

Ministère de l'Agriculture et de la Pêche

FNDAE n° 26
Document technique



Philippe Duchène, Éric Cotteux



Groupement d'Antony
UR Qualité et fonctionnement hydrologique
des systèmes aquatiques
Parc de Tourvoie
BP 44 – 92163 Antony Cedex
Tél. 01 40 96 61 21



La présente étude a été rédigée par Philippe Duchène et Éric Cotteux, l'ensemble des données utilisées ayant été acquises par les équipes spécialisées du Cemagref (Antony, Bordeaux et Lyon). Éric Cotteux et Pierre Mauricracc du Cemagref, groupement d'Antony, ont réalisé le plus grand nombre des mesures spécifiques à cette étude financée par le Fonds national pour le développement des adductions d'eau (FNDAE).

La saisie et la réalisation de ce manuscrit ont été assurées par Sophie Morin.

Nous remercions vivement Alain Héduit et Gaëlle Deronzier pour leur relecture attentive et constructive.

Crédit photographique

Couverture, p. 37 – Diffuseurs d'air fines bulles en bassin d'aération, S. Capela, Cemagref.

p. 3 – Agitateur grande pale, Y. Racault, nov. 2001, Cemagref.

p. 5 – Chenal d'aération, Y. Racault, nov. 2001, Cemagref.

p. 13 – Mesure de vitesse et de l'oxymètre, Vedrenne, janv. 2002, Cemagref.

p. 21 – Agitateur grande pale, Y. Racault, nov. 2001, Cemagref.

p. 25 – Chenal d'aération, Y. Racault, déc. 2001, Cemagref.

p. 38 – Mesure Pitot, Y. Racault, nov. 2001, Cemagref.

© Ministère de l'Agriculture et de la Pêche – ISBN 2-11-092853-0 ; © Cemagref 2002 – Cemagref Éditions – ISBN 2-85362-593-1
Insufflation d'air fines bulles. Application aux systèmes d'épuration en boues activées des petites collectivités. Philippe Duchène, Éric Cotteux (Cemagref) – Document technique FNDAE n° 26, 2002.

1^{re} édition coordonnée par le Cemagref : conception et création graphique : Julienne Baudel ; infographie : Françoise Peyriguer. Dépôt légal : 2^e trimestre 2002 – Impression : Jouve, 18 rue Saint-Denis, BP 2734, 75027 Paris Cedex 01. Document disponible sous forme numérique sur le site <http://www.eau.fnadae.fr>. Pour les tirages papier, les demandes sont à adresser au Cemagref, DSIC /IST, Parc de Touvoie, BP 44, 92163 Antony Cedex. Tél. 01 40 96 62 85, fax. 01 40 96 61 64.



Le

présent document a pour objectif de faire la synthèse des mesures et observations réalisées sur des installations en taille réelle de systèmes d'aération par insufflation d'air fines bulles et d'expliquer les variations d'efficacité de ces systèmes. Le parc visé est celui des stations d'épuration en boues activées des petites collectivités (de quelques centaines à quelques milliers d'équivalents-habitants).

Les remarques et raisonnements sont le plus souvent applicables à des installations de taille supérieure.

L'objectif est de fournir les bases d'une conception de ces systèmes d'aération permettant d'atteindre des performances de transfert supérieures, en conditions réelles de fonctionnement, à celles des autres dispositifs d'aération.

Les différentes dispositions de diffuseurs, dans les différentes formes de bassin d'aération les plus communes sont analysées afin d'en tirer des conclusions pratiques au plan de la conception de l'aération et des systèmes de brassage associés, que ceux-ci fonctionnent simultanément à l'aération ou en alternance avec celle-ci.





CHAPITRE I – INTRODUCTION	p. 7
LES BOUES ACTIVÉES	p. 7
L’AÉRATION DES BOUES ACTIVÉES	p. 8
CHAPITRE II – MÉTHODOLOGIE DE L’ÉTUDE	p. 15
LES MESURES DE PERFORMANCES D’AÉRATION	p. 15
LES INDICATEURS DE PERFORMANCES DE TRANSFERT D’OXYGÈNE	p. 17
CLASSIFICATION DES FORMES DE BASSINS D’AÉRATION ÉTUDIÉS	p. 18
LES COUPLES AÉRATEURS BASSINS ÉTUDIÉS	p. 20
CHAPITRE III – FACTEURS INFLUENÇANT L’EFFICACITÉ DU TRANSFERT D’OXYGÈNE EN DIFFUSEUR D’AIR FINES BULLES	p. 21
LES TYPES DE DIFFUSEURS	p. 21
LE DÉBIT D’AIR « PAR DIFFUSEUR »	p. 22
LA HAUTEUR D’IMMERSION DES DIFFUSEURS	p. 24
LA DENSITÉ DES DIFFUSEURS	p. 24
LA DISPOSITION DES DIFFUSEURS	p. 26

CHAPITRE IV. LES DIVERSES CONFIGURATIONS ET L'EFFICACITÉ DU TRANSFERT	p. 27
RÉSULTATS GLOBAUX	p. 27
LES PETITS CHENAUX ANNULAIRES	p. 29
LES « FAUX » CHENAUX	p. 32
LES BASSINS CYLINDRIQUES	p. 34
LES BASSINS PARALLÉLÉPIPÉDIQUES	p. 35
CHAPITRE V. CONCLUSIONS GÉNÉRALES	p. 37
LISTE DES ANNEXES	p. 40
BIBLIOGRAPHIE	p. 51



Les boues activées

La croissance des exigences de qualité des eaux épurées est évidente. Elle est manifeste dans la période actuelle par la mise en place récente d'une nouvelle réglementation dont la caractéristique principale est d'imposer le respect d'un seuil de fiabilité minimal. Ceci est explicite pour les installations conçues pour traiter les eaux usées de flux nominaux supérieurs à 120 kg de DBO/j (théoriquement 2000 équivalents-habitants (EH)). Implicitement la nécessité d'obtenir des performances de manière très régulière est et sera étendue, au moins psychologiquement, aux stations d'épuration de plus petite capacité.

Les performances minimales exigées sont relativement peu sévères notamment pour les petites stations d'épuration, rendant applicables de nombreux procédés d'épuration des eaux usées (cf. document technique FNDAE n° 22, 1998). Toutefois, la politique nationale réaffirmée de préservation ou de restauration des milieux aquatiques superficiels dulçaquicoles, prenant la forme d'objectifs de qualité des cours d'eaux en particulier, vient nettement renforcer ces exigences. Cette politique nationale vient de



se trouver confortée par la publication de la Directive cadre européenne sur l'eau.

Dans l'état actuel des connaissances relatives aux impacts des divers flux polluants sur ces milieux, c'est l'azote ammoniacal qui est considéré comme l'élément nécessitant un abattement maximal, en tant que toxique pour la vie aquatique. C'est en tout cas le constat évident lorsqu'on rapproche les qualités d'eaux épurées classiques et les paramètres des objectifs de qualité Ia, Ib et II.

Ces exigences sur les flux d'azote ammoniacal ont servi à bâtir la logique des niveaux D₁ à D₄ de la circulaire du 17 février 1997 pour les installations soumises à déclaration (de 200 à 2000 EH) sans que cela soit visible afin de ne pas faire apparaître de contraintes plus importantes pour les petites collectivités que pour les grosses.

En pratique, les objectifs de rejet seront de plus en plus contraignants sur l'azote ammoniacal, ou sur l'azote Kjeldahl et les procédés utilisables, dans les conditions technico-économiques de la période, sont peu nombreux. On

se reportera au document technique FNDAE n° 22 (1998) pour en avoir une vision plus précise, mais les choix devraient se porter, en fonction des flux à épurer vers la famille des procédés recourant à la **filtration sur supports fins** (procédés dérivés de l'assainissement individuel, lits d'infiltration sur sable, filtres plantés de roseaux...) avec souvent, en tête du réseau hydrologique, un rejet vers le sol plutôt que vers les cours d'eau (contraintes très élevées à l'étiage) ou vers les **boues activées**.

Cette affirmation de la place importante des boues activées pour les petites collectivités, sans doute au-dessus de 1 000 EH, s'accompagne de quatre remarques importantes :

- les boues activées seront nécessairement en aération prolongée, c'est-à-dire avec une charge massique inférieure à 0,1 kg DBO/kg MVS/j ;
- la nitrification y sera maximale sans problème, sauf longue période particulièrement froide ;
- la dénitrification y est obligatoire et aussi complète que possible pour éviter les dysfonctionnements causés par la dénitrification spontanée dans le clarificateur final (perte de MES pouvant faire dépasser les 25 mg/l en DBO), établissement d'une couche de flottants pérennes sur cet ouvrage à l'origine maintes fois démontrée de mousses biologiques, stables en aération par la suite.

Cette obligation durera tant que les conditions économiques ne permettront pas de remplacer le clarificateur par des systèmes d'ultra- voire de nano-filtration.

- la fiabilité, et en particulier la fiabilité biologique (prévention des dysfonctionnements biologiques) nécessite à la fois une conception soignée dans le détail, des équipements suffisants (asservissements, etc...) et un personnel d'exploitation suffisamment averti et présent (et donc une exploitation onéreuse pour les collectivités les plus petites).

Malgré ces dernières contraintes, le recours aux boues activées est donc durable pour les petites collectivités et cela, d'autant plus que les procédés souvent appelés d'infiltration percolation ne permettent pas, à l'heure actuelle, une déphosphatation significative qui sera probablement de plus en plus demandée.

L'aération des boues activées

L'aération est le poste clef de la qualité de l'épuration en boues activées pour assurer la couverture de besoins en oxygène liés à la dégradation bactérienne aérobie et pour maîtriser la nitrification et la dénitrification.

Ce poste aération représente, dans une installation normalement chargée, 60 à 80 % de la dépense énergétique totale de fonctionnement, cette dernière étant usuellement considérée comme constituant le tiers du coût total de fonctionnement.

L'optimisation énergétique du système d'aération – en fait du couple aérateur-bassin d'aération – a donc un impact non négligeable et, en relatif, d'autant plus important que la station d'épuration est grande (les charges relatives de personnel baissent avec la taille de l'installation). On joue en tout état de cause sur plus de 10 % du coût total de fonctionnement, parfois sur 20 % de celui-ci, comme les données présentées dans cette étude permettent de le calculer.

RAPPELS HISTORIQUES

En se limitant aux trente dernières années qui correspondent à l'essentiel de l'établissement des stations d'épuration de petites collectivités en France, on peut noter les grandes évolutions suivantes. Dans les années 70, alors que dans les grandes stations d'épuration le recours à l'insufflation d'air fines bulles, avec des diffuseurs en céramique, dominait dans les installations de boues activées souvent à charge massique plutôt élevée, l'équipement de petites installations, déjà en aération prolongée, était réalisé majoritairement à l'aide d'aéra-

teurs mécaniques de surface (turbines lentes voire rapides et brosses d'aération sur les chenaux). On notera, au passage, le côté paradoxal de cette répartition du marché de l'aération en rappelant que les aérateurs de surface voient leurs performances d'autant moins affectées que la charge est élevée, alors que c'est le contraire en insufflation d'air. Le transfert d'oxygène induit par les aérateurs de surface est, en effet, positivement corrélé à la respiration des boues, elle-même croissante avec la charge massique.

Les performances de l'insufflation d'air fines bulles sont d'autant plus affectées que la qualité de l'eau interstitielle est médiocre, ce qui est aussi positivement corrélé à des charges massiques élevées.

Les années 80 ont vu une évolution des installations neuves avec le souci émergeant (enfin) de traiter l'azote, ce qui a normalement condamné le recours aux céramiques poreux dont on ne peut syncoper l'alimentation en air sous peine de colmatage. Il en est résulté une certaine généralisation des aérateurs de surface (turbines lentes et brosses). Parallèlement, apparaissaient sur le marché (en Allemagne, aux États-Unis...) les premières membranes souples de diffusion d'air fines bulles. Ces membranes en élastomère de synthèse (EPDM) perforées de fentes millimétriques supportent les arrêts de fonctionnement de la source d'air sans colmatage significatif.

Il était donc possible, à nouveau, de coupler objectifs de traitement et diffusion d'air fines bulles.

Les années 90 ont, en conséquence, vu un quasi-monopole de ces diffuseurs d'air par membrane dans les grandes stations et une montée progressive aboutissant à une situation presque identique pour les petites stations d'épuration à boues activées en effluents à dominante domestique.

AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES MEMBRANES DE DIFFUSION D'AIR FINES BULLES

AVANTAGES

Les avantages se situent sur plusieurs plans.

- Fiabilité de la fourniture d'oxygène

L'installation de deux surpresseurs (dont l'un en secours) dans le cas de la diffusion d'air évite aisément que les pannes mécaniques aient les conséquences néfastes évoquées ci-dessous.

Cet élément est bien sûr essentiel, une panne venant non seulement compromettre la qualité du traitement des eaux usées à brève échéance mais encore handicaper le traitement durablement. Il est bien démontré que, si les facteurs favorables au développement des micro-organismes filamenteux sont nombreux et pas tous encore complètement explicités, la quasi-totalité de cas de bulking est occasionnée par une carence en oxygène. Les pannes d'aération sont ainsi la cause déclenchant ces dysfonctionnements biologiques dans le plus grand nombre de cas. La durée maximale de la panne d'aération supportable sans trop de risques est estimée à environ cinq à dix heures, ce qui laisse peu de temps pour mettre en œuvre un système de secours. Les aérateurs mécaniques, difficilement doublés dans les petits bassins d'aération, devraient obliger, en pratique, à venir installer un dispositif de rechange en cas de panne. En effet, même s'il y a deux aérateurs de surface, la zone de l'aérateur en panne sera mal brassée/mal aérée par l'autre aérateur seul.

- Modularité de la fourniture d'oxygène

Sur les petits bassins d'aération, la modularité de la puissance d'oxygénation par des aérateurs de surface est fort limitée : leurs performances sont fortement affectées par des vitesses de rotation, des immersions s'éloignant de l'optimum et le nombre d'appareils est nécessairement limité (le plus souvent à un).

En insufflation d'air, l'utilisation de plusieurs surpresseurs, de surpresseurs à deux vitesses ou à vitesses variables, permet d'adapter la puissance d'aération aux besoins en oxygène. Cela n'est pas assez mis en pratique aujourd'hui et c'est l'un des points importants à améliorer dans la pratique future.

Cet avantage n'est pas négligeable puisqu'un bon asservissement aux capteurs d'oxygène ou rédox n'est obtenu que pour une puissance d'aération non surdimensionnée par rapport aux besoins instantanés en oxygène (cf. Document technique FNDAE n° 24, 2001).

- Sensibilité de l'aération à la concentration de boues du bassin d'aération

Une bonne exploitation passe par le maintien d'une concentration de boues dans le bassin d'aération ne dépassant pas la concentration de projet souvent fixée entre 4 et 5 g/l selon que l'on n'a pas ou que l'on a recours à la déphosphatation physico-chimique. Il est évident que cette règle peut connaître des exceptions (impossibilités momentanées d'extraire des boues par exemple). Des concentrations élevées (> 5g/l de MES) conduiront le plus souvent au bulking suite à une sous-aération d'une partie des boues en cas d'aération mécanique, si l'on n'a pas veillé à rallonger les durées de marche afin de reprendre toutes les boues épaissies en fond de bassin et de les aérer suffisamment. Au contraire, les bulles d'air traversent toute la masse de boues, en insufflation d'air le problème ne se pose pratiquement pas et il n'y a pas lieu de modifier les réglages d'asservissement en fonction de la concentration en boues.

Remarque : la conclusion qui pourrait être tirée qu'« en insufflation d'air il est possible de diminuer le volume du bassin d'aération » serait excessive, puisqu'en matière de taux de boues en aération, c'est le clarificateur qui est le premier facteur limitant.

- Réchauffement de la liqueur mixte

L'insufflation d'air fines bulles se fait nécessairement à une pression de l'ordre de la hauteur d'immersion des diffuseurs. Cette compression augmente la température de l'air d'une dizaine de degrés par mètre d'immersion. Cette chaleur se dissipe en majeure partie dans le bassin d'aération et réchauffe son contenu. Le réchauffement ainsi procuré, par rapport à une aération de surface est estimé à environ 2 °C. Ce gain, modeste, est important en hiver pour maintenir plus aisément la nitrification, activité bactérienne beaucoup plus sensible à la température que la dégradation des matières organiques (cf. FNDAE n° 24, 2001).

- Maîtrise des nuisances sonores

Les émissions sonores en insufflation d'air proviennent des surpresseurs qui sont aisément isolables dans un bâtiment spécialement conçu ou par les capotages commercialisés par les fournisseurs de ces machines. Le recours à ces deux moyens d'insonorisation permet d'assurer la maintenance sur l'un des appareils sans avoir à arrêter l'autre (cette solution onéreuse peut, au plan de la réglementation du travail être remplacée par le port de protections individuelles).

Dans le cas des aérateurs de surface, la source sonore essentielle n'est pas le moto-réducteur d'entraînement mais la gerbe d'eau retombant à la surface du bassin d'aération. L'installation de jupes enveloppant l'aérateur et sa gerbe permet une bonne insonorisation. Malheureusement elle conduit au développement de mousses biologiques stables du fait du non-rabatement des flottants dans le bassin d'aération par action mécanique de la gerbe (cf. GIS MOUSSES 1993). Des jupes s'arrêtant 15 à 20 au-dessus du plan d'eau n'ont pas cet inconvénient mais présentent une efficacité amoindrie d'insonorisation.

- La question des aérosols

La plus faible production d'aérosols par l'insufflation d'air que par les aérateurs de surface est souvent mise en avant par les professionnels proposant l'aération par insufflation d'air. En

dehors du fait que des capotages (cf. ci-dessus) peuvent réduire la différence de production d'aérosols à une valeur non significative, il nous paraît nécessaire de souligner que les études épidémiologiques faites à l'étranger (USA, Suisse...) n'ont pas montré d'impact de ces aérosols sur le personnel d'exploitation ni sur les populations environnantes exposées. Pour exprimer une opinion équilibrée, il est nécessaire de mentionner que dans d'autres cas (épandage par aspersion d'effluents urbains) les risques sanitaires en particulier respiratoires liés à des champignons, ont été jugés non nuls (Boutin, 1982).

- L'efficacité du transfert d'oxygène à la liqueur mixte du bassin d'aération

Pour le maître d'ouvrage c'est l'efficacité énergétique dans des conditions réelles de fonctionnement qui est le paramètre le plus intéressant. Plus précisément, c'est l'apport spécifique brut (ASB' en kg O₂/kWh) pour le régime de fonctionnement le plus fréquent, c'est-à-dire durant la période diurne (et par temps sec lorsque le réseau d'assainissement est unitaire).

Les données concernant l'ASB' sont rares pour une série de raisons parmi lesquelles sa variabilité spatio-temporelle et les compétences nécessaires pour l'appréhender avec précision se placent au premier rang.

Toutefois, une relation lie l'ASB' avec le même paramètre mesuré en eau claire (ASB). En

négligeant les facteurs secondaires pouvant d'ailleurs être considérés comme invariants quelque soient les systèmes d'aération cette relation est :

$$ASB' = ASB \alpha (C_s - C_m) / C_s \text{ (eq. 1)}$$

α est le coefficient de transfert spécifique du milieu (en conditions réelles/en eau claire),

C_s est la concentration à saturation d'oxygène dissous fonction de la température et de la pression, (incluant une surpression par une partie de la colonne d'eau au-dessus des diffuseurs ; cf. annexe 5),

C_m est la concentration d'oxygène dans l'eau durant le fonctionnement de l'aération (pour les conditions standard en eau claire $C_m = 0$).

Si l'on considère que, en « moyenne », on transfère l'oxygène à un C_m de 2 mg/l (valeur réaliste en petites stations d'épuration) et que l'on se situe en aération prolongée légèrement sous-chargée, à une température moyenne de l'ordre de 12-15°C, les valeurs suivantes sont à prendre en considération :

	α	$(C_s - C_m) / C_s$	Coefficient correcteur global
Aérateurs de surface	0,9	0,80	0,7
Insufflation d'air fines bulles	0,6 à 0,8	0,84	0,5 à 0,62

Tableau 1 – Facteurs de correction du transfert d'oxygène en eau claire/liqueur mixte

Remarque : aux conditions nominales de l'aération prolongée et sous réserve de résultats complémentaires, il est légitime de continuer à utiliser pour l'insufflation d'air fines bulles un coefficient correctif global de 0,5 pour le passage des performances en eau claire, aux conditions réelles de fonctionnement en aération prolongée d'effluents domestiques.

Les recherches menées notamment par le Cemagref et l'université technique de Darmstadt tendent à montrer, en insufflation d'air fines bulles, que si les facteurs α sont variables en fonction des configurations de bassin et du ren-

dement initial de transfert (de manière encore incomplètement élucidée), les tendances des performances en eau claire sont conservées en conditions réelles de fonctionnement : plus clairement, avec une eau usée donnée, la hiérarchie des efficacités de transfert se conserve même si l'amplitude des différences d'efficacité en eau claire diminue¹.

l'état actuel des connaissances peut se résumer comme suit en se limitant aux mesures effectuées sur des installations urbaines.

	Moyenne générale des résultats	Fourchette extrême	Fourchette usuelle	Valeur couramment atteinte avec les bons dispositifs	Soit en ASB' (conditions réelles)
Turbines lentes	1,50	0,80 - 2,20	1,35 - 1,75	1,65	1,15
Turbines rapides	1,05	0,60 - 1,45	1,05 - 1,35	1,20	0,84
Brosses	1,55	0,80 - 2,30	1,50 - 1,80	1,70	1,2
Insufflations d'air (IA)					
Moyennes bulles	1,00	0,70 - 1,50	0,90 - 1,10	1,10	0,77
Fines bulles	2,50	1,80 - 3,40	2,20 - 3,20	2,50	1,25 - 1,55
Fines bulles en chenal avec agitation	2,80	1,20 - 4,25	2,50 - 3,80	3,00	1,50 - 1,85
IA + «static mixers»	1,50	0,60 - 2,10	0,80 - 2,00	1,40	0,95
Système déprimogène (pompe + prise d'air)	0,60	0,02 - 1,10	0,60 - 0,80	0,70	0,50

Tableau 2 – ASB des principaux systèmes d'aération (kg O₂/kWh) d'après DUCHÈNE et HÉDUI 1996]

Il paraît donc légitime, pour comparer des systèmes différents (aérateurs de surface, insufflation d'air fines bulles) de se reporter au tableau 1, et pour comparer des dispositifs d'une même famille (insufflation d'air fines bulles) de se fonder sur les performances en eau claire.

Le tableau 2 montre une grande variabilité de performances de l'aération par insufflation d'air. C'est l'objet principal du présent document que d'expliquer ces variations d'efficacité. Le but poursuivi est de limiter l'usage de l'insufflation d'air fines bulles à des dispositions et des équipements procurant une efficacité de transfert supérieure à celle des autres systèmes d'aération.

LES INCONVÉNIENTS

Ils relèvent principalement de coûts élevés

• Coûts d'investissement

La solution surpresseurs et diffuseurs d'air à membrane fines bulles est en soi plus coûteuse que celle des aérateurs mécaniques. En génie civil, l'économie de passerelle que cette solution peut apporter est compensée par l'érection normale d'un local dédié aux surpresseurs. En revanche, l'ensemble des surpresseurs, canalisations, supports et diffuseurs est plus cher qu'une turbine lente de surface par exemple. Les tentatives d'économie, comme nous le verrons par la suite, se traduisent généralement par des performances significativement amoind-

¹ Un système relativement performant se caractérise par des temps de séjour de bulles dans l'eau élevés. Les freins au transfert (par exemple certains tensio-actifs incomplètement dégradés) donnant des facteurs α faibles sont d'autant plus importants que le temps de séjour des bulles dans le bassin est élevé (CAPELA, 1999).

dries, en tout cas, pour les trois premiers de ces composants du système d'aération.

- Nécessité de diffuseurs relevables sans vidange du bassin d'aération

Les incidents sur un diffuseur (casse par accident, crevaison, mauvais montage initial) ne sont pas exclus et créent une fuite locale pénalisant lourdement l'ensemble du système d'aé-

ration. Plus certainement encore la longévité limitée² des diffuseurs impose, en cas de bassin d'aération unique, que les **diffuseurs soient relevables** par groupes pour inspection, maintenance (nettoyage occasionnel, lavage haute pression) et renouvellement de tout ou partie des diffuseurs. Cette obligation contribue à renchérir le coût d'investissement (et aussi le coût de fonctionnement-renouvellement).

² En l'état actuel des connaissances, il ne saurait être question de garantir une longévité supérieure à cinq ans même si certains équipements donnent localement satisfaction sur des durées un peu plus longues.



Les mesures ont été effectuées sur sites réels. Certains résultats avaient été préalablement acquis, notamment pour les sites de référence (grands chenaux). Une partie des mesures a été réalisée spécifiquement pour la présente étude.

Les mesures de performances d'aération

LE TRANSFERT D'OXYGÈNE

Les mesures ont été effectuées par la méthode classique en France de réoxygénation en eau claire avec

- mesure du C_s réel, seul moyen d'accéder à la « sursaturation » liée à la pression de la colonne d'eau au-dessus des diffuseurs (cf. annexe 1),
- dissolution dans le bassin d'aération du sulfate de sodium en poudre,
- suivi de la remontée de concentrations d'oxygène dissous de 10 à 70-80 % de C_s ,
- exploitation des données suivant la méthode semi-logarithmique.



Le protocole détaillé figure notamment dans Duchène *et al.*, 1995. Il est rapide mais nécessite un calibrage précis, sondes en place, des capteurs oxymétriques. Il est préconisé par le CCTG fasc. 81 Titre II (en fin de refonte, publication prévue au second semestre 2002)

Il sera aussi inclus en tant que « méthode pour équipes expérimentées » dans la future norme européenne NF-EN 12255-15 qui devrait entrer en vigueur en 2002. Cette variante méthodologique est aussi en voie d'intégration dans la norme américaine dite « ASCE » avec une date d'effet peut-être encore plus proche.

L'annexe 1 rapporte les étapes essentielles de cette mesure de transfert d'oxygène. Les oxymètres utilisés étaient principalement des appareils YSI 57.

LES VITESSES DE COURANT

Lorsque cela est nécessaire pour l'interprétation des résultats, c'est-à-dire systématiquement dans le cas des chenaux d'aération et dans le cas de bassins cylindriques à dissociation aération-brassage, les mesures de vitesses horizontales de l'eau ont été effectuées à l'aide d'un micro-moulinet A OTT type C_2 selon le

protocole décrit dans Deronzier et Duchène (1997).

Les points essentiels de ce protocole sont la mesure sur 30 secondes au minimum des vitesses en 20 points répartis sur la section de courant, aération à l'arrêt. Il a été adapté pour être réalisé sur certains bassins cylindriques où une évaluation plus grossière du champ de vitesses est apparue suffisante.

Des mesures complémentaires ont dans certains cas été effectuées avec aération en fonctionnement.

Remarque : le document précité [Deronzier et Duchène, 1997] s'appliquant aux chenaux

d'aération avec dissociation aération brassage a été écrit en fonction d'une expérience où ne figuraient pas encore de cas de mauvaises conceptions qui sont apparues depuis lors. Il préconisait donc des mesures en absence d'aération et tablait sur une perte de 1 à 2 cm/s en vitesse moyenne du fait de la mise en marche de l'aération.

Mais il arrive que la conception induise une hydraulique particulière (*cf.* chapitre IV) avec, en période d'aération un contre courant de surface non négligeable, créant une boucle parasite courte de circulation vers l'agitateur, comme l'indique la figure 1.

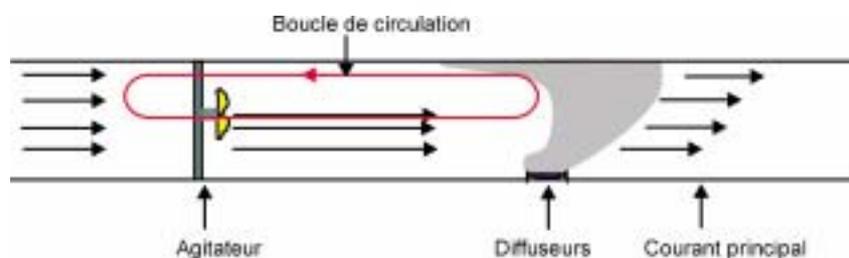


Figure 1 – Cas de mauvais fonctionnement hydraulique

Dans ce cas, la chute de vitesse moyenne peut être bien supérieure à celle mentionnée ci-dessus (jusqu'à 60 % ont été constatés) et des mesures avec aération en marche simultanée doivent donc être effectuées même si elles restent plus délicates à réaliser et à interpréter.

MESURES DE DÉBIT D'AIR

Le contrôle des débits d'air est important. En effet, il arrive que la vitesse de rotation du surpresseur soit différente de la vitesse prévue (facile à contrôler avec un tachymètre électronique) mais encore plus souvent que des fuites non négligeables se produisent dans le réseau de distribution, entre le surpresseur et les entrées dans le bassin d'aération. Une vérification visuelle (et auditive) doublée d'une mesure le plus près possible du bassin d'aération (sur la partie montante de la nourrice principale arrivant au bassin d'aération) sont nécessaires.

Nos mesures ont été effectuées à l'aide de tubes de Pitot reliés à un manomètre différentiel (avec intégration en débits) Zéphyr Solomat. Les emplacements de mesure doivent respecter les prescriptions de la norme NFX 10112 (1977). La description des piquages pour ces mesures figure en annexe 2 et sera d'ailleurs intégrée au CCTG fasc. 81 titre II en cours de refonte.

LES PUISSANCES

Les mesures de puissance ont été effectuées séparément sur chacun des appareils constitutifs du système d'aération à l'aide d'un appareil de mesure de puissance (sur les trois phases simultanément) Prowatt Chauvin-Arnoux.

Remarque : pour mesurer la puissance consommée dans le cas des moteurs asservis à un variateur de fréquences, il est nécessaire de

disposer d'appareils spécialisés effectuant une analyse du courant. En effet, les wattmètres ou cos ϕ mètres classiques donnent leurs résultats sur la base d'un courant sinusoïdal alors que le courant restitué par les variateurs de fréquence ne l'est en général pas. La mesure du cos ϕ peut même devenir impossible avec les appareils classiques (et difficile, voire parfois impossible, pour les autres appareils de la même armoire).

Les indicateurs de performances de transfert d'oxygène

La réoxygénation d'une eau privée d'oxygène suit, depuis $C_0 = 0$ mg/l jusqu'à la concentration à saturation C_s , la loi physique :

$$C = C_s - (C_s - C_0) \cdot e^{-k_L a t} \quad (\text{eq. 2})$$

qui par simple transformation est équivalente à : $\ln(C_s - C) = -k_L a t + \ln(C_s - C_0)$ (eq. 3)

$k_L a$ s'exprime en h^{-1} ; c'est en fait la pente à l'origine, donc la vitesse de dissolution d'oxygène dans le bassin considéré, à concentration nulle (figure 2).

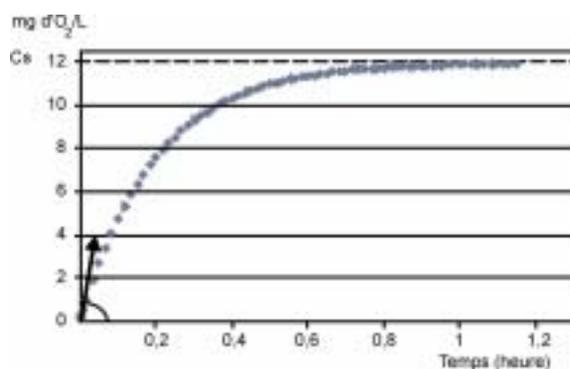


Figure 2 - Courbe de réoxygénation

À partir de $k_L a$ on calcule aisément l'apport horaire en oxygène dans le bassin : AH en $kg O_2/h$

$$AH = k_L a \cdot V \cdot C_s / 1000 \quad (\text{eq. 4})$$

V : volume du bassin d'aération (en m^3),

$k_L a$: coefficient de transfert (en h^{-1}),

C_s : concentration à saturation (en mg/l) ; de l'ordre de 12 mg l^{-1} .

En mesurant la puissance totale consommée P_B en kW, l'apport spécifique brut ASB, exprimé en $kg O_2/kWh$, est aisément calculé.

$$ASB = AH / P_B \quad (\text{eq. 5})$$

La mesure de débit d'air insufflé (Q air) permet d'accéder à d'autres indicateurs.

La masse d'oxygène M_O transitant par heure par le bassin d'aération est :

$$M_O = k \cdot Q \text{ air} \quad (\text{eq. 6})$$

M_O en kg/h ,

$k = 0,3$ $kg/N m^3$ (cf. pour plus de précision l'annexe I),

Q air en $Normo\text{-}m^3/h$ ($N m^3/h$), c'est-à-dire exprimé à $0^\circ C$ et à 1013 hPa.

On peut alors calculer le rendement d'oxygénation standard RO : pourcentage d'oxygène transféré à l'eau par rapport à la masse d'oxygène insufflée dans le bassin d'aération.

$$RO = AH / M_O \quad (\text{eq. 7})$$

avec RO en %.

Plus utile est le rendement spécifique d'oxygénation RO_s , ramené à l'unité de hauteur d'immersion des diffuseurs H_i .

$$RO_s = RO / H_i \quad (\text{eq. 8})$$

Avec RO_s en $\%/m$ et H_i en m (en général profondeur d'eau diminuée de 0,1 à 0,3m).

Dans le présent document on ne commente pas les coefficients de transfert $k_L a$, ni le plus souvent, les apports horaires AH_i , intermédiaires de calcul. On se fondera principalement sur les apports spécifiques bruts (ASB) directement reliés aux intérêts des utilisateurs et de leurs représentants : maîtres d'œuvre, Satese, etc.

Pour les fournisseurs, le rendement d'oxygénation est un critère de grande utilité. Nous nous limiterons dans la présente étude à des valeurs de rendements spécifiques d'oxygénation dans la mesure où la plage de hauteurs d'immersion utilisée pour les petites stations rend RO_s peu sensible à la hauteur d'immersion (cf. figure 10). Il est donc facile de repasser en rendement total d'oxygénation, en multipliant celui-ci par la hauteur d'immersion.

Classification des formes de bassins d'aération étudiés

Pour l'analyse des critères de conception des bassins d'aération nous distinguerons cinq cas de figures.

LES GRANDS CHENAUX, QU'ILS SOIENT OBLONGS OU ANNULAIRES

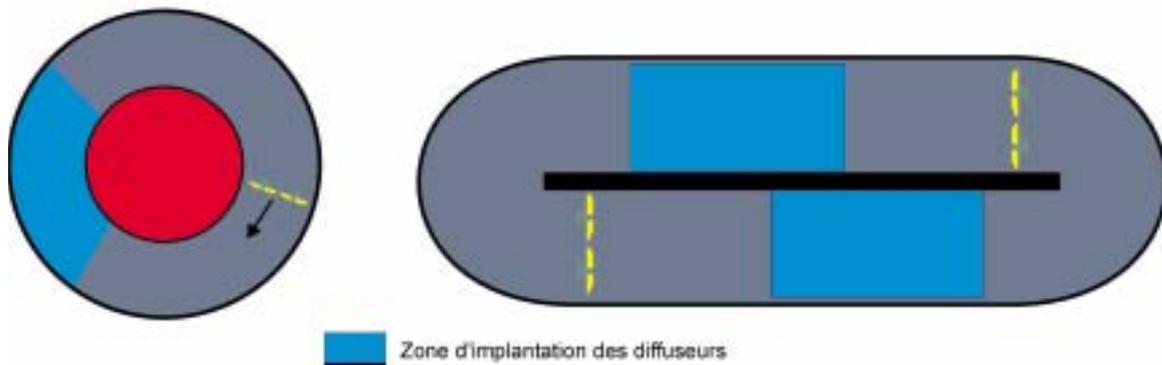
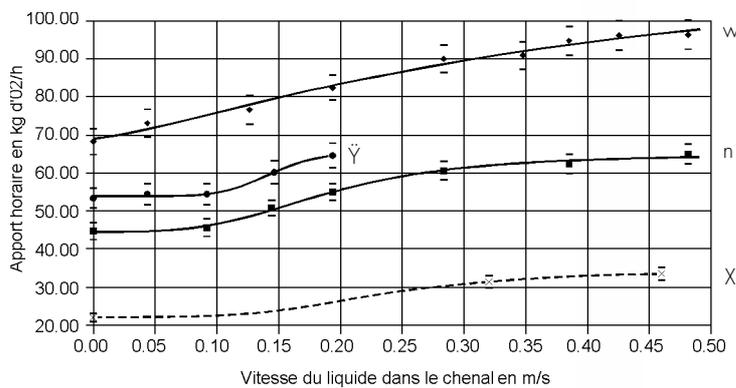


Figure 3 – Grands chenaux d'aération à dissociation aération brassage.

18

Équipant des collectivités moyennes et grosses, ils ont été particulièrement étudiés et peuvent ainsi servir de référence. Leurs performances difficiles à égaler en apport spécifique brut (bons rendements des gros surpresseurs et des

turbocompresseurs, surface mouillée relativement faible par rapport au volume d'eau à mettre en rotation) s'expliquent en particulier par l'influence de la vitesse horizontale sur le transfert d'oxygène (cf. figure 4).



mesures réalisées en eau claire

w : débit d'air = 1569 m³/h

Ÿ : débit d'air = 1094 m³/h

n : débit d'air = 950 m³/h

mesures réalisées en boues : (méthode de réoxygénation des boues en phase de respiration endogène)

X : débit d'air = 821 m³/h

Figure 4 – Influence de la vitesse horizontale sur le transfert d'oxygène en chenal [Deronzier et Duchène 1997]

LES PETITS CHENAUX (FIGURE 5 A) ANNULAIRES

Homothétiques des précédents chenaux annulaires (figure 5 A), ils posent des problèmes particuliers, inhérents à leur faible longueur développée, dont nous débattons par la suite.

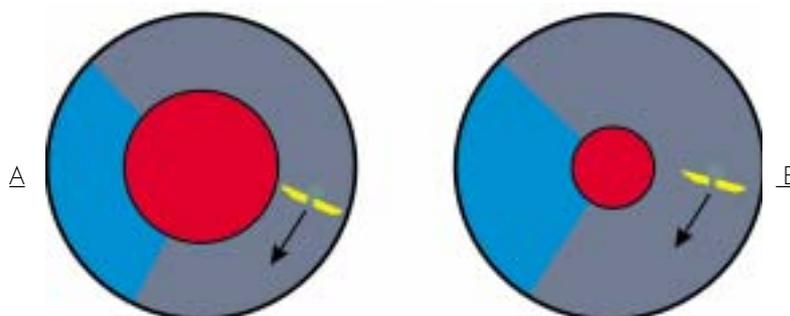


Figure 5 – Petits chenaux A « vrai » B « faux »

Remarque : nous ne traiterons pas ici des petits chenaux oblongs, pouvant être envisagés pour des contraintes de site. Un seul a fait l'objet de mesures, il a produit des résultats décevants, en grande partie du fait du manque d'arrondi à ses extrémités.

LES PETITS « FAUX » CHENAUX (FIGURE 5 B)

Ils se caractérisent par le faible rayon interne, lorsque le volume central est par exemple occupé par une zone de contact et non par un bassin d'anaérobiose ou d'anoxie.

LES BASSINS D'AÉRATION CYLINDRIQUES

Ils se divisent en deux catégories (figure 6). Selon la disposition des diffuseurs d'air, on parle alors de couverture plancher (6 A) ou d'aération par raquette(s) 6 B.

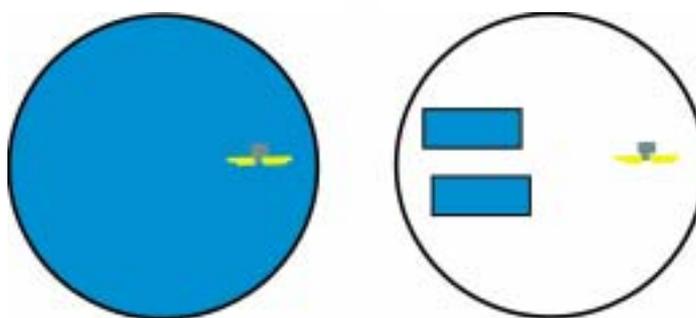


Figure 6 – Bassins d'aération cylindriques

L'implantation d'un agitateur est facultative, particulièrement dans le cas des ouvertures plancher. Son fonctionnement, en simultané ou successif aux temps de fonctionnement de l'aération, sera discuté plus loin.

LES BASSINS D'AÉRATION PARALLÉLÉPIPÉDIQUES

Plus souvent rencontrés en réhabilitation de bassins anciens qu'en construction neuve, ces bassins peuvent aussi être ou non en couver-

ture plancher comme les bassins cylindriques (figure 7) mais peuvent de plus présenter des parois à 45 degrés.

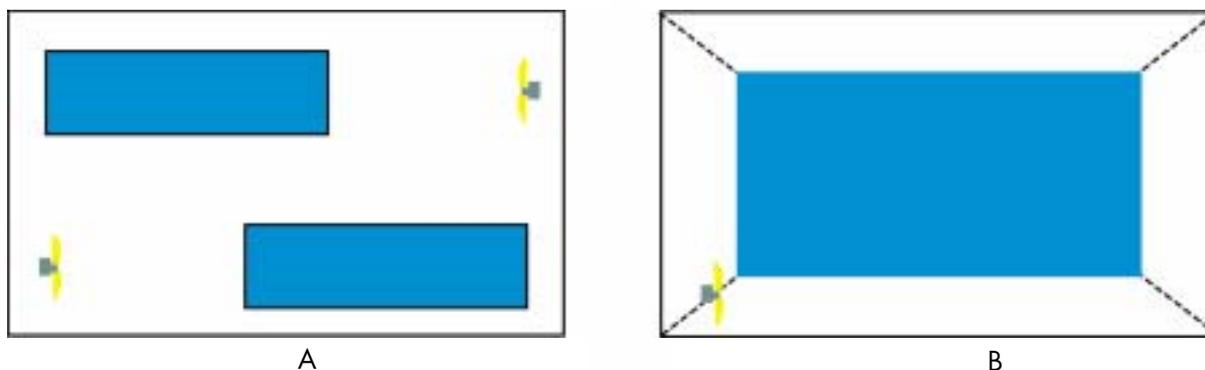


Figure 7 – Bassins d'aération parallélépipédiques

7A à parois droites et raquettes (disposition n'ayant pas fait l'objet de mesures) ;

7B à parois à 45 degrés et couverture plancher (disposition ayant fait l'objet de mesures).

20

Les couples aérateurs/bassins étudiés

Pour la présente étude, les résultats de couples aérateurs/bassins en vraie grandeur ont été utilisés. Ils ne comportent que les sites où l'en-

semble des données (débits d'air inclus) ont été mesurées. Ils se répartissent comme suit :

Type de bassin d'aération	Effectif de l'étude
Grand chenaux	13
Petits chenaux annulaires	7
« Faux » chenaux	4
Cylindriques (dont couverture plancher)	19 (7)
Parallélépipédiques	7
Autres	3
TOTAL	53

Tableau 3 – Couples aérateurs/bassins étudiés

FACTEURS INFLUENÇANT L'EFFICACITÉ DU TRANSFERT D'OXYGÈNE PAR DIFFUSEURS D'AIR FINES BULLES

Les facteurs influençant l'efficacité énergétique du transfert d'oxygène (listés dans l'ordre de présentation et non d'importance) sont les suivants :

- l'efficacité du couple agitateur-bassin d'aération,
- l'efficacité énergétique des surpresseurs, turbocompresseurs ou soufflantes,
- l'efficacité intrinsèque du diffuseur,
- le débit d'air par orifice de membrane de diffusion,
- la hauteur d'eau,
- la densité des diffuseurs,
- la disposition des diffuseurs et la configuration du bassin d'aération.

Les efficacités des appareils mécaniques influençant le rendement global du système d'aération sont évoqués à divers endroits du présent ouvrage.

Nous nous contenterons de rappeler ici que :

- la fourniture d'air, pour la gamme de taille traitée, est avantageusement assurée par des surpresseurs volumétriques proches de leur meilleur point de fonctionnement (moteur inclus

et donc pas en petite vitesse). Les soufflantes monoétage ont des efficacités énergétiques significativement inférieures à celles des appareils précédents ;

- les agitateurs à grandes pales (> 2 m) et vitesse lente (quelques dizaines de t/min) ont des efficacités très significativement meilleures (quatre fois sur le critère v_m^2/P_s utilisé dans Duchène et Héduit, 1990) que les agitateurs à vitesse rapide et petites pales. Cette remarque concerne essentiellement, comme nous le verrons par la suite la disposition en chenal. De même, une bonne implantation évitant les contre-courants (« pompage en canard ») et l'arrivée de bulles d'air dans la zone de balayage des pales seront explicitées en tant que conditions nécessaires à un gain énergétique réel.



Les types de diffuseurs

De nombreux fournisseurs occupent ou sont susceptibles de s'implanter sur le marché national. Au plan mondial, les plus significatifs sont au nombre d'une quinzaine en Allemagne, trois à quatre aux USA, un italo-finnois et un en France.

Les produits développés, en EPDM pour la majorité, prennent des formes variées : « assiettes » ou disques, tubes, plaques (figure 7) mais aussi plus rarement coussins de grande taille,

tubes longs sans support interne...etc. Quelques diffuseurs en silicone apparaissent sur le marché, mais ils n'ont pas encore été testés.

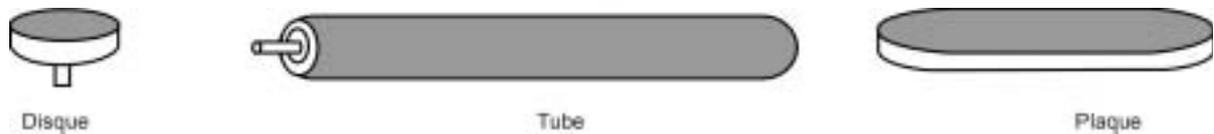


Figure 8 – Formes de diffuseurs

Les variations dimensionnelles et d'élasticité de l'élastomère sont assez impressionnantes. Toutefois, pour des débits moyens par orifice comparables, la majorité de ces produits procure des **efficacités de transfert très voisines**. Quelques types de diffuseurs moins performants ont été éliminés du marché, quelques autres sont actuellement suspectés d'être un peu moins performants que la moyenne. En tout état de cause, on peut globalement considérer les produits dominants du marché français comme étant d'efficacités comparables. Il reste toutefois nécessaire de faire valider les innovations en installations pilotes telles qu'elles existent aujourd'hui notamment en France (Antony), en Allemagne (Darmstadt) ou en Espagne (Barcelone).

Une première discrimination établie est la taille des perforations. Une valeur millimétrique (souvent fentes de 1,1 mm de long obtenues par perçage) est la référence ; les essais de perforations plus longues ont donné de moins bons résultats.

L'obtention de bulles plus petites, augmentant l'aire interfaciale (air/eau) est *a priori* favorable à des intensités accrues de transfert d'oxygène. Il paraît toutefois probable que pour l'aération des boues activées cette voie soit contrecarrée par des phénomènes de coalescence dans la partie initiale du trajet de montée des bulles [Gillot *et al.*, 2000] et pose

aussi des problèmes de pertes de charge, donc d'énergie consommée.

Les divers types de diffuseurs et leurs tailles peuvent, par ailleurs, poser des problèmes plus ou moins importants de longévité ou de tenue des performances dans le temps, d'accrochage de filasses, etc. Enfin, il faut souligner que la nature du matériau avec ses multiples additifs, son intensité de vulcanisation n'est pas complètement maîtrisée, en particulier via des formulations explicites et des contrôles (qui seraient fort onéreux).

D'autres matériaux, encore expérimentaux au moins en France, peuvent émerger, tels les silicones, moins sensibles à l'adhésion chimique et bactérienne, mais dont il faut maîtriser la vulnérabilité intrinsèque au déchirement.

Le débit d'air « par diffuseur »

La comparaison de différents diffuseurs et les relations entre le débit d'air et les performances (via le diamètre initial des bulles diffusées donc l'aire interfaciale) doivent se fonder sur le débit d'air par orifice. Le débit d'air par diffuseur, utilisé par simplicité n'est pas un critère opérationnel pertinent car la densité de perforations est différente selon les diffuseurs, elle est

limitée par le maintien d'une résistance mécanique suffisante et probablement pour éviter des phénomènes de coalescence.

Remarque : le nombre d'orifices par unité de surface est compris, selon les diffuseurs entre 7 et 20 par cm^2 , mais tous les orifices ne débitent pas nécessairement : des observations visuelles montrent que la quasi-totalité des orifices débitent pour les petits diffuseurs en forme de disques et seulement un peu plus de la moitié sur certains tubes. Sur installations réelles, l'alimentation égale de tous les diffuseurs n'est pas systématiquement assurée (entre plusieurs raquettes, ce qui est facile à contrôler, et au sein d'une même raquette, ce qui est plus délicat à maîtriser).

Le débit d'air par orifice est corrélé négativement avec l'efficacité du transfert. Dans une gamme de débit restreinte par exemple de 5 à $10 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ pour un diffuseur donné, un ajustement linéaire est adapté. Sur toute la plage de débits possibles, une courbe de corrélation

est à établir. En pratique, elle peut être simplifiée par deux droites de régression, celle correspondant aux faibles débits ayant une pente plus forte [Da Silva-Deronzier 1994] (cf. figure 9). Les pentes de ces diverses régressions linéaires sont toutefois, pour une même gamme de débit d'air par orifice et pour un diffuseur donné, variables dans un rapport de 1 à 2 [Duchène et Héduit 2000] selon les types de diffuseurs et selon la configuration diffuseurs – bassin d'aération. Ainsi, pour des immersions de 3 à 6 m on peut voir la diminution de rendement d'oxygénation s'inscrire dans une fourchette de 0,1 à 0,3 % lorsque le débit est augmenté de $10 \text{ N m}^3/\text{h}$ par m^2 de membranes perforées.

Pour chaque diffuseur, la sensibilité de l'efficacité du transfert d'oxygène au débit spécifique devrait être établie – *a priori* en installation pilote et en déterminant des lois de transposition aux différents cas de figures d'installations.

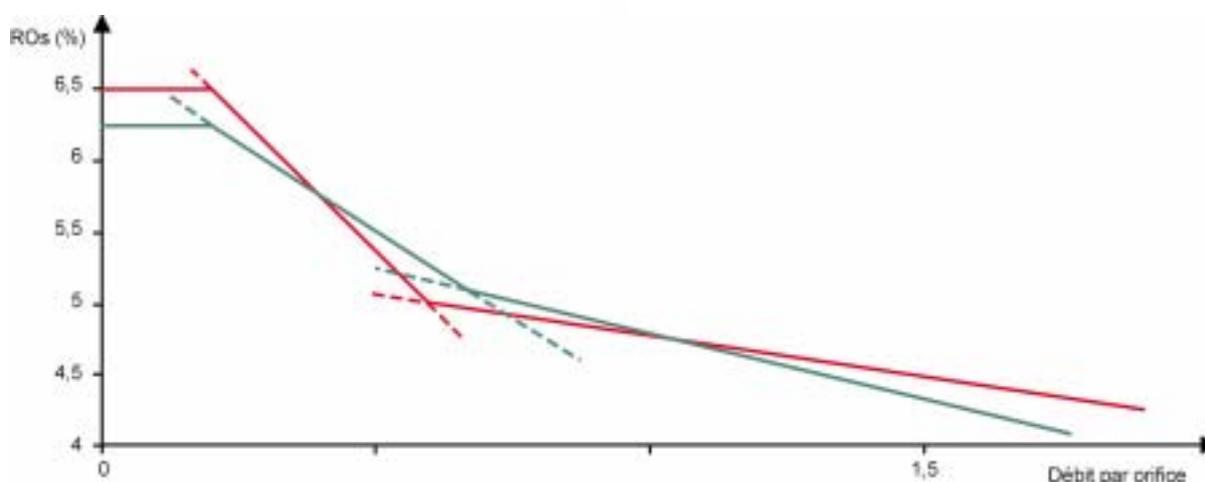


Figure 9 – Modélisation pratique de l'influence du débit d'air par orifice sur le rendement spécifique d'oxygénation (débit en l/h) – schéma pour deux diffuseurs différents (tracés rouge et vert)

La première partie de ces courbes traduit le fait qu'en dessous d'un certain débit spécifique, le nombre d'orifices débitant décroît lorsque le débit d'air tend à s'annuler. La répartition

de l'air, aux débits d'air modérés sur les diffuseurs de grande taille peut ainsi devenir un facteur limitant les performances de transfert d'oxygène.

La hauteur d'immersion de diffuseurs

La hauteur d'immersion des diffuseurs accroît, bien sûr, le transfert d'oxygène apprécié sur les critères apport horaire ($\text{kgO}_2\text{h}^{-1}$) ou rendement d'oxygénation (masse O_2 transférée/masse de O_2 diffusée). Le rendement d'oxygénation spécifique (par mètre d'immersion) décroît toutefois lorsque la hauteur d'immersion croît, par suite de l'appauvrissement des bulles d'air en oxy-

gène. L'équipe de la Techn. Univ. de Darmstadt a très bien étudié cette relation [Reichert 1997] en se limitant à la taille classique de fines bulles (3 à 4 mm, mesurée à 0,5 m au-dessus des diffuseurs sous 3 m d'eau) (cf. figure 10). Concernant l'apport spécifique brut, une plus grande hauteur nécessite évidemment une puissance consommée par le surpresseur plus importante. Ces divers effets ont tendance à s'annuler, tel qu'un exemple peut l'illustrer en annexe III.

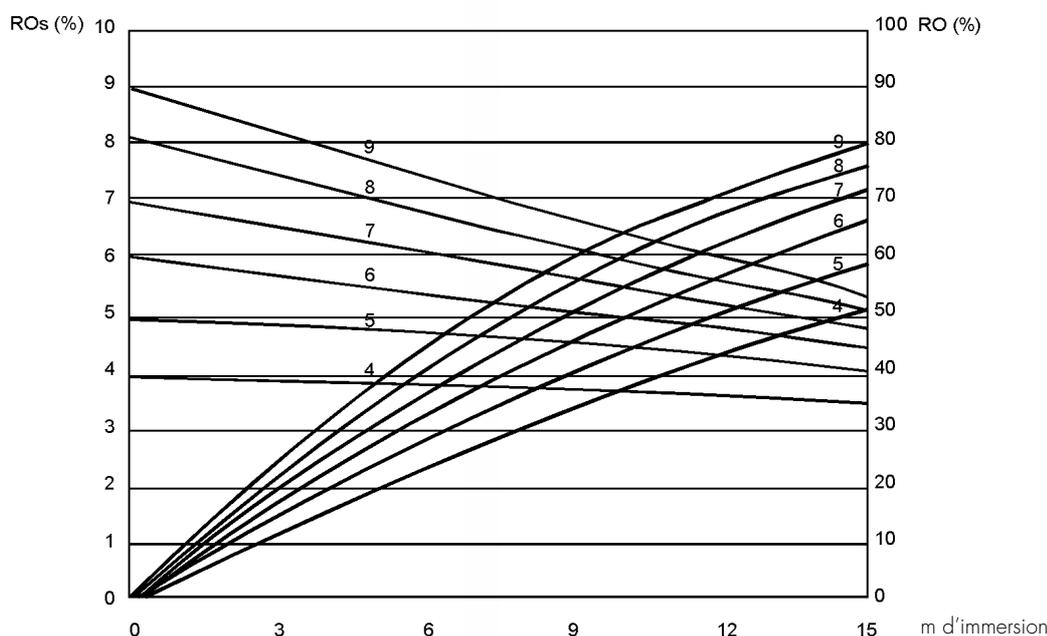


Figure 10 – Influence de la hauteur d'immersion sur les rendements d'oxygénation (d'après Popel *et al.*, 1998). Les valeurs indiquées sur la figure représentent le pourcentage de transfert à immersion 0

On voit clairement que plus l'efficacité de transfert d'oxygène est élevée, plus grande est la perte d'efficacité par mètre supplémentaire. L'efficacité est liée au produit temps de séjour x aire interfaciale, dont nous avons déjà parlé mais correspond aussi à un appauvrissement en oxygène des bulles diminuant la vitesse de transfert.

Par ailleurs, au-delà de 7 m de hauteur d'eau de nouveaux problèmes apparaissent : la surpression moyenne dans le bassin d'aération atteint des valeurs telles que la sursaturation d'azote (de l'air) dissous entraîne un déga-

zage important au niveau des ouvrages aval et implique (c'est avéré dès 8 m de hauteur d'eau) des dispositions complémentaires pour assurer ce dégazage avant le transfert de la liqueur mixte vers le clarificateur.

La densité des diffuseurs

Entre les diffuseurs, les forces de frottement entre les bulles d'air en ascension et l'eau créent des courants d'eau ascendants accélérant la vitesse de montée des bulles. C'est le phénomène des petits *spiral flows* (figure 11).

Lorsque la densité des diffuseurs croît, la distance restreinte entre diffuseurs ne permet pas à ces courants liquides de se réalimenter.

Remarque : dans des colonnes pilotes où tout le radier est occupé par un diffuseur, on démontre aisément que le mélange entre les diverses « strates » d'eau est extrêmement lent, les bulles ne faisant alors que traverser le liquide en l'agitant effectivement très peu.

Sur des installations réelles, l'influence de la densité de diffuseurs sur l'efficacité du transfert est difficile à apprécier : d'une part la manipulation est malaisée (obturation d'un diffuseur sur deux, obtention d'un débit identique par diffuseur...); d'autre part la densité de diffuseurs n'est pas indépendante des autres facteurs tels la hauteur d'eau (à volume égal, la surface du radier est alors inférieure) et le débit d'air peut être diminué.

Une exploitation statistique des essais en taille réelle a montré (Capela, 1999) que la densité de diffuseurs DD (surface de membrane perforée/surface totale du radier en %) affecte le rendement spécifique d'oxygénation RO_5 selon l'équation :

$RO_5 = A \cdot DD^k$ avec $k = 0,13$ ou $0,20$ selon deux groupes de configurations (eq. 9)

A étant le RO_5 pour $DD = 5\%$

L'exploitation des courbes des fournisseurs donne des impacts plus importants avec des k moyens de 0,27 (de un à trois diffuseurs de $0,05\text{m}^2/\text{m}^2$ de radier).

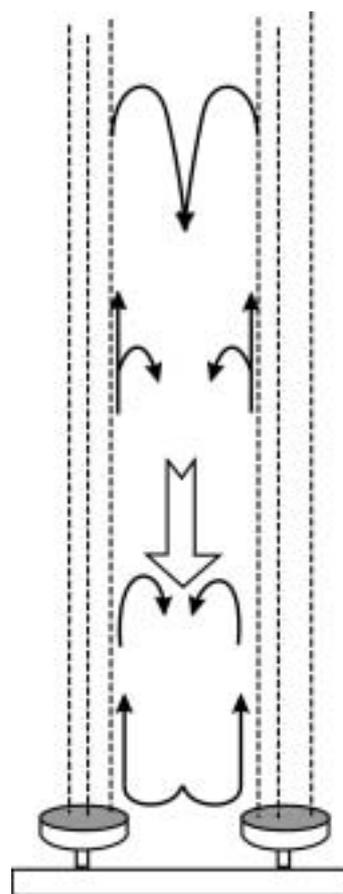


Figure 11 : Petits spiral flows entre diffuseurs

En prenant pour base ce même type de diffuseur, les diverses estimations moyennes de k donnent en pratique les accroissements d'efficacité des transferts suivants :

Nombre de diffuseurs de $0,05\text{ m}^2/\text{m}^2$ de radier		1	2	3
Efficacité	(statistique imparfaite)	Cemagref		100
	Données-fournisseurs	100	120	134

116 127

Tableau 4 – Accroissement du rendement de transfert d'oxygène en fonction de la densité de diffuseurs

Cet ensemble de données, (encore un peu imprécises) permet d'évaluer l'intérêt non négligeable d'augmenter la densité de diffuseurs, c'est-à-dire d'utiliser à la fois des hauteurs d'eau suffisamment élevées et des débits d'air par orifice relativement faibles (tendance à utiliser alors plus de diffuseurs).

La disposition des diffuseurs

Les figures 3, 5, 6 et 7 montrent les dispositions de diffuseurs les plus fréquentes. Le point essentiel les différenciant est la présence ou l'absence de zones permettant à de grands *spiral flows* de se développer entre les raquettes de diffuseurs ou entre raquettes et parois. En effet, la mise en rotation verticale de l'eau diminue le transfert d'oxygène par suite de l'augmentation de la vitesse de montée des bulles d'air.

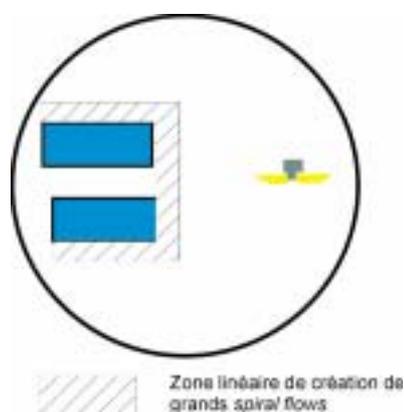


Figure 12 – Linéaire de création des grands *spiral flows*

Sans agitation, ces mouvements hydrauliques concernent l'ensemble du bassin (particulièrement dans le cas des petits bassins d'aération) comme le montre la figure 13.

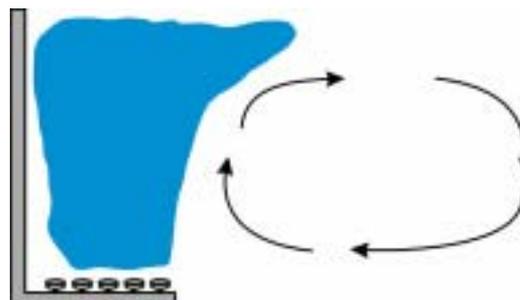


Figure 13 – Grand *spiral flow* en coupe

L'impact de ces grands *spiral flows* sur l'efficacité du transfert est extrêmement important. Les diverses mesures en sites réels, en grands bassins d'essais de différents types, ainsi que les comparaisons de résultats (cf. chapitre IV) permettent de les situer à 40-50 %. En effet, lorsqu'on supprime ces *spiral flows*, par exemple par une répartition du même nombre de diffuseurs sur l'ensemble du radier, le RO_s augmente jusqu'à 50 %. En pratique, la vitesse ascensionnelle des bulles revient, d'une cinquantaine de cm/s à des valeurs proches de 30 à 35 cm/s (Capela *et al.*, 2000).

Il est ainsi clair que l'existence des grands *spiral flows* entre raquettes de diffuseurs est le facteur le plus important diminuant le rendement d'oxygénation. Le chapitre suivant détaille l'incidence de ces grands *spiral flows* en fonction de la configuration des bassins.



LES DIVERSES CONFIGURATIONS ET L'EFFICACITÉ DU TRANSFERT

Résultats globaux

Nous nous limiterons ici aux configurations pour lesquelles le nombre d'installations testées

est suffisant pour que les résultats moyens aient un sens.

Les configurations testées peuvent être décrites comme ci-dessous :

Type	Nb	Volumes (m ³)	Hauteur d'immersion (m)	Débit d'air Nm ³ h ⁻¹ /m ³ de bassin d'aération	Débit d'air Nm ³ h ⁻¹ /m ² de membrane percée
Grands chenaux	13	1034-15830	3,8-7,6	0,4-1,6	43-48
Petits chenaux	7	117-820	2,5-5,4	0,5-2,7	29-95
Bassins cylindriques plancher	7	78-1434	3,1-6,1	0,9-2,7	67-113
Bassins cylindriques avec raquettes	12	62-1320	3,8-5,2	0,8-2,5	63-152

Tableau 5 – Caractéristiques des installations testées

Les divers critères du tableau 5 montrent que ces installations sont assez comparables, ce qui est normal puisqu'il s'agit sans exception de bassins d'aération en aération prolongée pour le traitement d'effluents domestiques ou urbains. Chacun de ces bassins a fait l'objet de plusieurs mesures d'efficacité de transfert d'oxygène en faisant varier les débits d'air, avec agitation simultanée ou



non. Plus rarement, des configurations différentes des diffuseurs y ont été testées. Les grands chenaux, qui servent de référence en tant qu'installations les plus performantes, se distinguent par une hauteur d'eau moyenne supérieure à celle des petits bassins. Cette différence apparaît toutefois secondaire dans la mesure où les performances croissantes qui y ont été constatées

varient plus avec le volume qu'avec la hauteur d'eau (incidence plus faible de la puissance d'agitation sur l'ASB) .

Les résultats présentés ci-dessous sont exprimés, pour certains en apport spécifique brut. Il convient de souligner que celui-ci intègre l'ensemble des facteurs listés au début du chapitre III.

Les résultats d'ASB moyens suivants sont donnés pour les chenaux avec agitation simultanée et pour les bassins cylindriques sans agitation simultanée.

Ainsi, comme on le verra par la suite ce sont les meilleures performances en ASB qui sont ici prises en compte. Pour les grands chenaux, ont été exclues les données récentes correspondant à des fonctionnements hydrauliques agitateurs-aération présentant des défauts évidents (agitateurs situés trop en profondeur, distance agitateurs-première raquette trop faible).

	ASB moyen kgO ₂ /kWh	ASB fourchette kgO ₂ /kWh	Accroissement du transfert par le brassage	Accroissement de l'ASB par le brassage	P. agit / P.aération	Vitesse horizontale moyenne cm/s
Grands chenaux	3,41	2,5-4,3	43 %	27 %	12,6 %	36,2
Petits chenaux	1,95	1,27-2,6	36 %	10 %	23,6 %	35,3
Bassin cylindrique plancher	3,11	2,3-3,9	+ 10 %	-11,7%	24,8 %	16
Bassin cylindrique raquettes	2,12	1,1-3,1				

Tableau 6 – Efficacité du transfert d'oxygène en fonction de la configuration système du couple aération-bassin d'aération

Les différences d'apport spécifique brut sont le reflet des pratiques actuelles. Ils ne constituent toutefois qu'une première base pour mener des investigations dans le champ de solutions optimisées possibles. Chaque valeur moyenne d'ASB est en effet affectée par divers points faibles. Il est possible de les éliminer dans la mesure où la compétition peut être encadrée par des critères de conception minimaux : les solutions qui privilégient un moindre coût d'investissement, au détriment de coûts de fonctionnement inutilement élevés pour les maîtres d'ouvrage.

- L'apport spécifique brut moyen des grands chenaux est probablement minimisé par la présence dans l'échantillon de diffuseurs suspectés d'être moins efficaces. En les éliminant l'ASB moyen passe de 3,41 à 3,55 kg O₂ /kWh.

- En tenant compte encore une fois que des configurations hydrauliques non optimisées sont écartées de l'analyse, on constate, tant pour les petits que les grands chenaux, que l'apport horaire est accru d'environ 40 % par l'adjonction d'une vitesse horizontale de l'eau créée par un agitateur. Les augmentations correspondantes de l'apport spécifique brut, calculé avec une puissance absorbée totale incluant la puissance des agitateurs sont significativement plus importantes sur les grands chenaux (+27 %) que sur les petits (+10 %). Ceci correspond à la loi physique incontournable : la surface mouillée est, relativement, d'autant plus importante que le volume du bassin d'aération est faible.

- Un autre résultat très important est à prendre en considération : la marche simultanée de

l'agitateur et de l'aération fait baisser l'ASB dans les bassins cylindriques. En soi, ce résultat implique au niveau de l'exploitation que les temps de fonctionnement de l'agitation et de l'aération soient successifs.

- Toutefois, pour faire face, le cas échéant, à des besoins de pointe extraordinaires (temps de pluie avec forte surcharge, curage de réseaux d'assainissement, rejets accidentels), le fonctionnement simultané des deux systèmes peut permettre de maximiser l'apport horaire d'oxygène tout en ne donnant lieu qu'à des surcoûts énergétiques peu significatifs sur le fonctionnement moyen.
- La contribution de l'agitation à la puissance totale consommée est presque identique dans les deux types de bassins cylindriques. Dans les petits chenaux, les vitesses horizontales moyennes induites et les effets sur le transfert d'oxygène se différencient au contraire très nettement.

Les petits chenaux annulaires

Remarque préliminaire

Les considérations hydrauliques centrées sur les petits bassins d'aération s'appliquent aussi aux grands chenaux, de même que la plupart des raisonnements mettant en cause des pratiques qu'il était logique de voir se développer dans les petites installations et qui sont aussi apparues récemment dans des installations de capacités supérieures.

Compte tenu du surcoût de génie civil d'un chenal annulaire par rapport à un bassin cylindrique, dès lors que le chenal ne peut être combiné à un autre ouvrage de volume important (bassin d'anoxie ou bassin d'anaérobiose), la question principale est celle de la limite de population à laquelle il est préférable de passer de l'une à l'autre des formes de bassin d'aération.

La combinaison d'un clarificateur central et d'un chenal d'aération annulaire conduit nécessairement, dans les petites aérations prolongées, à des dispositions non optimales : soit la hauteur d'eau sera très limitée, soit la largeur du chenal ne permettra pas le recours, dans des conditions optimales, à des agitateurs à grandes pales dont nous développerons l'intérêt ci-après.

GÉNÉRALITÉS SUR LES CHENAUX

La première caractéristique des chenaux d'aération est de « dissocier » l'aération et le brassage, en d'autres termes de donner une solution différente aux deux problèmes à régler dans un bassin d'aération : couvrir les besoins d'oxygène pour la dégradation aérobie des substances polluantes et assurer un mélange minimum pour que les trois éléments fondamentaux (polluants-bactéries-oxygène) soient en contact suffisant pour assurer le traitement mais aussi pour prévenir les dysfonctionnements biologiques (gonflements filamenteux de boues par exemple).

Dans le cas de chenaux, les problèmes posés par les *spiral flows* – grands entre raquettes, petits entre diffuseurs – sont diminués ou annulés par l'imposition d'une vitesse horizontale de l'eau qui vient « casser » les mouvements verticaux néfastes de ces courants de convection induits.

Il est aujourd'hui admis et traduit dans la modélisation hydraulique [Roustan et Line, 1996 ; Cocks *et al.*, 2000] que des vitesses horizontales de 0,3 m/s et plus annulent l'effet des petits *spiral flows* sur la vitesse ascensionnelle des bulles. L'effet de cette vitesse est illustré par la figure 14 (identique à la figure 4).

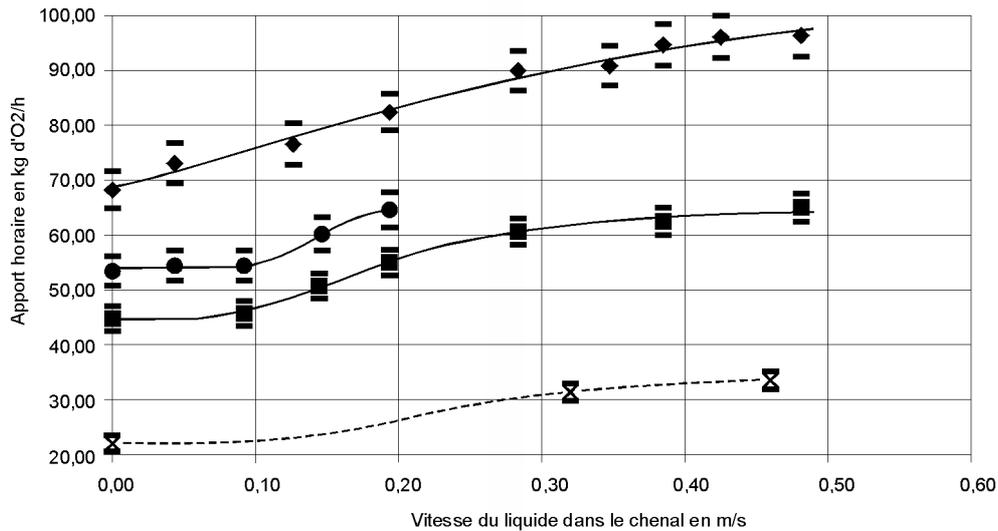


Figure 14 – Influence de la vitesse horizontale sur le transfert d'oxygénation en chenal [Deronzier et Duchène 1997], identique à la figure 4

LA MISE EN VITESSE HORIZONTALE

Comme cela a déjà été évoqué plus haut, la puissance à fournir pour obtenir une vitesse moyenne donnée dans un petit chenal est supérieure à celle nécessaire dans un grand bassin. Le rapport surface mouillée/volume du bassin, évidemment décroissant avec les volumes et les rayons de courbure pénalisants pour les petits bassins induisent des puissances spécifiques nécessaires supérieures dans les petits chenaux. À titre indicatif des vitesses moyennes de 30 cm/s sont obtenues assez aisément avec les puissances spécifiques comprises entre 1 et 2 W/m³ pour les grands chenaux, alors que l'on doit consacrer de l'ordre de 5 W/m³ pour obtenir le même résultat dans les petits chenaux.

La mise en mouvement de rotation de l'eau dans des chenaux est donc un élément fondamental de ces configurations. Le système n'est pas nouveau, il a été mis en pratique dans les années 70-80 par des sociétés allemandes (Schreiber, Menzel) avec des versions fines ou moyennes bulles. Les vitesses optimales avaient dès lors été déterminées et les défauts affectant les formes s'éloignant du chenal idéal (grands rayons, chenal plutôt étroit – hauteur d'eau/largeur ~ 1) avaient été compris lors des mesures de performances.

L'efficacité du système de brassage créant la vitesse horizontale de courant a été étudiée sur la base d'un critère global d'efficacité v_m^2/P_s [Duchène et Héduit 1990].

V_m Vitesse moyenne horizontale du fluide en m/s

P_s Puissance spécifique de l'agitateur (W/m³)

Sur cette base, il apparaît très nettement que les agitateurs lents à grandes pales (diamètre de l'ordre de 2 m ou plus), occupant une fraction significative et si possible maximale (avec 0,5 m de garde par rapport aux interfaces) d'une section du chenal étaient à peu près quatre fois plus efficaces énergétiquement que les agitateurs rapides de faible diamètre (diamètre de quelques dizaines de cm, vitesse de quelques centaines de t/min). Pour mémoire les ponts tournants des systèmes Schreiber avaient une efficacité comparable à celle des agitateurs à grandes pales.

Remarque : comme pour tous les points concernant l'hydraulique, quelques évidences doivent être rappelées puisqu'il est constaté qu'un nombre non négligeable de réalisations n'y satisfont pas. L'efficacité des agitateurs à grandes pales ne doit pas être amoindrie ou annulée par des obstacles dans le bassin créant

des pertes de charges inutiles (guides latéraux des raquettes surdimensionnés, canaux traversiers...).

LA MINIATURISATION DES CHENAUX

L'un des principaux problèmes de la miniaturisation des chenaux réside dans la faible longueur du parcours de l'eau par rapport à l'agitateur.

Distance aval : la distance minimale entre l'agitateur et la première raquette de diffuseurs placée à l'aval doit être telle que la poussée « directe » de l'agitateur intercepte toute la section et en tout cas la section au niveau du plan d'eau avant l'émergence des bulles. La figure 15 illustre cet exemple.

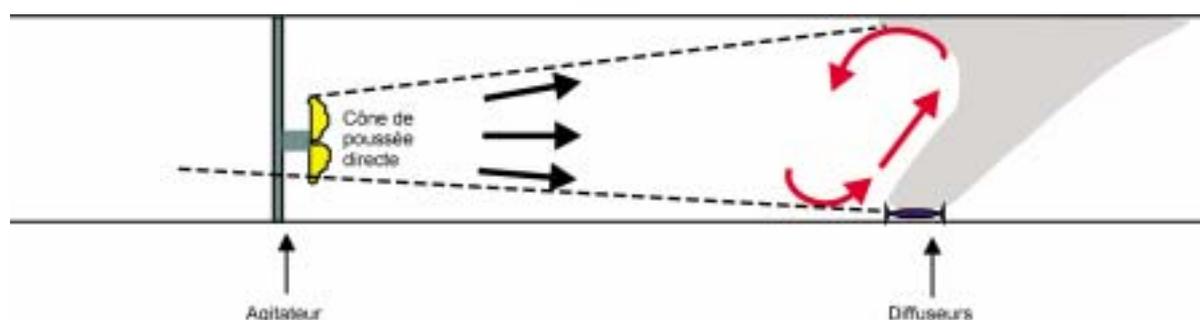


Figure 15 – En rouge le *spiral flow* amont de la première raquette de diffuseurs : distance aval minimum

La montée des bulles d'air crée un *spiral flow* amont de la première raquette produisant un contre courant en surface et un co-courant au fond.

Si le cône de poussée directe n'intercepte pas le plan d'eau avant l'émergence des bulles, la probabilité est très forte pour qu'en partie interne du chenal, le courant de retour en surface ne soit pas inversé et qu'il vienne créer le défaut hydraulique schématisé à la figure 1 (cf. p. 16). La vitesse horizontale moyenne est alors très affectée et les performances d'aération diminuent en conséquence.

La schématisation de la figure 15 montre clairement qu'il vaut donc mieux :

- concevoir les chenaux avec une hauteur d'eau supérieure à la largeur du chenal,
- disposer l'agitateur plutôt au-dessus de la mi-hauteur d'eau qu'en dessous.

Remarque : cette conclusion partielle est d'autant plus importante que la situation de

concurrence à laquelle sont soumis les fournisseurs d'agitateurs les a récemment poussés à proposer des solutions avec agitateur en position basse (bas de pale à 50 cm du radier).

En effet, les sollicitations mécaniques des agitateurs à grands pales et basses vitesses sur leurs supports sont fortes. Pour être les moins disants, les fournisseurs sont amenés à proposer des solutions leur évitant d'inclure des supports renforcés onéreux. (L'effet des couples s'exerçant sur le support est d'autant plus faible que la distance à la fixation est faible).

La première raquette de diffuseurs doit donc être située à une distance minimale à l'aval de l'agitateur : un calcul pour un bassin d'aération de 750 m³, donc de l'ordre de 5 000 ou 6 000 EH avec zone d'anaérobie pour une hauteur d'eau de 5 m et une largeur de chenal de 4,5 m, en situant le haut de pales à 2,75 m du fond donne une distance minimale agitateur-première raquette de l'ordre de 8 m (l'angle du cône de poussée directe de l'agitateur étant supposé être de 7 à 10 degrés).

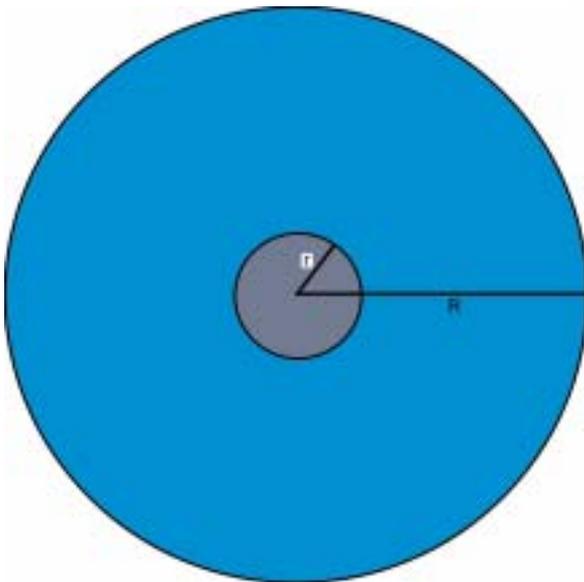
Pour un agitateur d'un diamètre de 2 m situé en partie basse cette distance devrait être, dans ce cas particulier, mais non extrême, doublée.

Distance amont : l'agitateur ne doit pas être placé dans une zone alimentée par des bulles d'air. La vitesse efficace et économique de circulation horizontale de l'eau est de 35 cm/s, voire 40 cm/s. La vitesse verticale de montée des bulles d'air est de l'ordre de 30 cm/s.

Lorsque l'effet de *spiral flows* est annulé, il convient donc de ménager entre la dernière raquette et l'agitateur une distance un peu supérieure à la hauteur d'eau. Dans le cas déjà analysé de 5 m de hauteur d'eau, une distance de garde amont de 7 m serait convenable, même si une minorité de bulles vient quand même dans le champ d'action de l'agitateur. Le périmètre moyen de ces cas de figures (environ 34 m) laisse toute la place pour loger la zone de diffusion d'air puisque la longueur « condamnée » est de l'ordre de 15 m.

CONCLUSION

Ce type de raisonnement mené sur la base d'un agitateur de diamètre de 2 m et d'une hauteur d'eau de 4 m montre qu'avec un bassin d'anaérobiose au centre, il est donc très difficile voire impossible de concevoir un



chenal annulaire doté de tous ses atouts pour une population inférieure à 2500 EH. La limite technico-économique entre les chenaux et les bassins cylindriques devrait donc évoluer entre 8000 et 2500 EH environ, en s'abaissant au fur et à mesure que le recours à des bassins d'anaérobiose pour la déphosphatation passera dans la pratique à des tailles de stations d'épuration plus faibles.

Les « faux » chenaux

Les petits bassins à noyau central, avec comme exemple typique le chenal annulaire organisé autour d'une zone de contact cylindrique, se caractérisent nécessairement par deux éléments dimensionnels :

- le rayon de courbure interne est faible,
- la largeur du chenal est importante.

LES PROBLÈMES PARTICULIERS DES FAUX CHENAUX

Le champ de vitesses qui s'établit par l'action d'un agitateur sans mise en route de l'aération peut être simplifié par l'obtention d'une vitesse angulaire constante, c'est-à-dire un gradient linéaire.

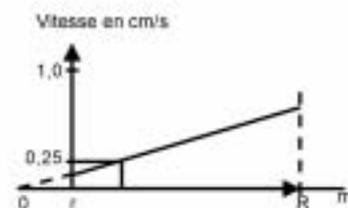


Figure 16 – Vitesse horizontale de l'eau dans un « faux » chenal, sans aération

Du bord interne vers le bord externe, il est dès lors évident que pour obtenir des vitesses de courant accroissant le transfert d'oxygène de manière significative, il va falloir obtenir des vitesses supérieures à 25 cm/s au-dessus de la grande majorité des diffuseurs, par exemple à 1/5^e de la longueur du chenal, à partir de la cloison interne.

Une application numérique simple est ici conduite pour un « faux » chenal tel que représenté à la figure 16. Les cotes ont été calculées en considérant une zone de contact en partie centrale (et une cloison interne de 0,2 m d'épaisseur). Les vitesses sans aération, sous hypothèse de vitesse angulaire constante sont de :

- 13,5 cm/s au bord intérieur du chenal ;
- 66 cm/s au bord extérieur du chenal ;
- 40 cm/s en moyenne mathématique,
- mais 47,5 cm/s en pondérant par les volumes d'eau concernés.

Si on compare à un vrai chenal on voit dès lors que, pour un résultat déjà discutable en partie interne du chenal, il va falloir dépenser plus d'énergie pour la mise en mouvement de l'eau. Un calcul rapide négligeant certaines pertes de charge montre une consommation pour l'agitation dans le « faux » chenal supérieure d'au moins 40 % à celle nécessaire dans un vrai chenal.

Lorsque l'aération est en marche, les choses s'aggravent du point de vue hydraulique. Ce sont les vitesses les plus faibles qui diminuent le plus et il y a donc déplacement des flux liquides vers l'extérieur, accroissant encore, sans effet positif sur le transfert d'oxygène, des vitesses nécessairement déjà trop élevées en périphérie et diminuant les vitesses intérieures déjà non optimales.

On a donc dans ces configurations, à la fois surconsommation de puissance pour la mise en vitesse et moindre gain de transfert par la mise en vitesse horizontale de l'eau.

Remarque : ces phénomènes avaient déjà été constatés dans les années 70-80 sur les systèmes Schreiber avec des ASB passant, dans les bassins annulaires, de plus de 3 à environ 2 kg O₂/kWh dans les bassins cylindriques.

Ces raisonnements hydrauliques sont confirmés par les champs de vitesses constatées dans les quelques cas où les mesures de vitesses ont aussi été effectuées aération en marche.

Le phénomène est probablement encore aggravé par la densité d'air débitée (débit d'air par mètre de surface de radier) en partie centrale du bassin (figure 17).

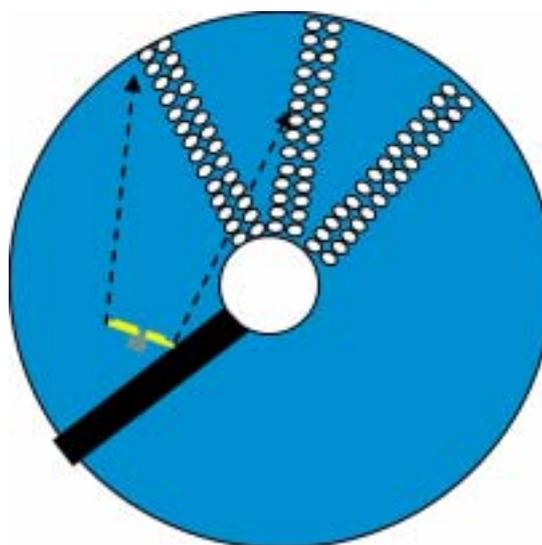


Figure 17 – « Faux chenal », ses diffuseurs et le cône de poussée de l'agitateur

En effet, lorsque des raquettes à densité homogène de diffuseurs sont mises en place, la concentration des diffuseurs, et le débit d'air sont beaucoup plus élevés par unité de surface de radier en partie interne du chenal, freinant d'autant plus les vitesses horizontales des eaux. Il faut noter que cette dernière affirmation n'est qu'une hypothèse, de plus en plus partagée, mais à notre connaissance, pas encore complètement démontrée. Des raquettes trapézoïdales, voire « triangulaires » pourraient toutefois annuler ce problème spécifique.

La figure 17 illustre par ailleurs le problème du cône de poussée directe déjà évoqué dans le plan vertical dans le cas de chenaux et se posant ici dans le plan horizontal, au niveau de la surface. Une configuration de « faux chenal » rend difficile une bonne implantation relative d'un agitateur et des diffuseurs.

Une bonne partie de ces problèmes ont été retrouvés sur des grands chenaux annulaires lorsque leur largeur est importante.

Dans la plupart de ces cas une meilleure solution d'implantation aurait pu être proposée, grâce notamment au recours à plusieurs agitateurs et à la longueur relativement élevée de trajet moyen de l'eau (périmètres à mi-largeur).

CONCLUSION PRATIQUE

Il est, nous venons de le voir, difficile de conseiller le recours à des chenaux (ici dit « faux ») dont le rapport R_{ext}/R_{int} est très élevé. Il est plus délicat de donner une valeur limite à ce critère dimensionnel. Il paraît clair qu'une valeur de ce ratio ≤ 2 définit les vrais chenaux pas trop éloignés de la configuration optimale. Il semble aussi qu'on ne puisse assigner de valeur fixe à ce critère limite indépendamment de la taille de l'installation. Pour les petits bassins d'aération objet du présent document, une valeur maximale de 2,5 pourrait être avancée comme un maximum technique. Nous sommes conscients que cela laisse peu de place à cette configuration.

Pour des raisons économiques, et tant que le recours aux bassins d'anaérobiose pour assurer la déphosphatation des eaux usées n'est pas généralisé, les « faux » chenaux peuvent être une solution envisagée dans une gamme intermédiaire, entre les bassins cylindriques et les chenaux typiques. La gamme de population la plus concernée pourrait se situer entre 5 000-6 000 et 8 000-10 000 EH.

L'annexe IV présente et essaie de hiérarchiser les divers facteurs pouvant concourir à de médiocres performances dans les petits chenaux de divers types.

Les bassins cylindriques

Les résultats présentés au tableau 6 distinguant les configurations « plancher » des configurations à raquettes de diffuseurs concentrés sont parlants. La différence d'apport spécifique brut obtenue montre la supériorité économique (en considérant la part de coût d'investissement et les dix, douze, vingt ans de coûts de fonctionnement incombant à la collectivité) de la disposition en plancher.

En effet, pour des échantillons tout à fait comparables (tableau 5) en volumes, hauteur d'eau, débits spécifiques, l'apport spécifique brut moyen est supérieur de 47 % lorsque les diffuseurs sont répartis sur l'ensemble de la surface du radier. Toutefois, il faut nuancer ce résultat, du fait de la présence dans l'échantillon de bassins aérés par raquettes, alimentées en air par une soufflante centrifuge dont le rendement est inférieur de 20 à 30 % aux surpresseurs volumétriques. En faisant abstraction de ces cas, la différence en ASB entre les deux dispositions est d'environ 40 %.

À peu près toutes les configurations respectives des raquettes et de l'agitateur ont été testées. L'exhaustivité nécessite que l'on mentionne le cas d'un couple aérateurs/bassin avec trois raquettes radiales (en arêtes de poisson) qui a

donné un ASB de 2,4 kg O₂/kWh, avec agitation simultanée. Cette donnée, relativement ancienne n'est pas incluse dans les résultats présentés ici, car les données correspondantes (débit d'air etc.) étaient incomplètes. Hormis ce cas, non répété dans des installations assez similaires, aucune de ces configurations n'a donné satisfaction, les résultats ne s'améliorant que, lorsque par ajouts successifs de raquettes pour atteindre les performances garanties pour la réception, on commençait à se rapprocher d'une configuration plancher.

La raison des médiocres performances des couples bassins cylindriques/raquettes tient encore une fois aux phénomènes hydrauliques :

- sans mise en marche simultanée de l'agitateur, les limites des raquettes créent des grands *spirals flows* abaissant le temps de séjour des bulles dans l'eau et donc la dissolution de l'oxygène ;

- lors du fonctionnement simultané de l'aération et de l'agitateur, les courants créés contournent majoritairement les raquettes de diffuseurs, rendant cette mise en mouvement horizontale très peu productive de surplus de transfert d'oxygène (10 % souvent constatés) ;

- la puissance d'agitation étant plus élevée (bulles d'air dans l'hélice, recours éventuel à des agitateurs de petits diamètres de pales) la marche simultanée des deux fonctions conduit toujours à des ASB inférieurs à ceux obtenus avec l'aération seule.

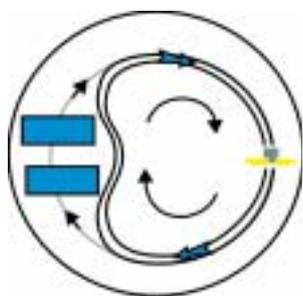


Figure 18 – Contournement hydraulique des raquettes

Il paraît donc évident que le fonctionnement normal de ces bassins est l'alternance de phases de brassage et d'aération ; le petit accroissement d'apport horaire en oxygène induit par le fonctionnement simultané des deux fonctions pouvant être mis à profit exceptionnellement lors d'épisodes de surcharges ou d'accumulation de besoins en oxygène.

Les bassins cylindriques à couverture plancher atteignent normalement des ASB de l'ordre de 3 à 3,3 kg O₂/kWh. Bien sûr, il faut que les diverses conditions citées au chapitre III soient réunies : hauteur d'eau comprise entre 3 et 7 m, débit spécifique des diffuseurs limité, fourniture d'air par des machines performantes (surpresseurs volumétriques).

Les raquettes doivent être relevables ce qui est l'un des facteurs technico-économiques limitant les tailles maximales ; des diamètres de 12 m voire 14 m semblent raisonnables.

Ainsi, les bassins d'aération cylindriques à couverture plancher peuvent occuper tout le créneau des boues activées sans bassin d'anaérobiose jusqu'à 5 000 ou 6 000 EH.

Les bassins parallélépipédiques

DISPOSITION DES DIFFUSEURS

Les constatations s'appliquant aux bassins cylindriques s'appliquent naturellement aux bassins parallélépipédiques :

- de manière identique pour la comparaison des implantations de diffuseurs (plancher/raquettes),
- de manière aggravée pour les considérations concernant l'hydraulique résultant du fonctionnement d'un agitateur à axe horizontal.

Les configurations en plancher sont donc, bien sûr, là aussi à privilégier.

CAS DES BASSINS À PAROIS À 45 °

Ces dispositions ne semblent rencontrées que dans le cas de réhabilitation de bassins d'aération anciens. Avec des configurations plan-

cher, des mesures sur deux stations ont fourni des résultats plus faibles qu'attendus (de 10 à 20 % d'efficacité en moins), alors que des essais précédents, sur de grands bassins d'aération n'avaient pas montré ce problème.

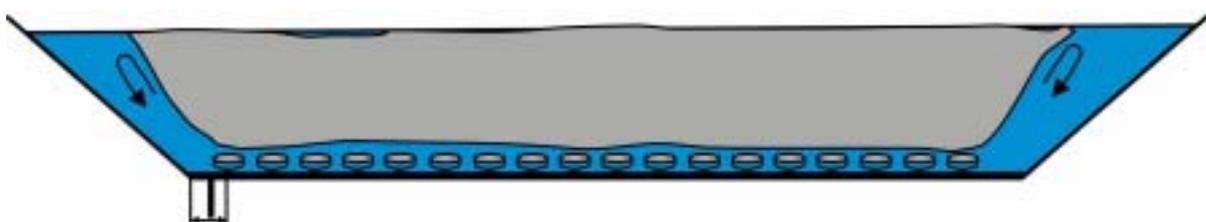


Figure 19 – Bassin à parois à 45 °

En comparant précisément ces dispositifs il ressort qu'une mesure peu onéreuse consistant à implanter les diffuseurs avec une distance minimale (l de la figure 19) à l'arête radier/parois peut rendre négligeable l'effet des *spirals flows* latéraux. Cette hypothèse, fondée sur un trop faible nombre de mesures, reste à confirmer. La disposition de détail préconisée relève pour l'instant des mesures de précaution.

LE RECOURS DES AGITATIONS À AXES VERTICAUX

Les difficultés de brassage des bassins à plan carré ou rectangulaire ont conduit à étudier et à installer des couplages diffusion d'air fines bulles/agitateurs à axe verticaux (et grandes pales).

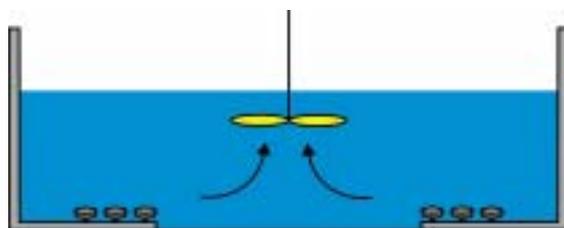
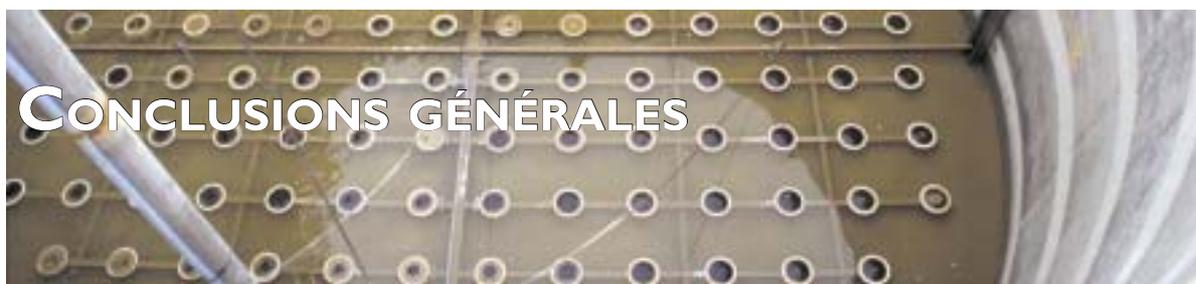


Figure 20 – Bassin parallélépipédique et agitateur à axe vertical

Une étude (non publiée) financée il y a quelques années par la Lyonnaise des Eaux n'avait pas permis de définir des règles d'implantation des diffuseurs pour une optimisation en fonctionnement simultané de l'agitateur et de l'aération.

Toutefois, un site réel (Benfeld-67) a montré sur l'un des bassins d'aération et pour les débits d'air testés un accroissement significatif (13 %) de l'apport spécifique brut grâce à la marche simultanée de l'agitateur avec une valeur d'ASB, remarquable pour cette configuration, de 3,5 kg O₂/kWh.

Ainsi, ce type de configuration peut présenter un certain intérêt en réhabilitation de bassins à turbine mais reste hasardeux. Les essais de réception devraient, dans ce cas, être obligatoires.



CONCLUSIONS GÉNÉRALES

L'insufflation d'air fines bulles par membranes élastomère présente par rapport aux autres systèmes d'aération un grand nombre d'avantages en matière de fiabilité du traitement mais aussi par rapport à l'environnement (bruit, par exemple), particulièrement en boues activées en aération prolongée sur des effluents à caractère domestique.

Elle peut aussi prouver une efficacité énergétique de transfert d'oxygène des plus intéressantes comme l'attestent les mesures réalisées sur les systèmes de référence que sont les grands chenaux oblongs ou annulaires.

Pour atteindre les performances pouvant faire économiser 10 % voire 20 % du coût de fonctionnement, encore faut-il choisir des conceptions optimisées, en tenant compte des contraintes liées à la petite taille des installations visées ici, à l'unicité du bassin d'aération et de l'agitateur.

Une régulation automatisée et un dispositif de fourniture de l'air présentant un bon rendement énergétique au point de fonctionnement

le plus fréquent (période diurne par temps sec en réseau unitaire) sont les éléments qui viendront optimiser les économies en fonctionnement réel.

CONCERNANT LE VOLET ÉLECTROMÉCANIQUE

- Le recours à des surpresseurs volumétriques s'impose,
- Le secours [de manière à ce que (n-1) surpresseurs assurent la fonction dévolue] doit être installé,
- Le régime de fonctionnement le plus fréquent doit être assuré :
 - avec un débit d'air non surdimensionné par rapport aux besoins,

– dans des conditions énergétiques non pénalisantes (la solution d'un surpresseur bivitesses est un compromis acceptable).

- pour le brassage et spécialement pour les configurations en chenal, l'utilisation d'agitateurs à grandes pales et vitesse lente s'impose.

CONCERNANT LES DIFFUSEURS

De manière générale, on peut faire les remarques suivantes.



➤ Les diffuseurs doivent être relevables, si possible en plusieurs parties de manière à laisser en fonctionnement suffisamment de potentiel d'aération et de brassage durant les brèves périodes pendant lesquelles une raquette de diffuseurs est mise hors service.

➤ Le nombre de diffuseurs, la surface totale de membranes percées doivent être suffisants pour assurer un débit d'air par orifice assez faible, au régime de fonctionnement dominant pour assurer un rendement d'oxygénation favorable. La moitié du débit maximum autorisé pour le diffuseur peut être une valeur guide.

CONCERNANT LE BASSIN D'AÉRATION

➤ La hauteur d'eau doit être comprise entre 3 et 4 m

➤ La forme du bassin d'aération peut être de trois types dominants :

- le chenal ($R/r \leq 2$) organisé typiquement autour d'un bassin d'anaérobiose,
- le « faux » chenal annulaire conçu autour d'une zone de contact ou de tout autre petit ouvrage,
- les bassins cylindriques.

Vrais chenaux et bassins cylindriques sont les formes les plus conseillées, sachant que les contraintes de site peuvent conduire à des ouvrages parallélépipédiques qui sont alors traités comme les bassins cylindriques.

CONCERNANT LES CHENAUX

➤ Une vitesse moyenne horizontale de l'eau de 35 cm/s en eau claire et aération à l'arrêt doit être obtenue. Des mesures de vitesses aération en fonctionnement devraient être effectuées, lorsque (aération en marche), des contre-courants de surface sont visibles au niveau de l'agitateur ou lorsque le gradient de vitesse intérieur-extérieur du chenal est très important (aération à l'arrêt).

Note : lorsque les autres dispositions apparaissent correctes, et sans innovation, la mesure de vitesse pourrait être la seule vérification de performance.

➤ Les rendements énergétiques (ASB) étant accrus par la marche simultanée de l'aération et de l'agitation, un certain nombre de dispositions doivent être prises pour optimiser ce couple.

➤ L'axe de l'agitateur à grandes pales doit être situé de préférence un peu au-dessus de la mi-hauteur d'eau. Une occupation de la plus grande surface possible dans la section du chenal est favorable. Des distances minimales de garde de 0,5 m par rapport aux interfaces (radier, parois, air) doivent être respectées. La distance agitateur-première raquette doit être maximale. Une distance minimale est à calculer dans chaque cas (dimensions de chenal, modèle d'agitateur) afin que le cône de poussée directe intercepte toute la section du chenal, au niveau de la première raquette (on peut y déroger sur le bord externe du chenal qui bénéficie d'une bonne poussée lorsque toute l'eau du bassin est en rotation stabilisée). Des exemples de calcul montrent que cette distance minimale peut être de l'ordre de 7 à 10 m.

➤ Une distance minimale doit être respectée entre la dernière raquette de diffuseurs et l'agitateur afin que la poussée de celui-ci ne soit pas affectée par des flux de bulles d'air. Cette distance minimale est un peu supérieure à la hauteur d'eau du chenal.

➤ Il est nécessaire d'éviter les obstacles créant des pertes de charges singulières inutiles (guides latéraux de relevage de raquettes surdimensionnés, canaux traversiers par exemple).

➤ Si les débits d'air ne sont pas particulièrement élevés (ce qui peut être le cas pour les fortes profondeurs d'eau et des besoins d'aéra-

tion très élevés en pointe) le regroupement des raquettes, sans laisser de place intermédiaire aux grands *spiral flows* est la règle.

➤ Dans les faux chenaux, pour éviter des flux d'air trop intenses en partie centrale, des raquettes trapézoïdales, voire triangulaires devraient être préférées.

➤ Ces diverses contraintes conduisent à penser qu'il n'est guère possible de concevoir des vrais chenaux d'aération par insufflation d'air pour des populations inférieures à 2 500 EH. Toutefois, ils ne semblent montrer un avantage significatif par rapport aux bassins cylindriques qu'avec des tailles un peu plus importantes.

CONCERNANT LES BASSINS CYLINDRIQUES

➤ Ils présentent un fonctionnement optimum (ASB maximisé) en alternant les phases d'aération et de brassage.

➤ Ils doivent être conçus en couverture plancher (diffuseur occupant toute la surface du radier, en tous cas le maximum possible pour être relevables).

Note : l'ensemble des essais réalisés avec disposition en raquettes concentrées ont démontré des performances insuffisantes par rapport aux autres systèmes d'aération.

➤ Ils peuvent occuper les créneaux des plus petites installations, jusqu'à 6 000 voire 8 000 EH avec des ASB standard qui devraient rester en eau claire supérieurs à 3 kgO₂/kWh.

La grille suivante de formes de bassin ainsi possibles ou conseillées est *in fine* la suivante ; les « faux » chenaux restant une solution possible mais pas expressément conseillée.

Note : dans le schéma ci-dessous, les valeurs de la population doivent être considérées comme approximatives.

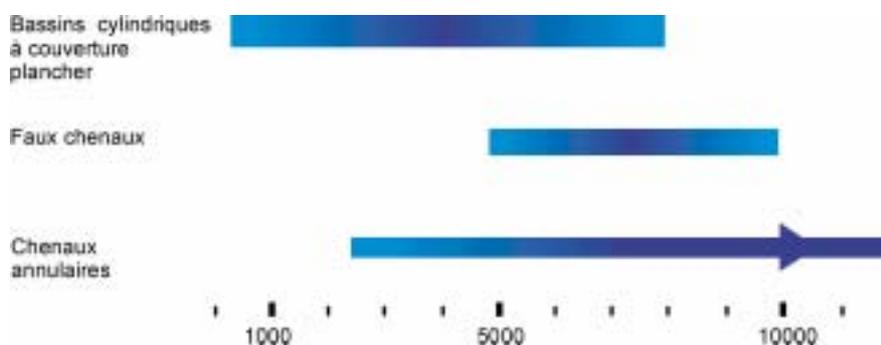


Figure 21 – Configurations conseillées en fonction de la population en aération prolongée



LISTE DES ANNEXES

40

Annexe 1 – Étapes de la mesure d'oxygénation en eau claire : cas de l'insufflation d'air

Annexe 2 – Mesures du débit d'air

Annexe 3 – Influence de la hauteur d'eau

Annexe 1 – Étapes de la mesure d'oxygénation en eau claire

Cas de l'insufflation d'air

La mesure des performances d'oxygénation d'un système d'aération consiste à déterminer la vitesse de dissolution de l'oxygène (contenu dans le gaz insufflé : air ou oxygène pur), dans l'eau par le système à tester. La vitesse de transfert pour une concentration initiale nulle d'oxygène est égale au « coefficient de transfert » noté « $K_L a$ ». Par calcul, on obtient la quantité d'oxygène qui pourra être transférée par heure, c'est « l'apport horaire (AH) » et par suite « l'apport spécifique brut (ASB) » qui rend compte du coût énergétique de ce transfert.

La méthode pratique est celle décrite ci-dessous ; avant toute mesure, cinq éléments doivent être connus.

Communication du bassin d'aération avec un autre bassin

Dans certaines configurations, le bassin d'anoxie ou d'anaérobiose est en communication directe avec le bassin d'aération. Il convient, dans ce cas, d'obtenir ces passages, au moins grossièrement afin de limiter les échanges d'eau. Les systèmes amovibles depuis le dessus du bassin seront préférés.

L'état de saturation en oxygène de l'eau

En effet, il est primordial de déterminer la concentration maximale à l'équilibre appelée C_s . Cette concentration n'est atteinte qu'au bout de plusieurs heures de fonctionnement continu de l'aérateur. Cette durée préalable, de l'ordre de 24 h et au moins d'une nuit, permet aussi de « rôder » les éléments mécaniques et de purger et d'assécher les canalisations d'air qui ne manquent jamais d'être partiellement emplies d'eau suite au montage. Il est recommandé aussi de purger les canalisations avant la mesure.

Hauteur d'eau

Un dernier point à vérifier est la hauteur d'eau. La mesure des performances doit être réalisée, au plus, avec 0,5 m d'eau manquant par rapport à la hauteur d'eau de fonctionnement prévue. Cette remarque vaut pour les systèmes déprimogènes et les systèmes d'insufflation d'air. Au-delà de 0,5 m, l'extrapolation des résultats de transfert à la hauteur d'eau prévue de fonctionnement est trop peu précise. Avant la mesure, on repère un niveau, de préférence de façon visible, ce qui servira de référence au cours des mesures. En fin de mesure, lorsque le système d'aération et le brassage sont à l'arrêt, on mesure précisément la hauteur d'eau et par différence avec le repère, on accèdera aux hauteurs d'eau des différentes mesures.

Préparation du matériel

Les appareils de mesure utilisent des sondes polarographiques. Celles-ci ont besoin d'être polarisées quelques heures avant d'être mises en service. Il convient donc de brancher les oxymètres plusieurs heures avant la mesure (la veille par exemple) et de les pré-calibrer sur la valeur de saturation à l'air.

Sur le terrain, les appareils seront d'abord calibrés sur la valeur du zéro-mesure³ en les plongeant pendant 1/4 d'heure dans une eau sulfitée (environ 20 g pour un seau soit la valeur de trois cuillers à café). Une fois les sondes mises en place, les appareils sont calibrés sur la valeur de saturation (vérifiée par dosage de Winkler).

³ Il existe une différence entre le zéro-mesure et le zéro-électrique. Ces deux zéros correspondent seulement lorsque la sonde est neuve.

Organisation chronologique des opérations sur le terrain

1 Le bassin d'aération étant rempli d'eau propre, et l'aérateur en fonctionnement en continu depuis plusieurs heures, un échantillon d'eau est prélevé afin de déterminer la valeur de la concentration d'oxygène dissous à saturation, C_s , par dosage chimique immédiatement après le prélèvement (méthode de Winkler). Lors du prélèvement, ni l'aération, ni l'agitation dans le cas de bassins où aération et brassage sont simultanés ne sont arrêtées. La température de l'eau au $1/10^{\text{e}}$ de degré près ainsi que la pression atmosphérique sont notées. Pour ce qui concerne la pression atmosphérique, **il s'agit de la pression du site et non de celle ramenée au niveau de la mer.**

2 Les oxymètres pré-calibrés sur la valeur de saturation sont calibrés sur la valeur de 0. Les sondes oxymétriques sont ensuite mises en place dans le bassin aux positions *ad hoc* selon la configuration du couple aérateur/bassin. Il est important de placer les sondes têtes vers le bas, inclinées à 45 % afin d'éviter que des bulles ne viennent se bloquer sur la membrane. Pour le cas des sondes à électrolyte, le positionnement de la sonde vers le bas permet d'éviter la mise hors d'usage en cas de formation de bulles d'air dans la cellule.

3 Le dosage de Winkler est effectué. On vérifie à l'aide de la table de solubilité de l'oxygène dans l'eau douce (table de Mortimer : norme AFNOR NF T 90-032) que la concentration mesurée dans le bassin est dans la gamme des concentrations à saturation théoriques pour la température et **la pression équivalente** au moment du prélèvement. **La pression équivalente effective à laquelle le gaz est dissous est égale à la pression atmosphérique locale augmentée de la pression due à une fraction de la colonne d'eau.** Empiriquement, il a été constaté que cette surpression est comprise dans une fourchette allant de 25 % à 40 % de la hauteur d'immersion et en moyenne à peu près d'1/3. Toutefois, des surpressions de 45 % ont été parfois constatées sur des installations à très forte puissance d'aération et de forte profondeur (10 m). L'équation ci-après indique le mode d'expression du C_s dans le bassin (aux conditions de température T du bassin et de pression équivalente : P + DP) en fonction du C_s à la température T du bassin et la pression atmosphérique P.

avec :

$$(C_s)_{P+DP,T} = (C_s)_{P,T} \frac{P+DP-p}{P-p}$$

P : pression atmosphérique (hPa),

ΔP : surpression de la colonne d'eau (hPa),

T : température de l'eau (°C),

p : pression de vapeur d'eau en contact avec l'air à la température T (hPa),

$(C_s)_{P+\Delta P,T}$: valeur de saturation dans le bassin à la température T (mg/L),

$(C_s)_{P,T}$: valeur de saturation théorique à la température T et à la pression atmosphérique P du site (mg/L) .

$(C_s)_{P+\Delta P,T}$, P et T sont mesurés (mg/L),

$(C_s)_{P,T}$ est relevé dans la table de Mortimer (Norme NF T90032) (mg/L),

d'où ΔP s'en déduit.

En première approximation, on voit que la surpression apparente est égale à :

$$\Delta P = (P_{\text{atmosphérique}} \times \frac{C_s \text{ du bassin}}{C_s \text{ de la table}}) - P_{\text{atmosphérique}}$$

La pression de vapeur saturante (p) se trouve dans le Manuel de chimie. Elle peut être négligée. Elle ne joue que sur le centième de mg/l.

Note : dans le cas où le gaz insufflé est de l'oxygène pur, les valeurs de concentration des tables de Mortimer sont à multiplier par 4,72.

4 On peut à présent calibrer les oxymètres, dont les capteurs ont été mis en place dans le bassin, sur la valeur de saturation ainsi déterminée et vérifiée. Si la température du bassin a varié entre le moment du calibrage à saturation et le moment où le prélèvement de l'échantillon pour le dosage a été fait, le calibrage des appareils devra en tenir compte. La variation du Cs en fonction de la température est de l'ordre de 0,27 mg/l par degré Celsius aux alentours de 10 °C et 1015 hPa. On peut noter qu'il n'est pas absolument nécessaire de calibrer les appareils sur la valeur exacte de la saturation. On parlera alors d'un Cs de calibrage. Cette valeur de Cs de calibrage sera utilisée uniquement pour la détermination du coefficient de transfert. Pour le calcul de l'apport horaire c'est bien évidemment le Cs réel (effectif lors de la mesure) qui sera utilisé dans le calcul.

5 On peut à présent dissoudre le catalyseur (chlorure de cobalt) de la réaction sulfite/sulfate. Le catalyseur accélère l'oxydation du sulfite et évite ainsi qu'une fraction de celui-ci ne continue à être lentement oxydé pendant la mesure de réoxygénation.

6 La concentration d'oxygène dissous est ensuite amenée à zéro par dispersion de sulfite de sodium anhydre en poudre dans la zone d'influence du système d'aération ou au-dessus de l'agitateur. Dans le cas de l'insufflation d'air par fines bulles avec dissociation du brassage (chenaux), l'introduction du sulfite peut s'effectuer avec l'aérateur à l'arrêt, au-dessus de l'agitateur en fonctionnement. Une période d'au moins une demi-heure est recommandée après l'introduction du produit pour assurer un mélange homogène avant la remise en marche de l'aérateur et le début de la mesure.

7 Lorsque tout le sulfite introduit a été oxydé, la concentration d'oxygène dissous est relevée toutes les 30 secondes dès que la majorité des appareils a dépassé la valeur de 1 mg/l. Les valeurs sont ainsi notées jusqu'à ce que des concentrations immédiatement supérieures à 80 % du Cs de calibrage soient lues. La température de l'eau (T) est notée au début et à la fin de la période de relevé, de même que la hauteur d'eau relative par rapport au repère mis en place.

ANNEXE 2 – Mesure du débit d'air

La mesure du débit d'air peut être pratiquée soit à la sortie du surpresseur soit au niveau des raquettes. La mesure sur chaque rampe d'alimentation permet d'observer la répartition des débits mais le débit total calculé par l'addition de chaque mesure est alors moins précis. De tous les appareils de mesure de débit d'air, le tube de Pitot se situe parmi les moins onéreux et les plus simples de mise en œuvre (à l'installation près des points de mesure). De plus, il crée des pertes de charge négligeables contrairement au diaphragme (certes plus précis), ou tout autre appareil de mesure de débit faisant intervenir une pression différentielle (à l'exception du coude calibré dont l'usage n'est pas répandu).

Quand aucun point de mesure correct ne peut être trouvé sur une canalisation, ou si on ne dispose pas du matériel nécessaire, le débit d'air peut être approché en mesurant

- la vitesse de rotation du surpresseur,
- la pression au refoulement,
- la température de l'air à l'aspiration.

44

À partir de ces données, les fournisseurs sont en mesure de calculer un débit d'air aspiré et un débit d'air refoulé (une partie du débit aspiré est « perdu » au sein de la machine, c'est le débit de fuite). Une attention particulière devra être portée aux conditions physiques auxquelles sont exprimés les débits d'air. Les constructeurs ont l'habitude de parler de m³ d'air exprimé à 1013 hPa et 20 °C. Les méthodes d'expression du débit d'air à différentes conditions de pression et de température sont présentées à la fin de cette annexe.



Principe de mesure au tube de Pitot

La vitesse de déplacement de tout fluide peut être approchée par le biais d'un organe déprimogène installé au sein de celui-ci tel le tube de Pitot double. Le tube de Pitot double plus communément appelé tube de Pitot permet de mesurer d'une part la pression totale (tube central) et d'autre part la pression statique (tube externe). La différence entre les deux est la pression dynamique.

$$P_{\text{totale}} = P_{\text{statique}} + P_{\text{dynamique}}$$

Cette pression dynamique est directement reliée à la vitesse du fluide par la loi de Bernoulli :

$$v = \frac{\sqrt{2 \times P_d}}{\rho}$$

Avec

P_d : pression dynamique exprimée en Pascal (Pa) donnée par l'appareil de mesure

ρ : masse volumique du fluide exprimée en kg/m^3 aux conditions de la mesure.

La masse volumique de l'air à 0 °C et 1013 hPa est de 1,2929 kg/m^3

En connaissant la section de la canalisation au point de mesure, on calcule aisément le débit

$$\text{Débit} = \text{vitesse} \times \text{section}$$

2 Nombre de points de mesure

Les recommandations quant aux points et conditions de mesure sont décrites dans la norme NF X 10-112 (1977). La norme recommande un minimum de douze points de mesure répartis sur quatre rayons pour une section circulaire. Plusieurs méthodes sont proposées pour calculer la vitesse moyenne. Entre autres, une méthode arithmétique permet de calculer la vitesse moyenne dans la section, par simple moyenne arithmétique des vitesses locales judicieusement choisies. Pratiquement, le mesurage en un tel nombre de points est très consommateur de temps. Aussi, par économie, on peut ne faire qu'une mesure au centre de la canalisation et appliquer un coefficient de correction suivant la nature de la canalisation et son diamètre. Ce coefficient reste à déterminer pour chaque canalisation. Cette méthode préjuge aussi du fait que le flux dans la canalisation est parallèle à l'axe de celle-ci et homogène par rayon. Ces conditions sont respectées pour les endroits de mesure conformes.

3 Pré-installation des points de mesure au tube de Pitot*

Les caractéristiques des piquages à installer et leur position sur les canalisations sont les suivantes⁴ :

– le piquage doit être installé sur une section droite, de forme simple. Au voisinage de la section de mesure, l'écoulement doit être laminaire et symétrique par rapport à l'axe de la conduite et ne doit présenter ni turbulence excessive, ni rotation. Il faudrait donc se situer à une distance d'environ 10 fois le diamètre de la canalisation en aval de tout élément perturbant l'écoulement du type rétrécissement, coude, et 30 diamètres pour ce qui concerne les vannes ; la distance minimale est de 60 cm pour des conduites DN 80. Il est souhaitable aussi que le piquage soit à environ six fois le diamètre de la canalisation en amont de tout élément perturbant l'écoulement. Il est préférable qu'il soit installé dans l'axe du coude amont afin de pouvoir éventuellement vérifier l'équi-répartition des vitesses sur le diamètre ;

– le piquage est constitué d'un téton à filetage femelle interne 1/4 de pouce-pas gaz, n'excédant pas 15 mm de long. (Une longueur plus importante rend l'introduction du tube de Pitot impossible). Ce téton est soudé perpendiculairement à la canalisation à l'endroit *ad hoc* (prévoir un boulon pour chaque téton afin de reboucher le piquage) ;

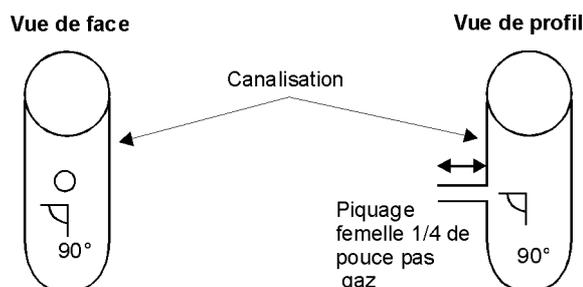
– le diamètre du trou doit être au moins de 8 mm afin de pouvoir y introduire le tube de Pitot (tube de 6 mm de diamètre coudé à 90°) ;

– un autre piquage identique au précédent et situé à l'aval de celui-ci (10-15 cm) permet la mesure simultanée de la température. Ce dernier peut être omis et la température est alors mesurée *via* le premier piquage.

Remarques :

– dans le cas où l'épaisseur de la canalisation serait suffisamment importante pour supporter le filetage, le téton n'est pas nécessaire.

– afin de ne pas introduire de limaille dans la canalisation, il est impératif de percer lorsque le surpresseur est en fonctionnement. Le port de lunettes est donc obligatoire.



⁴ Elles seront reprises dans la prochaine version du CCGT, fasc. 81, titre 2

* Méthodologie développée par le CIRSEE (Carrand *et al.*, 1997)

4 Unités d'expression des débits d'air

Comme tout gaz, l'air est soumis à la loi des gaz parfaits exprimée comme suit :

$$PV = nRT$$

Avec

P : la pression du gaz en Pa (1 bar = 101300 Pa)

V : le volume en m³

n : le nombre de moles (= masse de gaz divisée par la masse molaire de ce gaz = m/M)

R : la constante des gaz parfaits (R = 8,3143 J. mol⁻¹.K⁻¹)

T : la température en °Kelvin.

Cela signifie que pour une température donnée et une quantité de gaz donnée, le produit de la pression multipliée par le volume est égal à une constante.

Cette propriété permet d'exprimer :

a) le volume de gaz à la température et à la pression de notre choix.

De l'expression précédente on peut écrire

$$\frac{P_1 \times V_1}{T_1} = \frac{P_0 \times V_0}{T_0} = nR$$

46

Où P₁ ; V₁ et T₁ expriment la pression, le volume et la température du gaz par exemple dans la canalisation et,

P₀ ; V₀ et T₀ expriment la pression, le volume et la température du gaz aux conditions normales à savoir 1013 hPa et 273,3 °K (soit 0 °C).

Ainsi l'expression du volume (V₀) du gaz aux conditions normales exprimé en fonction de P₁ ; V₁ et T₁ des conditions de mesure s'écrit :

$$V_0 = V_1 \times \frac{P_1 \times T_0}{P_0 \times T_1}$$

Cette formule nous permet ainsi d'exprimer le débit d'air mesuré dans la canalisation aux conditions normales (1013 hPa et 0 °C).

b) de calculer la masse d'oxygène de l'air insufflé;

Toujours d'après l'équation des gaz parfaits :

$$n = \frac{P_0 V_0}{RT_0} = \frac{PV}{RT}$$

En n'oubliant pas de multiplier le volume d'air par 0,2095 pour tenir compte du pourcentage de volume occupé par l'oxygène dans l'air, on obtient pour 1 m³ d'air à 0 °C et 1013 hPa, les valeurs suivantes.

Pression (Pa)	Température (°K)	Masse d'oxygène dans 1 m ³ air (g)
101300	273,3 (soit 0°C)	298,67
101300	293,3 (soit 20 °C)	278,27

Les valeurs arrondies son facilement mémorisables : 300g O₂/m³ à 0 °C et 280 à 20 °C.

ANNEXE III – Influence de la hauteur d'eau

La station d'épuration de Graye/Mer (14) est conçue pour traiter des charges variables avec des fonctionnements saisonniers à deux hauteurs d'eau (3 m et 6 m) dans le bassin d'aération.

Le bassin d'aération est un cylindre d'un diamètre de 10 m équipé de 144 diffuseurs (disques) uniformément répartis sur le plancher. L'air est fourni par un surpresseur (16,5 kW pour 6 m, 9,9 kW pour 3 m). Un agitateur à petites pales de 5 kW assure un brassage pendant l'arrêt de l'aération.

Les mesures ont donné les résultats suivants :

Hauteur d'eau (m)	Volume (m ³)	Débit d'air (Nm ³ .h ⁻¹ /m ²)	ROs (%/m)	Puissance spécifique (W/m ³)	Apport horaire (kgO ₂ /h)	ASB (kgO ₂ /kWh)
6,05	475	99,5	5,2	34,7	53,9	3,2
3,05	243	112,6	5,5	40,5	31,5	3,2

On note que les divers effets liés à la variation de hauteur d'eau se compensent pour aboutir au même rendement énergétique. On note aussi un bon rendement pour ce type de configuration, notamment du fait des faibles débits d'air par diffuseurs.

Sur les rendements spécifiques d'oxygénation, l'abaissement du transfert avec une hauteur d'eau accrue (cf. figure 10) a plus d'influence que la diminution du débit d'air par diffuseur (cf. figure 9), qui n'est ici que de 12 %.

Le doublement de volume réactionnel s'accompagne ici d'un accroissement de l'apport horaire de 70 % avec le même surpresseur.

ANNEXE IV – Revue des problèmes affectant l’efficacité du transfert dans des chenaux miniatures

On distingue deux types principaux dans les exemples suivants :

type I : vrais chenaux avec rayon externe/rayon interne < 1,5

type II : faux chenaux avec le même rapport compris entre 2 et 5

Le tableau ci-dessous rassemble les résultats qui nous sont apparus comme les plus intéressants à commenter.

Site n°	Type	V (m ³)	H (m)	DD ⁵ (%)	Type d’agitation	P _{agit.} (kW)	P _{aération} (kW)	P _s (kW.m ⁻³)	ROs (%/m)	ASB (kgO ₂ /kWh)	Handicaps types
1	I	216	3,1	6,7	P	2,64	9,49	56	7,2	1,30	(1), (3), (5)
2	I	135	3,3	7,0	PP	2,33	5,02	47	4,2	1,48	(1), (3)
3	I	117	2,5	2,5	PP	1,58	6,52	69	4,8	1,27	(1), (2), (3), (4), (5), (6)
4	I	320	3,0	4,8	GP	1,06	7,32	26	5,6	2,81	(3)
5	II	823	5,4	7,5	GP	2,31	20,59	28	3,8	1,90	(2), (8)
6	II	820	5,4	5,0	GP	2,43	10,13	16	5,5	2,49	(2), (7), (8)
7	II	865	5,5	4,2	GP	4,41	17,60	26	5,2	2,26	(7), (8)

Avec GP = agitateur grandes pales, vitesse lente

PP = agitateur petites pales, vitesse rapide

L’exemple du bassin d’aération n° 3 est riche d’enseignements sur l’impact de divers facteurs sur l’ASB d’un petit chenal accumulant les handicaps. Ce bassin d’aération est équipé de deux raquettes de diffuseurs diamétralement opposées. Une soufflante centrifuge alimente les diffuseurs et un agitateur petites pales est chargé d’assurer la vitesse horizontale dans le chenal. La hauteur d’eau est de 2,25 m, le périmètre moyen proche de 30 m.

Les influences négatives sur le transfert peuvent être approchées comme suit, pour les divers handicaps réduisant l’ASB :

(1) utilisation d’un agitateur petites pales : 1 à 1,2 kW consommé en plus, soit environ. 16 % de réduction de l’ASB ;

(2) agitateur dans le champ de bulles. L’aération ralentit ici la vitesse de 15 cm/s (au lieu de 1 à 2 cm/s lorsque les agitateurs ne sont pas directement affectés par l’aération) ce qui abaisse le transfert d’oxygène de l’ordre de 25 % ;

(3) la petite taille du chenal implique un rapport volume/surface mouillée très abaissé, par rapport aux grands chenaux ; ceci double globalement la puissance d'agitation nécessaire soit une incidence négative sur l'ASB d'environ 7 % ;

(4) la vitesse moyenne sans aération n'est que de 21,5 cm/s ce qui suggère un transfert moindre, de l'ordre de 10 %, par rapport à l'optimum obtenu au-dessus de 30 cm/s ;

(5) fourniture d'air par ventilateur à grande vitesse (soufflante) : perte de rendement de l'ordre de 25 % par rapport à un surpresseur volumétrique.

(6) faible hauteur d'immersion ($\ll 3$ cm) : effet sur l'ASB : 5 à 10 % ;

Si, sur ce cas, on corrige l'ASB mesuré par les divers coefficients ci-dessus affectant le rendement de transfert, on arrive à une valeur s'approchant de 3 kg O₂/kWh. Le fait que cette valeur soit inférieure aux meilleures performances mesurées sur les grands chenaux d'aération est due à la minoration des divers coefficients (1) à (6) ci-dessus dans le souci de ne pas exagérer l'importance de chaque facteur analysé séparément. De plus, dans ce cas d'espèce, la disposition longitudinale de diffuseurs tubulaires avec de très faibles vitesses de courant est sans doute un facteur défavorable supplémentaire, pesant sur le rendement de transfert. Bien sûr, les facteurs inhérents à la petite taille expliquent qu'on ne puisse arriver aux ASB proches de 4 kg O₂/kWh des meilleurs grands chenaux.

Dans le cas des types II, c'est-à-dire, de chenaux larges par rapport à leur longueur développée et avec un rayon de courbure intérieur faible les phénomènes spécifiques influençant le transfert sont de deux ordres :

50

(7) non-homogénéité en largeur de champ de vitesses horizontales sous l'effet combiné de la puissance relativement faible nécessaire, de la largeur importante du chenal et de la distance agitateur – 1^{re} raquette aval courte.

(8) efficacité moindre des agitateurs grandes pales du fait que la surface occupée par les pales est relativement faible par rapport à la section du chenal et que des contre-courants intérieurs se créent plus facilement du fait du faible rayon intérieur du chenal.

Les divers problèmes affectant les performances de chaque bassin sont répertoriés en dernière colonne du tableau 4 avec les codes chiffrés utilisés dans les commentaires ci-dessus. Le chenal n° 4 présente à peu près ce qui peut se faire de mieux en matière de petits chenaux, montrant malgré cela des performances inférieures à la majorité des bassins cylindriques en couverture plancher.

Bibliographie

AFNOR NF. X 10-112. « Mesure du débit des fluides dans des conduites fermées – Méthode d'exploration du champ des vitesses au moyen de tubes de Pitot doubles », novembre 1997, 47 p.

BOUTIN P., « Risques sanitaires provenant de l'utilisation d'eaux polluées ou de boues de stations d'épuration en agriculture », *Techniques et sciences municipales – L'eau*, 1982, vol. 77, n° 12, p.547-557.

CAPELA, S., *Influence des facteurs de conception et des conditions de fonctionnement des stations d'épuration à boues activées sur le transfert d'oxygène*, Thèse de doctorat, université Paris XII, 1999, Val de Marne, 146 p. + annexes.

CAPELA, S, ROUSTAN, M., et HÉDUIT, A. *Transfer number in fine bubble diffused aeration systems*, IWA PARIS, 2000, tome 3, p. 283-290.

CARRAND G, REAU Ph, *Guide pratique du contrôle de l'insufflation d'air*, Doc CIRSEE/CITER, 1997, 45 p.

CCTG Fasc. 81 Titre II, *Conception et exécution d'installations d'épuration d'eaux usées*, ministère de l'Équipement, du Logement et des Transports, 1992, Texte officiel n° 92-7 TO, 110 p.

– Note : une recommandation de modifications de ce texte est disponible, jusqu'à la parution en 2002 d'une nouvelle version, notamment sur le site www.cemagref.fr/produits.

COCKS, A., DO-QUANG. Z., CHATELLIER, P., et AUDIC, J.M. (2000). *CFD modelling of activated sludge aeration tanks : impact of mixers and air diffusers arrangement on the hydrodynamics and oxygen mass transfer*, IWA PARIS 2000, tome 3, p. 374-380.

DA SILVA-DERONZIER G., *Éléments d'optimisation du transfert d'oxygène par aération en fines bulles et agitateur séparé en chenal d'aération*, Thèse de doctorat de l'université Louis Pasteur, Strasbourg, 1994, 126 p. + annexes.

DERONZIER G., et DUCHÈNE Ph. « Vérification de la vitesse horizontale dans les chenaux d'aération pourvus d'un système d'aération par insufflation d'air », *Tech. Sci. Méth.* Vol. 3, 1997, pp. 35-41.

DUCHÈNE Ph. et HÉDUIT A., « Aération et brassage en stations d'épuration : efficacité des divers systèmes », *Informations techniques du Cemagref*, 1990, vol. 78, n° 2, p 7.

DUCHÈNE Ph et HÉDUIT A. « Quelques enseignements tirés des essais en eau claire réalisés par le Cemagref », *La Tribune de l'eau*, 1996, 49, (583/584), p. 27-31.

DUCHÈNE Ph., et HÉDUIT A., « Expérience et interprétation de mesures de performances d'aération en boues activées », 23^e Symposium sur les eaux usées. Réseau environnement, Laval (Québec) 28-29 Nov., 2000, 6p.

DUCHÈNE Ph, SCHETRITE S, HÉDUIT, A et RACAULT Y. (). *Comment réussir un essai d'aérateur en eau propre*, Ed. Cemagref, Antony (France), 1995, 25 p. + Annexes.

FNDAE, *Filières d'épuration adaptées aux petites collectivités*, Document technique FNDAE n° 22, 1998, 96 p.

FNDAE, *Traitement de l'azote dans les stations d'épuration biologique des petites collectivités*, Document technique FNDAE n° 24, 2001, 64 p.

GILLOT, S., CAPELA, S. et HÉDUI, A. (2000). « Effect of horizontal flow on oxygen transfer in clean water and in clean water with surfactants », *Wat. Res.*, 34 (2), p. 678-683.

GIS-MOUSSES, *Guide de lutte contre les mousses biologiques stables dans les stations d'épuration à boues activées*, Document technique FNDAE hors série, octobre 1993, 58 p.

POPEL J., WAGNER M et WEIDMANN. *Theory and practise of fine bubble aeration in deep tanks*, 1998, ROME, 14 p.

REICHERT J., *Bilanzierung des Sauerstoffeintrags und des Sauerstoffverbrauchs mit Hilfe der Abluftmethode*, Darmstadt, Techn. Hochschule, Diss., 1997, 391 p.

ROUSTAN M., et LINE A., « Rôle du brassage dans les procédés biologiques d'épuration », *Tribune de l'eau* n° 49, 583-584 septembre-décembre 1996, p. 109-115.

A rectangular image with a dark background and the word 'Résumé' in white, serif font. The background shows a blurred industrial or laboratory setting with equipment and a person in a high-visibility vest.

Depuis une dizaine d'années, le recours à l'insufflation d'air fines bulles par membranes souples, couplée à l'agitation s'est largement développé pour les petites stations d'épuration (volume de bassin d'aération inférieur à 1400 m³). Cette technique avait été mise en oeuvre, dans un premier temps, principalement sur des grands chenaux oblongs où elle a permis d'améliorer nettement le rendement énergétique (ASB) par rapport aux performances des aérateurs de surface. En outre, elle a permis de s'adapter aux contraintes d'encombrement spatial en favorisant des bassins de plus en plus profonds. De nombreuses mesures (39 dans cette étude) de performances d'aération en eau claire, menées sur des chenaux annulaires plus petits (avec un noyau central réduit = faux chenaux) ou des bassins de formes différentes (bassins cylindriques ou parallélépipédiques) ont mis en évidence des rendements significativement inférieurs (de 30 % et plus) à ceux escomptés. Ces médiocres performances s'expliquent par deux principaux types de phénomènes :

- la concentration des diffuseurs sur une partie du radier, conduisant à la création de mouvements de convection (spiral-flows) réduit le temps de séjour des bulles dans l'eau ;
- des interactions néfastes entre la diffusion d'air et l'agitation, du fait des positions relatives des dispositifs assurant ces deux fonctions.

L'objet de cet ouvrage est dans un premier temps d'exposer les différentes configurations rencontrées c'est-à-dire la forme des bassins, la position des diffuseurs, en particulier par rapport à celle de l'agitateur. Dans un second temps, les choix technico-économiques sont critiqués au regard des résultats d'oxygénation obtenus sur un panel de stations représentatives des différentes configurations. En conclusion, plusieurs recommandations sont proposées en ce qui concerne le choix de la forme du bassin, la position des rampes par rapport à celle de l'agitateur. Enfin, pour les petites installations, le recours à l'utilisation d'un bassin cylindrique en couverture plancher est fortement conseillé en raison des très bons résultats régulièrement obtenus pour ce type de configuration.

Mots-clés : aération, insufflation d'air, fines bulles, petite collectivité, épuration, station d'épuration, boues activées.

A rectangular image with a dark background and the word 'Abstract' in white, serif font. The background shows a blurred industrial or laboratory setting with equipment and a person in a high-visibility vest.

Since the 90s', aeration of small WWTP has been largely operated through fine bubble diffusers coupled with propellers for mechanical mixing of the liquid. This technique has been originally developed on large race-track-like open ditches because of the higher Specific Aeration Efficiency (S.A.E.) obtained compared with those of classical surface aeration. Moreover, this process allows the use of high water depth in the aeration tank reducing the footprint of the plant. Many measurements (39 in this study) of clean water aeration efficiency performed on small open channel (with a small internal diameter = false channels) or on tanks of different shapes (i.e. cylindrical or parallelepipedic) show significantly lower efficiencies (30 % and more) than those expected. These bad results can be explained by two main phenomena:

- concentration of the diffusers on one part of the floor which induces spiral flows, decreasing the contact time between air bubbles and water,
- deleterious interactions between air diffusion and water mixing due to a particular relative location of the grids and the propellers.

The aim of this document is firstly to expose the different existing configurations i.e. the tank shape, the location of diffuser grids and the relative location of the propellers. Secondly, the different technico-economic choices are criticised on the basis of the S.A.E. measured on a representative sample of WWTPs. In conclusion, several recommendations are proposed and the choice of cylindrical tanks with total floor coverage is strongly advised in view of the good performances obtained with this configuration.

Key words : aeration, fine bubble diffusers, small waste water treatment plants, activated sludge.

Les documents techniques du FNDAE

N°	Désignation de l'ouvrage	Parution
1	L'exploitation des lagunages naturels	1985
2	Définition et caractéristiques techniques de fonctionnement et domaine d'emploi pour les appareils de désinfection	1986
3	Manuel pratique pour le renforcement et l'étanchéité des réservoirs d'eau potable	1986
4	Plan de secours pour l'alimentation en eau potable	1986
5	Les stations d'épuration adaptées aux petites collectivités	1986
5 bis	Les stations d'épuration – Dispositions constructives pour améliorer leur fonctionnement et faciliter leur exploitation	1992
6	Les bassins d'orages sur les réseaux d'assainissement	1988
7	Le génie civil des bassins de lagunage naturel	1990
8	Guide technique sur le foisonnement des boues activées	1990
9	Les systèmes de traitement des boues des petites collectivités	1990
10	Élimination de l'azote dans les stations d'épuration biologiques des petites collectivités	1990
11	L'eau potable en zone rurale – Adaptation et modernisation des filières de traitement. Réédition 1998	1992
12	Application de l'énergie photovoltaïque à l'alimentation en eau potable des zones rurales	1996
13	Lutte contre les odeurs des stations d'épuration	1993
14	Les procédés à membrane pour le traitement de l'eau et de l'assainissement	1996
15	Financement du renouvellement des réseaux d'adduction d'eau potable	1993
16	La gestion collective de l'assainissement autonome – Bilan des premières expériences	1993
17	Les nouvelles techniques de transport d'effluents	1996
18	La décantation lamellaire des boues activées	1994
19	Guide sur la gestion de la protection des captages d'eau potable dans les vallées alluviales	1997
20	Connaissance et maîtrise des aspects sanitaires de l'épandage des boues d'épuration des collectivités locales	1998
21	Études préalables au zonage d'assainissement. Guide méthodologique à l'usage des techniciens	1998
22	Filières d'épuration adaptées aux petites collectivités	1998
23	Application des énergies renouvelables à la potabilisation et à l'épuration des eaux	1999
24	Performances des systèmes de traitement biologique des graisses	2001
25	Traitement de l'azote dans les stations d'épuration des petites collectivités	2002
26	Insufflation d'air fines bulles. Application aux stations d'épuration en boues activées des petites collectivités	2002
Documents hors-série		
HS 4	Élimination des nitrates des eaux potables	1993
HS 5	Les différents procédés de stockage des boues d'épuration avant valorisation en agriculture	1993
HS 9	Les pollutions accidentelles des eaux continentales	1995
HS 10	Le renouvellement des réseaux d'eau potable	1994
HS 11	L'utilisation des eaux usées épurées en irrigation	1998
HS 12	La dégradation de la qualité de l'eau potable dans les réseaux	1998
HS 13	Le contrôle et l'entretien des installations d'assainissement non collectif. État de la réglementation et bilan des services publics de gestion des installations.	2000
INV90NA	Situation de l'alimentation en eau potable et de l'assainissement dans les communes rurales en 1990. Synthèse nationale 1990	1993
INV90DE	Synthèse nationale et résultats départementaux 1990	1993
INV95NA	Situation de l'alimentation en eau potable et de l'assainissement dans les communes rurales en 1995. Synthèse nationale 1995	1997
INV95DE	Synthèse nationale et résultats départementaux 1995	1997

NB : certains numéros sont épuisés. Tous les documents techniques FNDAE sont disponibles sous forme numérique sur le site <http://www.eau.fndae.fr>. Pour obtenir des tirages papier, les commandes sont à adresser au Cemagref, DSIC/IST, BP 44, 92163 Antony Cedex. Tél. 01 40 96 62 85, Fax 01 40 96 61 64.