnement par rotation des cellules alimentées repose donc sur la capacité des cellules non alimentées à conserver leur biomasse pendant la veille. Dans ce cas, on parle de rotation maîtrisée.

La rotation aléatoire correspond à l'ouverture de cellules en fonction de la qualité des eaux rejetées. Les cellules sont ainsi à l'arrêt ou en alimentation à des pas de temps irréguliers et indéterminés. Ce mode de fonctionnement permet un gain d'ensemencement mais plus faible en raison d'une alimentation (ou nombre de cellules en fonctionnement) aléatoire.

Effet de la durée d'arrêt

La capacité à conserver la biomasse nitrifiante lors de l'arrêt de l'alimentation a été testée en étudiant l'évolution de la capacité de nitrification (augmentation, maintien ou chute) en fonction des durées de non-alimentation imposées. La durée de filtration est toujours fixée à 24 heures consécutives suivies d'un lavage immédiat avant l'arrêt de la cellule. Les résultats obtenus sont synthétisés dans le tableau 9 suivant.

Cycles testés	24 h / 3 jours	24 h / 4 jours	24 h / 5 jours
Résultats	Croissance	Croissance	Maintien
Remarques	Alimentation en eau usée seule ou complétée avec de l'Alcali.	Alimentation en eau usée complétée avec de l'Alcali.	Alimentation en eau usée seule Présence de facteur limitant (pH, carbone minéral)

Tableau 9 : Développement de la capacité de nitrification en fonction du cycle de rotation testé.

Ces résultats montrent que, sans facteur limitant, des durées d'arrêt pouvant atteindre 5 jours (dans le cas de 6 cellule en rotation) peuvent être appliquées tout en maintenant une biomasse en activité au sein des filtres voir 4 jours en la développant. Une telle rotation permet donc de faire face à une augmentation de charge d'un facteur 6.

Par sécurité, on retiendra une durée d'arrêt maximale de 4 jours, car pour ce cycle de rotation les résultats ont montré une *croissance* de l'activité de la biomasse autotrophe.

Effet du mode de gestion des cellules maintenues en veille

La capacité à maintenir en bon état la biomasse nitrifiante peut également dépendre du mode de gestion de la cellule maintenue à l'arrêt. Les résultats précédents où la biomasse n'a pas perdu de son activité, ont été obtenus avec 2 minutes d'aération toutes les 2 heures lors des périodes de « veille » (préconisation du constructeur) ou en aération continue à faible débit.

Trois modes de gestion de l'aération différents pendant l'arrêt des cellules ont été testés sur un cycle de rotation comprenant une durée de veille de 3 jours :

- mode 1 : 3 minutes d'aération par cycle de 2 heures,
- mode 2 : aération en continu,
- mode 3 : absence complète d'aération.

Les campagnes de mesure des performances ont été réalisées au cours de cycles de filtration de 24 heures. Un cycle sur deux était ainsi suivi durant une période d'un mois (figure 9).

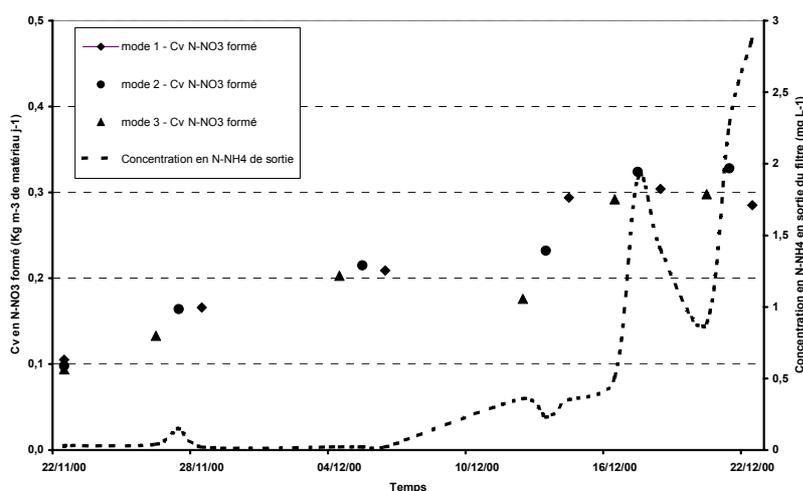


Figure 9 : Evolution de la concentration en N-NH₄ de sortie et de la capacité de nitrification en fonction de différents modes de gestion des cellules en veille

Compte tenu d'un substrat limitant pendant la première période du suivi (N-NH₄⁺ en sortie négligeable) et d'une phase transitoire lors de la montée en charge, les interprétations sont basées

sur les résultats obtenus en fin de suivi (tableau 10).

	Mode 1	Mode 2	Mode 3
Capacité de nitrification (kg de N-NO ₃ ⁻ formé.m ⁻³ matériau.jour ⁻¹)	0.29	0.33	0.30
taux par rapport au mode 2 (en %)	88	100	91

Tableau 10 : Performances de nitrification en fonction du mode de veille testé

On peut considérer que les trois modes sont équivalents mais, compte tenu des résultats obtenus sur une période courte et de l'absence de répétabilité, il convient d'être prudent sur une interprétation définitive.

Un second essai a été réalisé à partir d'un temps de veille de 5 jours et deux modes de gestion de l'aération pendant la période d'arrêt des cellules ont été testés : aération en continu / absence complète d'aération. Une légère baisse de la capacité de nitrification a été observée avec le mode sans aération.

Ainsi, un apport d'oxygène durant la période d'arrêt des filtres est conseillé. Il peut être appliqué de façon syncopee dans le temps. Une durée d'aération de l'ordre de quelques minutes toutes les deux heures est un bon compromis. De plus, le débit d'air insufflé peut être plus faible qu'en filtration normale (niveau bas du variateur de fréquence du surpresseur).

4.4 Impact des eaux de lavage chargées de nitrates sur le 1^{er} étage de traitement en vue de leur épaissement.

De nombreuses installations nitrifiantes équipées du procédé biofiltration sont confrontées à la gestion délicate des eaux de lavage au vu de leur concentration très faible en MES (de l'ordre de 500 mg.L⁻¹) et de la présence de nitrates. Cette très faible concentration en MES nécessite un épaissement souvent prévu sur l'étage primaire mais il existe un risque de flottation des boues en raison d'une dénitrification.

Aussi, compte tenu de la composition de ces eaux, la technique la plus appropriée est l'installation d'un flottateur ou d'un épaissement spécifique par la mise en place d'un décanteur. Son implantation occasionnant un coût élevé, cette configuration n'est retenue que pour les grosses collectivités.

Dans le cas des petites installations, les eaux sales seront le plus souvent recyclées vers le premier étage de traitement équipé d'une décantation lamellaire avec ou sans traitement chimique utilisé. Dans cette configuration, un risque de dénitrification dans cet ouvrage existe compte tenu de la présence simultanée de nitrates (eaux sales), de carbone organique (influent) et des bactéries hétérotrophes. Cette dénitrification peut occasionner une perte de MES entraînées par le dégagement d'azote gazeux et pénaliser ainsi très fortement la filière aval en réduisant la durée du cycle de filtration par un colmatage prématuré du système.

Afin d'apprécier le risque réel de dénitrification, plusieurs campagnes de mesures à débit constant ont été effectuées sur un décanteur primaire, sur une durée de 5 h (équivalent à 2 fois le temps de séjour dans l'ouvrage. Les mesures étaient effectuées lors de la même plage horaire journalière (9 h – 14 h) afin de minimiser les variations qualitatives des eaux brutes (fraction du carbone organique facilement assimilable). La période estivale retenue est favorable à la dénitrification.

Les doses de réactifs appliqués pour cette expérimentation sont regroupées au tableau 11.

Réactifs injectés	Doses appliquées (en mg.L ⁻¹)
Lait de chaux	50
Chlorure ferrique	53
Polymère anionique	0.15

Tableau 11 : Doses de réactifs appliqués

Ces doses sont volontairement deux fois plus faibles que les doses théoriques couramment utilisées pour un traitement physico-chimique classique. En effet, seul l'abattement de la charge particulaire est recherché.

Deux rapports entre le débit horaire des eaux de lavage recyclées et le débit d'effluent brut ont été testés : 50% et 100%. Ces valeurs sont celles rencontrées sur les installations où les eaux de lavage sont restituées en période nocturne. Les conditions des trois essais sur la dénitrification en décanteur primaire figurent au tableau 12.

		Débit horaire (en m ³ .h ⁻¹)	
		Eaux brutes	Eaux de lavages
Essai 1	Absence d'eaux de lavage	200-236	--
Essai 2	+ 50 % d'eaux de lavage	132-136	65-66
Essai 3	+ 100 % d'eaux de lavage	110-120	116-118

Tableau 12 : Conditions des trois essais

Les résultats obtenus à une température de 15°C dans l'ouvrage, exprimés en rendement d'élimination des MES et taux de dénitrification avec et sans réactif, sont les suivants :

		Rendement en MES		Rendement de dénitrification (flux de nitrate éliminé en kg.m ⁻³ .j ⁻¹)	
		sans	avec	sans	avec
Traitement -chimique					
Essai 1	Absence d'eaux de lavage	59 %	85 %	sans objet	
Essai 2	50 % d'eaux de lavage	46 %	73 %	35 % (0.22)	14 % (0.07)
Essai 3	100 % d'eaux de lavage	27 %	86 %	39 % (0.42)	58 % (0.54)

Tableau 13 : Rendement en MES et taux de nitrification obtenus

Ces résultats révèlent :

une dénitrification, exprimée en Kg de N-NO₃⁻ éliminés.m⁻³.j⁻¹, effective dans l'ouvrage avec un rendement d'élimination principalement influencé par la quantité de substrat organique, la quantité de N-NO₃⁻ introduit et le substrat apporté (10 kg de DCOs pour l'essai 2 et en moyenne 23 kg pour l'essai 3).

des rendements en MES plus faibles sans réactifs physico-chimiques et d'autant plus faible que la proportion d'eaux de lavage est élevée. Ce faible rendement s'explique par une remontée de boues qui est liée au dégagement d'azote gazeux lors de la dénitrification pénalisant la qualité des eaux de sortie (confirmé par les rendements de dénitrification).

En conclusion, l'injection de réactifs physico-chimiques permet de lester suffisamment le floc par

coagulation-floculation afin d'éviter la remontée de MES lors de la dénitrification pour les deux pourcentages de retour d'eaux de lavage testés. L'utilisation d'un traitement chimique est donc un bon choix pour les petites installations où la mise en place d'un ouvrage spécifique d'épaississement des eaux sales n'est pas envisageable.

5 DISCUSSION ET SYNTHÈSE

Les résultats acquis permettent :

- de mieux appréhender le dimensionnement des installations de biofiltration et la configuration la mieux adaptée dans le cas du traitement de l'azote,
- de définir plus précisément les différentes règles de gestion de ce type d'installation pour le maintien des objectifs de qualité compte tenu des faibles températures rencontrées et des fortes variations de charge appliquées,
- de préciser les principaux facteurs limitant la nitrification que l'exploitant devra surveiller de près afin d'éviter des dysfonctionnements de traitement sur son site.

5.1 Dimensionnement

Données de base

Le procédé de biofiltration paraît, dans l'état des connaissances actuelles, le seul à même de répondre aux fortes contraintes qui caractérisent certaines collectivités touristiques de montagne : fortes et rapides variations de charge (> 5) et nécessité de nitrification, même si en basse saison les flux sont faibles.

On considère que le procédé de boues activées faible charge (donc nitrifiant) est compatible avec une amplitude de variation d'un facteur 2,5 et même 5 au prix d'une dégradation momentanée de la qualité de l'effluent. Ces limites sont en cours d'étude et seront prochainement vérifiées sur une installation en vraie grandeur.

Toutefois, le procédé de biofiltration est, pour des raisons économiques, difficilement envisageable pour des collectivités inférieures à 10 000 EH. La nécessité de mettre en place, sur une même installation, plusieurs cellules de filtration pour éviter des surcharges hydrauliques au moment des lavages conduit à un coût d'investissement relativement élevé à petite échelle et, par ailleurs, l'exploitation délicate nécessite la présence d'un personnel qualifié impliquant un coût de fonctionnement lui aussi élevé.

Aussi, la détermination des débits et flux à traiter en basse et haute saison, ainsi que la rapidité de leur augmentation, nécessitent elles une attention particulière dans le cas des installations traitant les eaux usées de collectivités touristiques de montagne car une surestimation de l'amplitude de la variation pourrait conduire à orienter les constructeurs vers une filière à biofiltration là où une filière à boues activées serait possible et peut-être préférable au regard de la taille de la collectivité.

De même, il conviendra de bien estimer le flux polluant disponible en basse saison puisque celui-ci conditionne fortement la biomasse autotrophe pouvant être développée, sans l'apport d'azote externe, à l'approche de la pointe touristique.

Volume des filtres

Le volume de matériau à installer, correspondant à la capacité de traitement du réacteur biologique,

est fonction du flux maximum à traiter et de la charge volumique retenue. Les résultats acquis en hiver confirment les possibilités de nitrification à très faibles températures et donnent les valeurs suivantes pour les charges volumiques :

	Barcelonnette	Aravis
Température dans le réacteur (entrée brute)	9.5 °C (7.5)	10.8°C (9.4)
Cv appliquée (en Kg de N-NH ₄ .m ⁻³ de matériau. Jour ⁻¹)	0.9	0.75
Cv nitrifiée (en Kg de N-NO ₃ ⁻ .m ⁻³ de matériau. Jour ⁻¹)	0.55	0.39
DCOs / N-NH ₄	3.4	1.6

Tableau 14 : Charges volumiques appliquées et traitées en azote sur les installations étudiées.

Ces valeurs observées dépendent principalement de la compétition entre les germes autotrophes et hétérotrophes (nitrification secondaire ou tertiaire), du type de procédé et de son support (surface spécifique, granulométrie) et de la présence d'éventuels facteurs limitants plus ou moins contrôlés par l'exploitant lors de nos essais.

Dans le cas où la collectivité envisagerait une augmentation future de sa population, la démarche retenue pour faciliter la gestion de l'installation pourrait être la suivante :

- pour une augmentation de population à très court terme (inférieure à 5 ans), les ouvrages biologiques sont construits et mis en attente (arrêt total des cellules),
- pour une augmentation de population à plus long terme, les ouvrages supplémentaires ne sont pas construits mais la filière disposera d'aménagements en vue de sa future extension.

Nombre de cellules

Le nombre de cellules à installer est fonction des dimensions (surface et volume) de l'unité standard, spécifiques au constructeur, et du facteur de variation de charge du site. Nous avons vu que la préparation des cellules à l'approche de la haute saison par rotation permettait des périodes de non alimentation des cellules d'une durée de 4 jours sans perte de biomasse nitrifiante. Le nombre de filtres limite en rotation est donc 5, puisque au delà de ce nombre la rotation conduit à des temps d'arrêt de cellules supérieurs à 4 jours et à une difficulté de maintenir en place la biomasse nitrifiante. Ainsi :

- Si l'amplitude de la variation de charge est inférieure ou égale à 5, le nombre de cellules devrait correspondre à ce facteur de charge (ou à un multiple pour les collectivités qui ont des flux importants en basse saison) afin de faciliter l'exploitation d'un point de vue «gestion de l'ensemencement» et de maintenir la qualité du rejet.
- Si l'amplitude de la variation de charge supérieur à 5 et monte à une valeur de 10 ou 15, le nombre de cellules ne sera plus en relation directe avec ce facteur et doit tendre vers un nombre inférieur pour faciliter le maintien de la biomasse présente par une rotation avec des durées d'arrêt acceptables et limiter les coûts d'investissement et de fonctionnement (en particulier pour les cellules à ensemenecer lors de leur remise en route).

Ainsi, un nombre de cellules inférieur ou égal à 5 facilite la gestion de la biomasse par rotation.

Au-delà de 5 cellules, deux options se présentent :

une partie des cellules ne sera pas utilisée en basse saison et, préalablement à leur alimentation, il sera donc nécessaire de les ensemenecer d'abord (résultat aléatoire à ce jour) et d'apporter ensuite de l'azote externe afin de permettre le développement de la biomasse introduite

toutes les cellules seront utilisées en rotation (plusieurs cellules par cycle de filtration pour ne pas excéder 4 jours d'arrêt entre chaque alimentation). Cette dernière stratégie permet d'avoir une biomasse présente sur tous les filtres.

5.2 Gestion de la préparation et de la montée en charge

L'*amplitude* de la variation de charge détermine le dimensionnement des filtres et plus particulièrement le nombre de cellules. Le volume global est obtenu par la connaissance du flux maximum à traiter et des charges volumiques retenues. La *vitesse* de variation (pente) détermine les modalités de gestion à l'approche de la pointe touristique. Celles-ci peuvent inclure une simple mise en charge graduelle des biofiltres, une rotation des cellules ou bien, un ajout d'azote externe supplémentaire.

Mise en charge graduelle

La vitesse d'augmentation de la charge admissible est conditionnée par le taux de croissance des bactéries nitrifiantes μ_0 . Ce taux de croissance est fonction de la température (T). Ses ordres de grandeur pour différentes températures sont les suivants :

Température (°C)	8	9	10	11	12	13	14
Taux de croissance μ_0 (j ⁻¹) *	0.1	0.11	0.12	0.13	0.15	0.16	0.18

* Le taux de croissance μ_0 peut-être estimé à partir de la formule suivante :

$$\mu_0 (\text{à la température } T) = 0.33 e^{0.1(T-20)}$$

Le coefficient de 0.33 correspond à la valeur obtenue sur le terrain à 8 °C avec un taux de croissance moyen de 0.1 j⁻¹. La constante de température retenue $K = 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ est une valeur moyenne comprise entre 0.08 et 0.12.

Dès lors que la vitesse d'augmentation ne dépasse pas le taux de croissance, une simple mise en charge graduelle de l'installation permet de faire face à la variation de charge.

Ainsi, par exemple à 10°C et sur 6 jours (cf. annexe 3), on note une augmentation de la biomasse d'un facteur 2 d'où la possibilité de traiter une augmentation d'un même facteur de la charge polluante. On observe une variation de charge admissible peu élevée avec la technique mise en charge graduelle.

Rotation

Dans le cas d'une rotation, la vitesse de variation de la charge admissible est déterminée par deux facteurs :

- le nombre de cellules,
- la vitesse de croissance de la biomasse nitrifiante.

Le nombre de cellules en présence détermine l'augmentation instantanée possible. Ainsi par exemple en présence de 5 cellules (4 jours d'arrêt), le flux pouvant être traité au moment de la pointe est 5 fois celui avant la pointe, même si cette variation se produit d'un jour à l'autre. Ensuite, la montée en charge permet d'augmenter la biomasse nitrifiante de chacune des cellules selon une vitesse qui est limitée par le taux de croissance, d'après :

$$M_t = M_0 \times (1 + \mu_0)^t,$$

où : M_0 = biomasse présente avant la montée en charge
 M_t = biomasse présente après la montée en charge de durée t
 μ_0 = taux de croissance net (j^{-1})
 t = durée de l'alimentation (j)

Ainsi, le taux de croissance net (incluant la mortalité et l'évacuation d'une partie de la biomasse lors de lavages) des bactéries nitrifiantes observées lors de nos mesures s'élève à $0,1 j^{-1}$ à une température de $8^\circ C$. Chaque cellule peut donc augmenter sa biomasse au maximum de 10% par jour. A condition d'être alimentée avec un flux suffisant, la biomasse de l'ensemble des filtres suit donc au maximum l'allure décrite par la figure 10. La capacité nitrifiante y est exprimée en multiple de la capacité initiale d'une seule cellule. Le facteur de variation admissible est donc par exemple environ 9 fois en 6 jours (durée de la montée en charge observée fréquemment au moment de Noël) car :

$$M_t = M_0 (1 + \mu_0)^t$$

pour : $M_0 = 5$ (en raison des 5 cellules alimentées par rotation)
 $\mu_0 = 0.1$

$$M_t = 5 (1,1)^6 = 8,85.$$

Toutefois, ce cas implique :

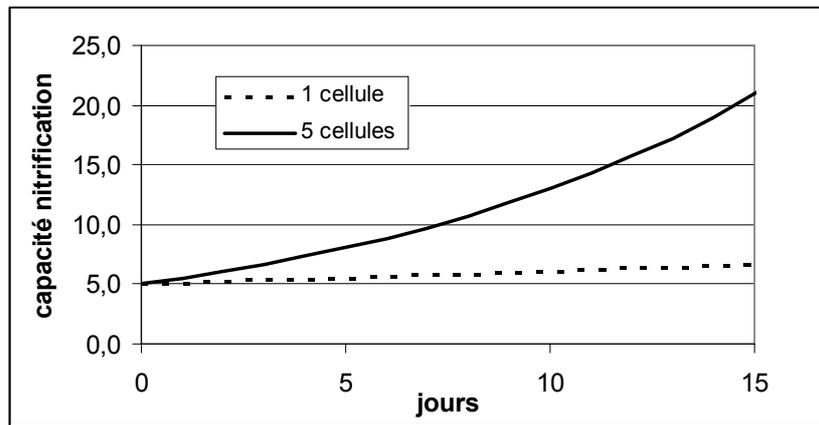
que le flux d'azote soit suffisant, dès le premier jour de la montée en charge, pour alimenter l'ensemble des cellules (5 cellules) simultanément à leur charge nominale, qu'il augmente par la suite à un rythme compatible avec le taux de croissance des bactéries nitrifiantes (10% par jour, soit une fonction exponentielle), sans pour autant dépasser ce rythme.

Cela est peu probable. En réalité on sera amené à alimenter au cours de la montée en charge encore quelques filtres en rotation pour aboutir en fin de période au fonctionnement simultanée de l'ensemble des filtres. Les deux courbes décrites à la figure 10 représentent l'augmentation de la biomasse : la plus élevée correspond au maximum théorique et l'autre a une situation minimum avec la poursuite de la rotation et donc l'alimentation d'une cellule à la fois pendant la période d'augmentation. **Une variation de charge admissible d'un facteur 6 à 7 en 6 jours (2 filtres alimentés / jour au cours de la montée en charge) paraît raisonnablement compatible avec un ensemencement par rotation** dont les différents scénarios pour une installation équipée de 5 cellules de biofiltration sont résumés ci dessous.

Durée de la montée en charge	Facteur d'augmentation de la biomasse au cours de la montée en charge.		
	Maximum	Minimum	Moyenne
	5 filtres alimentés par jour	1 filtre par jour	2 filtres par jour
6 jours	$5 \times (1,1)^6 = 8,9$	$5 \times (1,1)^{1,2*} = 5,6$	$5 \times (1,1)^{2,4} = 6,3$
15 jours	$5 \times (1,1)^{15} = 21$	$5 \times (1,1)^3 = 6,7$	$5 \times (1,1)^6 = 8,9$

* t correspond à la durée d'alimentation d'une cellule (en rotation). t est égal à la durée d'alimentation de la station divisée par le nombre de cellules (ou groupe de cellules) participant à cette rotation.

Tableau 15 : Facteur d'augmentation de la biomasse au cours de la montée en charge



1 cellule : 1 cellule à la fois est alimentée
 5 cellules : Alimentation des 5 cellules à la fois

Figure 10 : Evolutions extrêmes de la biomasse au cours d'une montée en charge.

La contribution de la croissance de biomasse au moment de l'augmentation du flux est donc relativement modeste et la principale contribution vient de la biomasse déjà installée au moment du début de l'augmentation. Pour des augmentations supérieures à un facteur 6 à 7 en 6 jours, il sera donc nécessaire de démarrer avec une biomasse plus importante, ce qui implique l'ajout d'une source d'azote externe.

Rotation avec complément d'azote externe

En cas d'une variation plus forte qu'un facteur 6 à 7 en 6 jours, il est nécessaire de disposer au moment de la montée en charge d'une quantité de biomasse plus élevée. Comme la biomasse pouvant être mise en place est limitée par les flux d'azote disponible avant la saison, la seule façon d'augmenter la biomasse est d'augmenter le flux d'azote à traiter avant saison. Ainsi un doublement du flux d'azote par apport à celui généré par le site permet de doubler la biomasse et une variation de charge d'un facteur 14 en 6 jours devient admissible. **L'utilisation d'une source d'azote externe ne donne pas de limite au facteur de variation admissible.**

L'ajout de l'azote doit commencer bien avant la pointe puisque la croissance des bactéries nitrifiantes est lente. La durée de la période d'ajout dépend :

- du facteur de variation,
- du mode d'alimentation.

La durée qui est fonction du **facteur de variation** peut être calculée de la manière suivante :

$$M_t = M_0 \times (1 + \mu_0)^t$$

si : $M_t / M_0 = \Delta C = (1 + \mu_0)^t$

alors :

$$t = \text{Ln } \Delta C / \text{Ln } (1 + \mu_0)$$

A titre d'exemple : Pour doubler la biomasse d'une cellule ($\Delta C = 2$), il faut donc environ 7 fois 24 heures d'alimentation de cette cellule avec une température dans le réacteur de 8°C (et 6 fois 24 heures à 10°C).

Le **mode d'alimentation** intervient de la manière suivante :

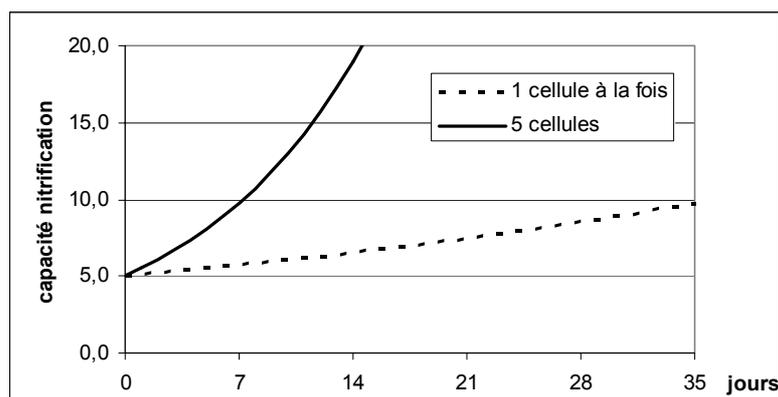
Rotation : Dans l'hypothèse d'un ajout d'azote externe lors de l'alimentation des cellules en rotation avec 1 seul filtre par jour, on peut évaluer à 5 semaines le temps nécessaire pour doubler la biomasse avant la pointe. En effet, 1 filtre doit être alimenté pendant 7 jours pour

en doubler la capacité nitrifiante. Le doublement de la capacité nitrifiante de 5 filtres demande donc 5 fois 7 jours, soit 5 semaines.

Alimentation simultanée. La durée de préparation peut être considérablement raccourcie si l'alimentation des cellules lors de période de préparation ne se fait pas par rotation mais par une alimentation simultanée de l'ensemble des cellules. Un doublement de la biomasse nécessite dans ce cas une semaine seulement. Les flux d'azote externe à fournir quotidiennement seront nettement plus élevés dans ce cas. La quantité d'azote doit permettre à la fois :

d'alimenter les cellules qui étaient à l'arrêt lors de la rotation mais sont en fonctionnement maintenant,

d'augmenter de la biomasse de l'ensemble de ces cellules.



5 cellules : elles sont alimentées toutes les 5 en même temps.
1 cellule à la fois : elles sont alimentées grâce à la rotation.

Figure 11 : Evolutions de la biomasse avec apport d'alcali

5.3 Facteurs déterminant l'ensemencement initial

Le degré d'ensemencement des cellules avant la montée en charge est un paramètre clef. En l'absence de facteurs limitants (Oxygène, pH, $P-PO_4^{3-}$, carbone minéral...), ce degré d'ensemencement des filtres est fonction de la charge à traiter mais aussi de sa stabilité dans le temps. Dans bien des cas sur ce type d'installation, l'ensemencement mesuré en basse saison est faible et inférieur à celui qui serait théoriquement possible au regard de la charge appliquée.

Le principal facteur responsable de cette perte de biomasse autotrophe est l'application sur les cellules d'une charge en azote ammoniacal inférieure à la charge nominale basse saison, due :

à des **surcharges hydrauliques** (apport d'eaux parasites) qui entraînent la mise en filtration de cellules supplémentaires conduisant à la sous-charge azotée des cellules.

à une **nitrification non maîtrisée** en amont des cellules nitrifiantes (configuration en deux étages biologiques en série). Dans cette configuration, le premier étage devra être systématiquement by-passé en basse saison afin d'éviter toute nitrification pénalisant l'ensemencement des filtres nitrifiants situés à l'aval.

Au cours de l'année, d'autres facteurs limitants peuvent engendrer un ralentissement des cinétiques de développement de la biomasse :

les faibles **températures** (le taux de croissance de la biomasse dépend fortement de ce paramètre).

L'effet de la température sur le taux de croissance est de type exponentiel avec une constante de température (k) située entre $0,08$ et $0,12$ $^{\circ}C^{-1}$.

la quantité d'**oxygène** apporté insuffisante (les besoins sont estimés à $4,2$ kg d'oxygène par kg d'azote ammoniacal à nitrifier),

la quantité insuffisante de **carbone minéral** disponible pour le métabolisme des bactéries autotrophes dont les besoins sont estimés à 8,7 mg de HCO_3^- ou 0,7 °F / mg d'azote à nitrifier. Ces teneurs sont estimées à partir d'analyses effectuées sur les eaux brutes d'entrée station. La quantité de bicarbonate (carbone minéral) peut aussi être appréciée rapidement à partir de la conductivité en entrée station : 70 % de la conductivité mesurée en eau brute correspond aux sels dissous et 75 % de ces sels dissous sont des bicarbonates. A titre d'exemple, une eau brute d'entrée station de conductivité de 1100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dispose de 577 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de bicarbonates [$1100 \times 70 \% \times 75 \%$], soit une possibilité de nitrification de 66 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de $\text{N}\text{-NH}_4^+$ [$577 / 8.7$].

Des concentrations en $\text{N}\text{-NH}_4^+$ supérieures à 70 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ nécessiteront alors un apport de bicarbonates. De telles concentrations peuvent être rencontrées sur des installations traitant des rejets d'activités non domestiques (élevage, industries) ou traitant des retours internes à la station très chargés en azote (retours de la filière boues principalement).

Cette teneur en bicarbonate peut aussi être diminuée par l'ajout de réactifs physico-chimique (comme le FeCl_3 par exemple).

La figure 12 montre clairement des baisses de performances de la nitrification dues, principalement, à l'effet des bicarbonates sur les cinétiques de nitrification consommatrices de TAC. Les charges nitrifiables ont été estimées à partir de la conductivité.

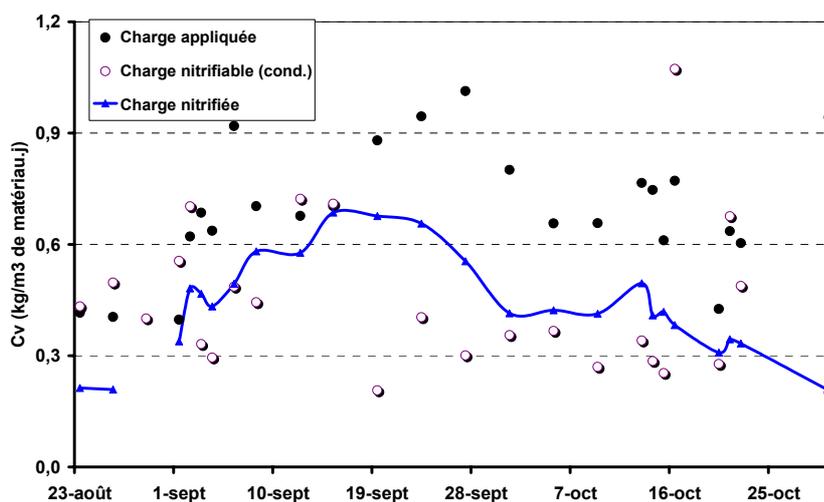


Figure 12 : Evolution des Charges volumiques appliquées, nitrifiées et nitrifiables (approche d'après la conductivité) - site des Aravis

l'**acidification** du milieu. La nitrification consomme des bicarbonates (pouvoir tampon de l'eau) et va entraîner une acidification du milieu qui peut pénaliser l'activité de la biomasse nitrifiante (ralentissement de l'activité nitrifiante pour des pH inférieur à 6,8, voir blocage de celle-ci pour des pH inférieurs à 5,5 - 6),

une **surcharge en pollution carbonée**. Celle-ci peut entraîner une baisse des performances de nitrification en raison d'une compétition plus importante entre les germes hétérotrophes et autotrophes au détriment des autotrophes (production de boue faible, affinité à l'oxygène, vitesse de consommation de l'oxygène plus faible),

la quantité insuffisante de **P-PO₄** disponible pour le métabolisme des germes autotrophes (impact de l'étage physico-chimique amont).

5.4 Mise en œuvre de la rotation

Deux types de rotation ont été testés lors de notre étude :

- la rotation maîtrisée, concept en partie développé par le constructeur OTV, et basée sur des cycles de filtration d'une durée de 24 heures avec un nombre de cellules en fonctionnement fixé suivant la charge volumique appliquée désirée,
- la rotation aléatoire, retenue par d'autres constructeurs, et basée principalement sur la mise en service d'une cellule de filtration supplémentaire lors d'un dépassement d'une concentration donnée en azote ammoniacal de sortie sans tenir compte de l'historique des cellules.

Le gain d'ensemencement ainsi obtenu est lié au nombre de cellules en rotation et aux charges appliquées pendant les cycles de filtration de durée de 24 heures (charges appliquées toujours supérieures à la capacité de nitrification correspondant à l'ensemencement) et à la bonne gestion de la rotation. Les gains d'ensemencement théoriques suivant le type de rotation sont indiqués dans le tableau 16.

Nombre de cellules disponibles		3	4	5	6	7	8
Sans Rotation	Gain en biomasse (ensemencement par cellule)	1 (0.33)	1 (0.25)	1 (0.2)	1 (0.17)	1 (0.14)	1 (0.12)
	Maîtrisée : Gain en biomasse (ensemencement par cellule)	3 (1)	4 (1)	5 (1)	5* (1)	5* (1)	5* (1)
Avec rotation	Aléatoire : Gain en biomasse (ensemencement par cellule)	< 3 (< 1)	< 4 (< 1)	< 5 (< 1)	< 5 (< 1)	< 5 (< 1)	< 5 (< 1)

* au-delà de 5 cellules, les autres filtres ne sont pas utilisés lors de la rotation

Tableau 16 : gains d'ensemencement théorique suivant le type de rotation

L'étude a permis de se rendre compte que le gain d'ensemencement maximum pouvant être obtenu est de 5 en rotation maîtrisée car au-delà de 4 jours d'arrêt, la biomasse autotrophe du filtre stagne ou régresse et risque d'être perdue.

Les résultats de nos études ont également montré que lors des phases d'arrêt de l'alimentation, un apport en oxygène est conseillé et possible de façon discontinue. Le bon compromis serait de maintenir des temps de non-aération n'excédant pas deux heures, suivies de courtes périodes d'aération (15 minutes à faible débit), l'objectif étant d'éviter l'anaérobiose des filtres.

Cette technique d'ensemencement par rotation est contraignante puisqu'elle nécessite un certain nombre d'équipements spécifiques ou recommandations dans la conception, en particulier :

- une alimentation spécifique journalière par cellule, avec le maintien de la charge azotée maximale à chaque cycle de filtration et plus particulièrement lors d'épisodes pluvieux induisant l'ouverture de cellules supplémentaires.
- la capacité hydraulique de la partie biofiltration ne doit pas être un facteur limitant afin de maintenir une charge élevée malgré la dilution des effluents.
- dans le cas où un ensemencement par apport d'une source azotée externe serait recherché, chaque conduite d'alimentation des filtres doit être équipée d'un point d'injection en conduite immergée (en raison de la volatilisation de la source azotée). Cette alimentation spécifique par cellule est nécessaire pour des raisons d'optimisation des quantités d'azote à apporter en particulier lors des temps de pluie.
- une aération spécifique par cellule.

5.5 Ensemencement par l'apport d'azote complémentaire

Alcali (NH₄OH)

Les sources azotées disponibles dans le commerce sont nombreuses mais la plus intéressante d'un point de vue économique et de maniabilité est l'Alcali : une solution d'azote ammoniacal de NH₄OH (masse volumique : 0,915 kg/litre, disponible en 2 gammes de concentrations 20.5 % et 27 %). Son prix moyen (en 2002), rendu sur site, est de l'ordre de 290 € HT/1000 litres soit 316 € HT la Tonne.

La quantité d'Alcali apportée quotidiennement doit être déterminée avec beaucoup de précaution. Pour augmenter la biomasse en place dans une cellule, elle devra être supérieure à la capacité nitrifiante de la biomasse autotrophe de la cellule (estimée à partir de la quantité de nitrate formé sur le réacteur biologique). Elle devra augmenter régulièrement à une vitesse qui ne dépasse pas le taux de croissance moyen afin de ne pas dégrader la qualité du rejet (augmentation de type exponentielle).

Exemple

Une installation composée de 8 cellules dispose en basse saison d'un flux journalier d'azote disponible pour la nitrification de 40 kg N / j.

A Noël, le flux d'azote à nitrifier s'élève à 500 kg N / j soit un facteur de variation, ΔC , de 12,5

La montée en charge dure 6 jours.

La température de l'eau avant la montée en charge est de 8°C ($\mu_0=0,1$) et 10°C ($\mu_0=0,12$) lors de la montée en charge

On dispose de 2 scénarios lors de la montée en charge (6 jours) :

- *1^{er} scénario : Alimentation de l'ensemble des cellules mais la démarche est peu réaliste car la charge azotée est difficilement maîtrisable.*
- *2^{ème} scénario : Maintien de la rotation et les cellules à alimenter seront fonction de la charge à traiter.*

1^{er} scénario.

L'installation dispose de 8 cellules. Si avant la montée en charge une rotation en alimentant 2 cellules à la fois est mise en place, la capacité nitrifiante pourra être portée à 160 kg de N/j (4 x 40 kg N / j), sans ajout d'azote externe.

Lors de la montée en charge l'ensemble des cellules sera alimenté simultanément à une charge au moins équivalente à celle appliquée individuellement lors de la période de préparation par rotation. La capacité nitrifiante (M_0) nécessaire au début de la montée en charge sera donc au moins :

$$M_t = M_0 \times (1 + \mu_0)^t,$$

$$M_0 = M_t / (1 + \mu_0)^t,$$

$$M_0 = 500 / (1 + 0,12)^6,$$

$$M_0 = 250 \text{ kg N/j}$$

Donc, dans cette hypothèse, la capacité de nitrification à obtenir avant la montée en charge doit

être de 250 kgN/j ce qui nécessite une augmentation de la capacité initiale (160 kgN/j) d'un facteur 1,56 (250/160) et devra être obtenue par l'ajout d'une source azotée externe.

2^{ème} scénario :

L'installation dispose de 8 cellules. Si avant la montée en charge une rotation en alimentant 2 cellules à la fois est mise en place, la capacité nitrifiante pourra être portée à 160 kg de N/j (4 x 40 kg N / j), sans ajout d'azote externe.

Lors de la montée en charge, la rotation est maintenue avec un nombre de cellules qui est fonction de la vitesse d'augmentation de charge en appliquant une charge supérieure à celle de la basse saison. La capacité nitrifiante (M_0) nécessaire au début de la montée en charge sera alors au moins:

$$M_t = M_0 \times (1 + \mu_0)^t,$$

$$M_0 = M_t / (1 + \mu_0)^t,$$

Avec :

durée de la montée en charge : 6 jours

nombre de filtres alimenté simultanément: 2

groupe de cellules participant à la rotation : 4 ,

on obtient : $t = 6/4$,

et donc :

$$M_0 = 500 / (1 + 0,12)^{1,5},$$

$$M_0 = 422 \text{ kg N/j}$$

Donc, dans cette hypothèse, la capacité de nitrification à obtenir avant la montée en charge doit être de 422 kgN/j ce qui nécessite une augmentation de la capacité initiale (160 kgN/j) d'un facteur 2,64 (422/160) et devra être obtenue par l'ajout d'une source azotée externe.

L'apport d'alcali devra donc permettre d'augmenter la capacité nitrifiante avant la montée en charge de 160 kg de N/j à au moins 250 kg N/j voir 420 kg N/j pour les scénarios 1 et 2 respectivement, ce qui représente un facteur d'augmentation de 1,56 environ ou 2,64. On suppose que l'alcali est apporté au cours de la préparation successivement aux cellules en rotation.

La durée d'alimentation nécessaire par filtre pour permettre l'augmentation de la capacité nitrifiante est obtenue par la relation suivante :

$$t = \text{Ln } \Delta C \text{ recherché} / \text{Ln } (1 + \mu_0)$$

$$\text{soit } t = 4,7 \text{ jours pour } \Delta C = 1,56,$$

$$\text{et } t = 11 \text{ jours pour } \Delta C = 2,64.$$

La durée globale nécessaire, compte tenu de la durée d'un cycle qui est de 4 jours, est donc (voir annexes 1- 1 bis et 2 – 2bis) de 19 jours dans le cas favorable (1 cycle dure 4 jours soit 4 x 4,7) et de 43 jours (environ 4x11) dans le second.

Le tableau en annexe 1 et 1 bis (rotation) et 2 et 2 bis (alimentation simultanée de toutes les cellules) permet de déterminer la quantité d'azote à ajouter nécessaires à partir de la durée.

Dans le cas où la rotation est maintenue lors de la montée en charge et de période d'ajout azotée, la durée d'ajout nécessaire s'élève à 43 jours et la quantité cumulée d'alcali ajoutée est de 34,2

fois l'apport journalier de base, soit $34,2 \times 40 \text{ kg N / j} = 1\,368 \text{ kg d'azote}$. Cette quantité peut être comparée à celle produite par la collectivité au cours d'une année (à raison de 9 mois de 40 kg N/j et 3 mois de 500 kg/j), soit environ 56 000 kg N. L'ajout correspond donc à seulement 2,4 % du flux d'azote annuel. Son coût peut être évalué à environ 2109 €/an ($(1368 \text{ kg N} / 0,205 \text{ kg N} / \text{kg alcali}) \times 0,316 \text{ €/kg alcali}$).

Azote interne

Des sources azotées internes, issues de la filière de traitement des boues, peuvent aussi être utilisées mais elles sont souvent envoyées directement sur la filière de traitement, occasionnant ponctuellement des surcharges azotées sur les filtres et des rejets non conformes.

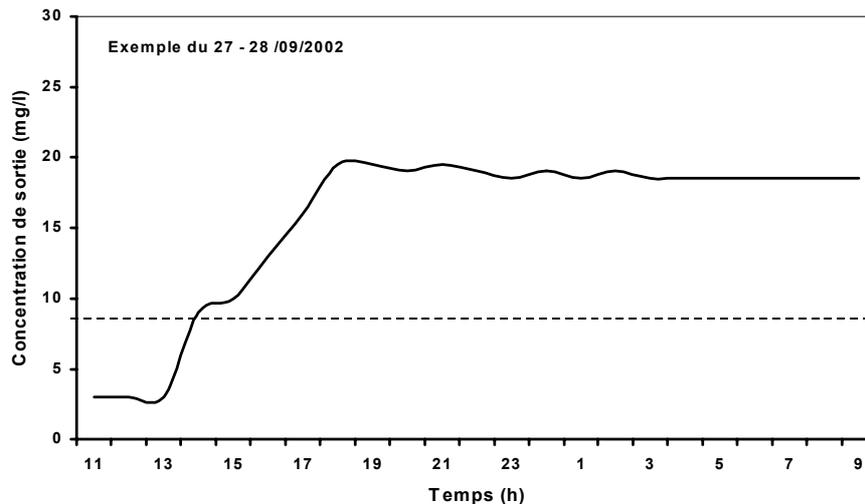


Figure 13 : Evolution de la concentration en N-NH₄ de sortie suite au fonctionnement des centrifugeuses sur le site des Aravis

Afin d'éviter des à-coups de charge, ces retours de la filière boues devront pouvoir être stockés avant leur restitution contrôlée dans le temps, grâce à une capacité de stockage réduite (2 à 3 jours) permettant de restituer cette source azotée en période nocturne. Une capacité de stockage plus longue, de l'ordre de 15 jours (équivalent à la durée de la première pointe de charge hivernale) permettrait d'utiliser les retours stockés pour l'ensemencement préalable à la montée en charge. Cette technique de développement de l'ensemencement par apport d'une source azotée (externe ou interne) n'est envisageable que dans le cas où le filtre est déjà colonisé par une biomasse autotrophe.

Cet apport d'une source azotée déséquilibre automatiquement l'effluent à traiter et peut induire rapidement certains facteurs limitants qui vont ralentir les cinétiques de développement de la biomasse (Carbone minéral, P-PO₄, pH...). Un suivi permanent de ces différents paramètres est donc nécessaire pour éviter un dysfonctionnement du traitement de l'azote.

5.6 Ensemencement direct par des bactéries autotrophes

Nos études ont montré qu'un biofiltre nonensemencé en raison d'un arrêt prolongé de la cellule (arrêt total durant 3 mois) avait d'importantes difficultés pour redémarrer la nitrification en raison de la perte quasi totale de sa biomasse autotrophe (résultats obtenus très aléatoires d'un site à l'autre). La mise en route de cellules nonensemencées en période de très faible température nécessite donc un ensemencement préalable par l'ajout de bactéries autotrophes issues du commerce ou par la filtration des eaux de lavage (eaux sales ou eaux boueuses) issues des filtres

nitrifiants. Ces deux points n'ont pas pu être testés d'une façon approfondie. Des expérimentations devront être engagées mais elles nécessitent une conception de biofiltre spécifique afin de faciliter l'introduction de bactéries autotrophes (artificielles ou par filtration des eaux sales).

La filtration d'eaux de lavage peut présenter des inconvénients pour certains types de biofiltre (risques de colmatage des crépines). Dans ce cas, les eaux sales peuvent être apportées en l'absence d'alimentation, en surface du filtre et introduites dans le matériau par la mise en route de l'aération durant quelques heures, suivie d'une alimentation à très faible vitesse afin de faciliter la fixation de la biomasse autotrophe. Les eaux ainsi filtrées seront ensuite envoyées vers les cellules déjàensemencées afin d'éviter une dégradation du rejet (boucle interne). Aucune expérimentation sur une longue période n'a permis de mesurer les résultats de cette technique d'ensemencement.

L'ensemencement nécessite un certain nombre d'équipements et de circuits hydrauliques particulier avec :

- une possibilité d'introduction des eaux de lavages avec l'alimentation ou au niveau du plancher crépiné (en raison des risques de colmatage).
- une possibilité d'alimentation à faible vitesse de l'eau à traiter afin d'éviter le risque d'entraînement de la biomasse introduite puis un circuit spécifique pour l'eau filtrée qui sera renvoyée sur les cellules ditesensemencées pour garantir un bon niveau de rejet.

5.7 Equipements de gestion

Le maintien d'un haut niveau de traitement pour des installations confrontées à de fortes variations de charge va occasionner de fortes contraintes d'exploitation dont la priorité sera le maintien et le développement de la biomasse autotrophe tout en respectant la qualité du rejet. Cette biomasse est sensible à un certain nombre de paramètres (O_2 , pH, P- PO_4 , Carbone minéral,...) et l'exploitation pourra être facilitée par la mise en place de certains capteurs dont les plus prioritaires sont :

- une mesure de la température et de la conductivité à l'entrée de la station pour l'estimation des bicarbonates.
- une sonde pH à l'entrée du réacteur biologique nitrifiant, dont la valeur de consigne sera supérieure à 6,8 – 7.
- un analyseur de N- NH_4^+ équipé de deux points de prélèvements (entrée et sortie biofiltre).
- une alimentation contrôlée de chaque cellule par pompage spécifique ou jeu de vannes automatiques.

6 CONCLUSION

Comparée aux autres filières de traitement, la technique Biofiltration est le procédé le plus adapté pour faire face à de très fortes variations de charge et plus particulièrement dans le cas du traitement de l'azote. Cet avantage s'explique surtout par une quantité de biomasse présente importante, par son aspect modulaire (plusieurs cellules en parallèle) qui permet de moduler le nombre de filtres à alimenter en fonction de la charge à traiter, mais aussi par la souplesse de gestion des cellules à alimenter (technique de rotation dite maîtrisée) qui permet de faire face à des facteurs de variation de charges pouvant aller à 6 - 7, sans autre technique d'ensemencement préalable.

En raison d'un taux de croissance de la biomasse de l'ordre de 10% par jour à 8 °C dans le réacteur biologique et d'une montée en charge généralement étalée sur 6 jours, une cellule de biofiltration permet de faire face à une montée en charge d'un facteur 1.8 maximum ((1,1)⁶). Pour une installation de 5 cellules, lors de la montée en charge, selon le mode de fonctionnement retenu, le

facteur de charge est de 9 dans le cas où les 5 cellules sont alimentées en parallèle ($(1,1)^6 \times 5$) ou de 5,6 dans le cas où la rotation est maintenue avec au moins 1 filtre alimenté par jour ($(1,1)^{1,2} \times 5$). Dans les deux cas, il est peu probable que la montée en charge correspond précisément au taux de croissance d'où la difficulté du respect du rejet dans ce cas. Il sera préférable d'adapter le nombre de cellules en fonctionnement à la charge à traiter et l'augmentation de la biomasse se situera entre 5,6 et 9.

Au-delà d'un facteur de 9 un accroissement artificiel de la biomasse doit être envisagé par l'ajout d'une source azotée qui permet de développer avant la montée en charge la biomasse nécessaire à un niveau recherché. La durée d'alimentation avec l'azote externe et sa quantité à ajouter dépendent du mode de fonctionnement des filtres :

- alimentation d'une cellule à la fois par rotation
- ou alimentation de l'ensemble de cellules..

Le tableau 16 présente la durée d'alimentation nécessaire en fonction :

- du facteur d'accroissement de la biomasse au cours de la basse saison
- et du mode de gestion des cellules (rotation ou non)

Facteur d'accroissement de la biomasse en basse saison	Nombre de cycles de 24 heures par cellule.	Durée d'alimentation selon la technique retenue pour la gestion des filtres		Variation de charge admissible	
		Alimentation des 5 cellules	Alimentation par rotation (1 filtre par jour)	A Noël	Sur l'année
2	7	7 jours	35 jours	11	12,5
4	15	15 jours	75 jours	22	27,5
6	19	19 jours	95 jours	33	41
8	22	22 jours	110 jours	44	55

Tableau 17 : durée d'alimentation nécessaire

On observe pour une durée beaucoup plus courte lors d'une alimentation simultanée des 5 cellules en basse saison. Ce choix occasionne une consommation d'azote externe plus élevée en raison de la charge nominale haute saison à appliquer.

La biofiltration offre donc des perspectives intéressantes dans le contexte du traitement des variations de charges. Mais, afin de répondre à cette problématique, cette filière occasionne des coûts élevés en investissement pour sa conception et d'importantes contraintes d'exploitation. En effet, la priorité de l'exploitation sera le développement de la biomasse autotrophe à un niveau adéquat pour faire face aux pointes de charges à traiter tout en maintenant la qualité du rejet.

A ce jour et suite à ces travaux, de nombreuses installations devront améliorer leurs performances.

Annexe 1: Tableau d'estimation des besoins d'azote externe pour 5 cellules en rotation .

$\mu_0 = 0,1$ soit 8°C dans le réacteur biologique.

La capacité de nitrification et les besoins en alcali sont exprimés par rapport au flux d'azote généré par le site avant la montée en charge. Compte tenu du taux de croissance fixé, la température retenue dans le réacteur biologique est de 8°C soit 6 à 7 °C à l'entrée de l'installation.

Taux de croissance = $\mu_0 = 0,1$ Température = 8 °C dans le réacteur biologique	Charge basse Saison = 1 Avec 5 cellules, la capacité de biomasse est d'un facteur 5
--------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------

Jours	Nombre de cycle de rotation complet	Nombre de cellules					Capacité totale de la biomasse	Facteur d'augmentat de la charge basse saison	Besoins en Alcali par jour	Besoins cumulés en alcali par rotation
		1	2	3	4	5				
							5			
Référence		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	5,00	1,00	0,00	
1	1	1,10	1,00	1,00	1,00	1,00	5,10	1,02	0,10	0,10
2	1	1,10	1,10	1,00	1,00	1,00	5,20	1,04	0,10	0,20
3	1	1,10	1,10	1,10	1,00	1,00	5,30	1,06	0,10	0,30
4	1	1,10	1,10	1,10	1,10	1,00	5,40	1,08	0,10	0,40
5	1	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	5,50	1,10	0,10	0,50
6	2	1,21	1,10	1,10	1,10	1,10	5,61	1,12	0,21	0,71
7	2	1,21	1,21	1,10	1,10	1,10	5,72	1,14	0,21	0,92
8	2	1,21	1,21	1,21	1,10	1,10	5,83	1,17	0,21	1,13
9	2	1,21	1,21	1,21	1,21	1,10	5,94	1,19	0,21	1,34
10	2	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	6,05	1,21	0,21	1,55
11	3	1,33	1,21	1,21	1,21	1,21	6,17	1,23	0,33	1,88
12	3	1,33	1,33	1,21	1,21	1,21	6,29	1,26	0,33	2,21
13	3	1,33	1,33	1,33	1,21	1,21	6,41	1,28	0,33	2,54
14	3	1,33	1,33	1,33	1,33	1,21	6,53	1,31	0,33	2,87
15	3	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	6,66	1,33	0,33	3,21
16	4	1,46	1,33	1,33	1,33	1,33	6,79	1,36	0,46	3,67
17	4	1,46	1,46	1,33	1,33	1,33	6,92	1,38	0,46	4,13
18	4	1,46	1,46	1,46	1,33	1,33	7,05	1,41	0,46	4,60
19	4	1,46	1,46	1,46	1,46	1,33	7,19	1,44	0,46	5,06
20	4	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46	7,32	1,46	0,46	5,53
21	5	1,61	1,46	1,46	1,46	1,46	7,47	1,49	0,61	6,14
22	5	1,61	1,61	1,46	1,46	1,46	7,61	1,52	0,61	6,75
23	5	1,61	1,61	1,61	1,46	1,46	7,76	1,55	0,61	7,36
24	5	1,61	1,61	1,61	1,61	1,46	7,91	1,58	0,61	7,97
25	5	1,61	1,61	1,61	1,61	1,61	8,05	1,61	0,61	8,58
26	6	1,77	1,61	1,61	1,61	1,61	8,21	1,64	0,77	9,35
27	6	1,77	1,77	1,61	1,61	1,61	8,37	1,67	0,77	10,12
28	6	1,77	1,77	1,77	1,61	1,61	8,54	1,71	0,77	10,89
29	6	1,77	1,77	1,77	1,77	1,61	8,70	1,74	0,77	11,66
30	6	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	8,86	1,77	0,77	12,44
31	7	1,95	1,77	1,77	1,77	1,77	9,03	1,81	0,95	13,38
32	7	1,95	1,95	1,77	1,77	1,77	9,21	1,84	0,95	14,33
33	7	1,95	1,95	1,95	1,77	1,77	9,39	1,88	0,95	15,28
34	7	1,95	1,95	1,95	1,95	1,77	9,57	1,91	0,95	16,23
35	7	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	9,74	1,95	0,95	17,18
36	8	2,14	1,95	1,95	1,95	1,95	9,94	1,99	1,14	18,32
37	8	2,14	2,14	1,95	1,95	1,95	10,13	2,03	1,14	19,47
38	8	2,14	2,14	2,14	1,95	1,95	10,33	2,07	1,14	20,61
39	8	2,14	2,14	2,14	2,14	1,95	10,52	2,10	1,14	21,75
40	8	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	10,72	2,14	1,14	22,90
41	9	2,36	2,14	2,14	2,14	2,14	10,93	2,19	1,36	24,26
42	9	2,36	2,36	2,14	2,14	2,14	11,15	2,23	1,36	25,61
43	9	2,36	2,36	2,36	2,14	2,14	11,36	2,27	1,36	26,97
44	9	2,36	2,36	2,36	2,36	2,14	11,58	2,32	1,36	28,33
45	9	2,36	2,36	2,36	2,36	2,36	11,79	2,36	1,36	29,69
46	10	2,59	2,36	2,36	2,36	2,36	12,03	2,41	1,59	31,28
47	10	2,59	2,59	2,36	2,36	2,36	12,26	2,45	1,59	32,87
48	10	2,59	2,59	2,59	2,36	2,36	12,50	2,50	1,59	34,47
49	10	2,59	2,59	2,59	2,59	2,36	12,73	2,55	1,59	36,06
50	10	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	12,97	2,59	1,59	37,66

Annexe 1 bis : Tableau d'estimation des besoins d'azote externe pour 5 cellules en rotation.

$\mu_0 = 0,12$ soit 10 °C dans le réacteur biologique.

La capacité de nitrification et les besoins en alcali sont exprimés par rapport au flux d'azote généré par le site avant la montée en charge. Compte tenu du taux de croissance fixé, la température retenue dans le réacteur biologique est de 10 °C soit 8 à 9 °C à l'entrée de l'installation.

Taux de croissance = $\mu_0 = 0,12$	Charge basse Saison = 1
Température = 10 °C dans le réacteur biolog	Avec 5 cellules, la capacité de biomasse est d'un facteur 5

Jours	Nombre de cycle de rotation complet	Nombre de cellules					Capacité totale de la biomasse	Facteur d'augmentat de la charg basse saison	Besoins en Alcali par jour	Besoins cumulés en alcali par rotation
		1	2	3	4	5				
Référence		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	5	1,00	0,00	
1	1	1,12	1,00	1,00	1,00	1,00	5,12	1,02	0,12	0,10
2	1	1,12	1,12	1,00	1,00	1,00	5,24	1,05	0,12	0,22
3	1	1,12	1,12	1,12	1,00	1,00	5,36	1,07	0,12	0,34
4	1	1,12	1,12	1,12	1,12	1,00	5,48	1,10	0,12	0,46
5	1	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	5,60	1,12	0,12	0,58
6	2	1,25	1,12	1,12	1,12	1,12	5,73	1,15	0,25	0,83
7	2	1,25	1,25	1,12	1,12	1,12	5,87	1,17	0,25	1,09
8	2	1,25	1,25	1,25	1,12	1,12	6,00	1,20	0,25	1,34
9	2	1,25	1,25	1,25	1,25	1,12	6,14	1,23	0,25	1,60
10	2	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	6,27	1,25	0,25	1,85
11	3	1,40	1,25	1,25	1,25	1,25	6,42	1,28	0,40	2,26
12	3	1,40	1,40	1,25	1,25	1,25	6,57	1,31	0,40	2,66
13	3	1,40	1,40	1,40	1,25	1,25	6,72	1,34	0,40	3,07
14	3	1,40	1,40	1,40	1,40	1,25	6,87	1,37	0,40	3,47
15	3	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	7,02	1,40	0,40	3,88
16	4	1,57	1,40	1,40	1,40	1,40	7,19	1,44	0,57	4,45
17	4	1,57	1,57	1,40	1,40	1,40	7,36	1,47	0,57	5,02
18	4	1,57	1,57	1,57	1,40	1,40	7,53	1,51	0,57	5,60
19	4	1,57	1,57	1,57	1,57	1,40	7,70	1,54	0,57	6,17
20	4	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	7,87	1,57	0,57	6,74
21	5	1,76	1,57	1,57	1,57	1,57	8,06	1,61	0,76	7,51
22	5	1,76	1,76	1,57	1,57	1,57	8,25	1,65	0,76	8,27
23	5	1,76	1,76	1,76	1,57	1,57	8,43	1,69	0,76	9,03
24	5	1,76	1,76	1,76	1,76	1,57	8,62	1,72	0,76	9,79
25	5	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	8,81	1,76	0,76	10,56
26	6	1,97	1,76	1,76	1,76	1,76	9,02	1,80	0,97	11,53
27	6	1,97	1,97	1,76	1,76	1,76	9,23	1,85	0,97	12,50
28	6	1,97	1,97	1,97	1,76	1,76	9,45	1,89	0,97	13,48
29	6	1,97	1,97	1,97	1,97	1,76	9,66	1,93	0,97	14,45
30	6	1,97	1,97	1,97	1,97	1,97	9,87	1,97	0,97	15,43
31	7	2,21	1,97	1,97	1,97	1,97	10,11	2,02	1,21	16,64
32	7	2,21	2,21	1,97	1,97	1,97	10,34	2,07	1,21	17,85
33	7	2,21	2,21	2,21	1,97	1,97	10,58	2,12	1,21	19,06
34	7	2,21	2,21	2,21	2,21	1,97	10,82	2,16	1,21	20,27
35	7	2,21	2,21	2,21	2,21	2,21	11,05	2,21	1,21	21,48
36	8	2,48	2,21	2,21	2,21	2,21	11,32	2,26	1,48	22,95
37	8	2,48	2,48	2,21	2,21	2,21	11,58	2,32	1,48	24,43
38	8	2,48	2,48	2,48	2,21	2,21	11,85	2,37	1,48	25,91
39	8	2,48	2,48	2,48	2,48	2,21	12,11	2,42	1,48	27,38
40	8	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	12,38	2,48	1,48	28,86
41	9	2,77	2,48	2,48	2,48	2,48	12,68	2,54	1,77	30,63
42	9	2,77	2,77	2,48	2,48	2,48	12,97	2,59	1,77	32,40
43	9	2,77	2,77	2,77	2,48	2,48	13,27	2,65	1,77	34,18
44	9	2,77	2,77	2,77	2,77	2,48	13,57	2,71	1,77	35,95
45	9	2,77	2,77	2,77	2,77	2,77	13,87	2,77	1,77	37,72
46	10	3,11	2,77	2,77	2,77	2,77	14,20	2,84	2,11	39,83
47	10	3,11	3,11	2,77	2,77	2,77	14,53	2,91	2,11	41,94
48	10	3,11	3,11	3,11	2,77	2,77	14,86	2,97	2,11	44,04
49	10	3,11	3,11	3,11	3,11	2,77	15,20	3,04	2,11	46,15
50	10	3,11	3,11	3,11	3,11	3,11	15,53	3,11	2,11	48,25

**Annexe 2: Tableau d'estimation des besoins d'azote externe pour 5 cellules
en fonctionnement simultané.
 $\mu_0 = 0,10$ soit 8 °C dans le réacteur biologique**

La capacité de nitrification et les besoins en alcali sont exprimés par rapport au flux d'azote généré par le site avant la montée en charge. Compte tenu du taux de croissance fixé, la température retenue dans le réacteur biologique est de 8°C soit 6 à 7 ° à l'entrée de l'installation.

Taux de croissance = $\mu_0 = 0,1$ Température = 8 °C dans le réacteur biologique	Charge basse Saison = 1 Avec 5 cellules, la capacité de biomasse est d'un facteur 5
--------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------

Jours	Nombre de jours de filtration des 5 cellules	Nombre de cellules					Capacité totale de la biomasse	Facteur d'augmentation de la charge basse saison	Besoins en Alcali par jour	Besoins cumulés en alcali par aliment simultanée
		1	2	3	4	5				
Référence		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	5,00	1,00	0,00	
1	1	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	5,50	5,50	4,50	4,50
2	2	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	6,05	6,05	5,05	9,55
3	3	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	6,66	6,66	5,66	15,21
4	4	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46	7,32	7,32	6,32	21,53
5	5	1,61	1,61	1,61	1,61	1,61	8,05	8,05	7,05	28,58
6	6	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	8,86	8,86	7,86	36,44
7	7	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	9,74	9,74	8,74	45,18
8	8	2,14	2,14	2,14	2,14	2,14	10,72	10,72	9,72	54,90
9	9	2,36	2,36	2,36	2,36	2,36	11,79	11,79	10,79	65,69
10	10	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	12,97	12,97	11,97	77,66
11	11	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	14,27	14,27	13,27	90,92

**Annexe 2 bis: Tableau d'estimation des besoins d'azote externe pour 5 cellules
en fonctionnement simultané.
 $\mu_0 = 0,12$ soit 10 °C dans le réacteur biologique**

La capacité de nitrification et les besoins en alcali sont exprimés par rapport au flux d'azote généré par le site avant la montée en charge. Compte tenu du taux de croissance fixé, la température retenue dans le réacteur biologique est de 10°C soit 8 à 9 ° à l'entrée de l'installation.

Taux de croissance = $\mu_0 = 0,12$	Charge basse Saison = 1
Température = 10 °C dans le réacteur biolog	Avec 5 cellules, la capacité de biomasse est d'un facteur 5

Jours	Nombre de jours de filtration des 5 cellules	Nombre de cellules					Capacité totale de la biomasse	Facteur d'augmentation de la charge basse saison	Besoins en Alcali par jour	Besoins cumulés en alcali par aliment simultanée
		1	2	3	4	5				
Référence		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	5,00	1,00	0,00	
1	1	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	5,60	5,60	4,60	4,60
2	2	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	6,27	6,27	5,27	9,87
3	3	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	7,02	7,02	6,02	15,90
4	4	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	7,87	7,87	6,87	22,76
5	5	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	8,81	8,81	7,81	30,58
6	6	1,97	1,97	1,97	1,97	1,97	9,87	9,87	8,87	39,45
7	7	2,21	2,21	2,21	2,21	2,21	11,05	11,05	10,05	49,50
8	8	2,48	2,48	2,48	2,48	2,48	12,38	12,38	11,38	60,88
9	9	2,77	2,77	2,77	2,77	2,77	13,87	13,87	12,87	73,74
10	10	3,11	3,11	3,11	3,11	3,11	15,53	15,53	14,53	88,27
11	11	3,48	3,48	3,48	3,48	3,48	17,39	17,39	16,39	104,67

Annexe 3 : Relation entre le facteur d'augmentation de la population autotrophe et la durée retenue.

Durée en jours	Facteur d'augmentation de la biomasse à différentes températures dans le réacteur		
	T° = 8°C $\mu_0 = 0,1$	T° = 10°C $\mu_0 = 0,12$	T° = 12°C $\mu_0 = 0,15$
0	1,0	1,0	1,0
1	1,1	1,1	1,2
2	1,2	1,3	1,3
3	1,3	1,4	1,5
4	1,5	1,6	1,7
5	1,6	1,8	2,0
6	1,8	2,0	2,3
7	1,9	2,2	2,7
8	2,1	2,5	3,1
9	2,4	2,8	3,5
10	2,6	3,1	4,0
11	2,9	3,5	4,7
12	3,1	3,9	5,4
13	3,5	4,4	6,2
14	3,8	4,9	7,1
15	4,2	5,5	8,1
16	4,6	6,1	9,4
17	5,1	6,9	10,8
18	5,6	7,7	12,4
19	6,1	8,6	14,2
20	6,7	9,6	16,4
21	7,4	10,8	18,8
22	8,1	12,1	21,6
23	9,0	13,6	24,9
24	9,8	15,2	28,6
25	10,8	17,0	32,9
26	11,9	19,0	37,9
27	13,1	21,3	43,5
28	14,4	23,9	50,1
29	15,9	26,7	57,6
30	17,4	30,0	66,2
31	19,2	33,6	76,1
32	21,1	37,6	87,6