

Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche et des Affaires rurales

FNDAE n° 31

Document technique



Prédiction des capacités d'oxygénation en eau claire des systèmes d'insufflation d'air

Coordination – Sylvie Gillot, Alain Héduit



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

Remerciements



Le présent document a été rédigé par Sylvie Gillot et Alain Héduit.

L'ensemble des données exploitées dans ce document ont été obtenues par les équipes spécialisées du Cemagref (Antony, Lyon, Bordeaux). Qu'elles en soient remerciées. L'analyse effectuée a été initiée par Stéphanie Capela-Marsal, au cours de son doctorat réalisé au Cemagref. Nous la remercions vivement de sa relecture attentive, ainsi que l'ensemble des relecteurs pour leurs précieuses contributions : Katia Wouters-Wasiak (France Assainissement), Philippe Duchène et Eric Cotteux (Cemagref) ainsi que le comité de pilotage du FNDAE.

Crédit photographique

Couverture – Chenal d'aération, Y. Racault, nov. 2001, Cemagref.
Introduction – Diffuseur fines bulles, S. Bons, janv. 2004, Cemagref.
Chapitre 1 – Chenal d'aération, Y. Racault, fev. 2002, Cemagref.
Chapitre 2 – Chenal d'aération, S. Bons, sept. 2003, Cemagref.
Chapitre 3 – Station d'épuration, S. Bons, sept. 2003, Cemagref.
Chapitre 4 – Chenal d'aération, J.-M. Choubert, sept. 2003, Cemagref.
Conclusions – Bassin d'aération, E. Cotteux, fev. 2003, Cemagref.
Annexes – Chenal d'aération, Y. Racault, déc. 2001, Cemagref.

© Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche et des Affaires rurales – ISBN 2-11-092858-1 ; © Cemagref 2004 – Cemagref Éditions – ISBN 2-85362-635-0. Prédiction des capacités d'oxygénation en eau claire des systèmes d'insufflation d'air. Sylvie Gillot, Alain Héduit (Cemagref) – Document technique Fndae n° 31, 2004. 1^{ère} édition Coordonnée par le Cemagref : conception et création graphique : Julienne Baudel ; infographie : Françoise Peyriguer. Dépôt légal : 2^e trimestre 2004 – Mise en pages : Desk, 25 boulevard de la Vannerie, 53940 Saint-Berthevin-les-Laval. Impression : Jouve, 11 bd. Sébastopol, BP 2734, 75027 Paris Cedex 01. Document disponible sous forme numérique sur le site <http://www.eau.fndae.fr>. Pour les tirages papier, les demandes sont à adresser au Cemagref, DSIC/IST, Parc de Tourvoie, BP 44, 92163 Antony Cedex. Tél. 01 40 96 62 85, fax. 01 40 96 61 64.



Conditions de vérification des performances d'aération

LE CONTEXTE ET SON ÉVOLUTION

Rappel sur les indicateurs de performances

- Le système d'aération est dimensionné pour assurer la fourniture journalière d'oxygène à la charge nominale de l'installation (situation « prochaine »), prenant en compte la somme des composantes nominales de temps sec et de temps de pluie. En aération prolongée sans bassin d'anoxie séparé, cette fourniture doit être assurée en quatorze heures (Fndae n° 25, 2000). Avec un bassin d'anoxie en tête, la durée journalière d'aération peut être étendue à dix-huit heures. Cette exigence s'exprime par l'apport horaire en eau claire dans les conditions standard (AHs en kg O₂/h).
- Compte tenu de l'importance de la consommation énergétique liée à l'aération dans le coût de fonctionnement d'une station d'épuration et des écarts significatifs d'efficacité entre les différents systèmes d'aération pouvant être proposés (Duchène and Héduit, 2000 ; Fndae n° 26, 2000), le critère qui intéresse au premier chef le client, c'est-à-dire le maître d'ouvrage mais aussi le consommateur-payeur d'eau de distribution, est le rendement énergétique qui s'exprime par l'apport spécifique brut en eau claire dans les conditions standard (ASBs en kg O₂/kWh absorbé au compteur électrique).
- Enfin l'efficacité des systèmes d'aération par insufflation d'air fait l'objet d'accords commerciaux entre fournisseurs et ensembleurs sur la base du rendement de transfert d'oxygène de l'air dans les conditions standard. Le rendement d'oxygénation (RO) est le rapport de la masse d'oxygène dissoute à celle apportée par l'air insufflé :

$$\text{ROs en \% O}_2 \text{ transféré/O}_2 \text{ injecté}$$

ou

$$\text{ROs/m en \% O}_2 \text{ transféré par mètre d'immersion des diffuseurs/O}_2 \text{ injecté}$$

- La vitesse horizontale dans les chenaux d'aération (U_c en cm/s) fait également l'objet d'accords commerciaux.

Les garanties

Les marchés de construction des stations d'épuration sont fondés sur le principe d'obligation de résultats. Le CCTG fasc. 81 titre II qui s'applique (de manière volontaire) dans la plupart des cas prévoit que c'est prioritairement la qualité des eaux traitées et des principaux sous-produits (boues, air traité, nuisances sonores...) qui fait l'objet de garanties et de vérifications contractuelles. La vérification des performances d'aération est classée comme un essai par défaut, s'imposant de la manière la plus évidente lorsqu'on ne se trouve pas dans le domaine de garantie (charge organique insuffisante reçue au moment des essais de garantie, par exemple). De fait, la pratique très salubre, est de prendre, et donc de vérifier, en eau claire, des garanties spécifiques sur le système d'aération en termes d'apport horaire et d'apport spécifique brut.

Il faut noter que la future norme européenne NF-EN 12255-15 (2004) fera obligation soit de vérifier l'efficacité des systèmes d'aération, soit de fournir copie de telles vérifications dans des conditions extrapolables à celles de la station d'épuration en construction. Dans le cas de l'insufflation d'air, en particulier en chenal, remarquons simplement que les éléments variant entre deux installations, quelles qu'elles soient, sont fort nombreux et que la nécessité des mesures de vérification d'une partie au moins des paramètres s'imposera (vitesse horizontale de l'eau, débit d'air).

L'évolution des données de base des projets de stations d'épuration

La loi sur l'eau de 1992 et ses textes d'application font obligation en cas de réseau unitaire de traiter au moins une fraction des eaux supplémentaires de temps de pluie. Ceci conduit à afficher des besoins de pointe en oxygène très significativement plus élevés que les besoins prévus par temps sec en situation « prochaine » (à la charge nominale de l'installation). Même si après quelques excès, la tendance de la pratique est de revenir à plus de raison dans les charges de pointe de temps de pluie et donc les besoins en oxygène correspondants, il reste que les projets actuels conduisent à la nécessité d'assurer les débits d'air très différents pour les besoins moyens « actuels » (prévus à la mise en route de l'installation) — encore y-a-t-il de belles différences dans le cycle nyctéméral — et pour les besoins de pointe nominaux. De plus on s'accorde aujourd'hui sur le fait que sauf réseaux très développés (Paris et agglomération par exemple) la majorité des pluies apportent des surcharges organiques faibles et que les fortes surcharges (sur lesquelles sont basées les calculs des besoins de pointe en oxygène) n'apparaissent que quelques jours par an.

L'INTÉRÊT PUBLIC

L'intérêt du maître d'ouvrage et des consommateurs est assez évident : en dehors de la nécessaire fiabilité du système d'aération et de sa facilité d'exploitation, il se résume à deux objectifs :

- ❶ assurer la couverture des besoins de pointe en oxygène ;
- ❷ minimiser la consommation électrique du système d'aération.

Cela se traduit par deux critères d'efficacité distincts. Pour le premier objectif il s'agit d'assurer un apport horaire d'oxygène (en pointe) AH_p . Vis-à-vis du second objectif, à un apport horaire plus faible (AH_s) correspondant aux charges réelles durables à traiter (charges effectivement disponibles lors des essais de garantie) doit impérativement correspondre un ASB élevé.

NB. La nouvelle version du CCTG fasc. 81 titre II prévoit en commentaires de l'article II.3 qu'il est souhaitable de donner, outre les garanties correspondant aux situations « actuelle » et « prochaine » des garanties pour des charges intermédiaires correspondant aux charges probablement disponibles lors des essais de garantie. Nous insistons ici pour que cette ouverture soit saisie par les maîtres d'œuvre, en soulignant, de plus, que les charges « réelles durables à traiter » (disponibles dès la mise en route de l'installation) ne correspondent pas aux charges prévues par la situation « actuelle »

du projet. Sauf exceptions, et à condition que tous les branchements soient réalisés, les charges de temps sec de la situation actuelle prises en compte dans un projet intègrent un facteur de sécurité de l'ordre de 30 %. À défaut d'information plus précise, les valeurs à prendre en compte pour la garantie de l'apport spécifique brut correspondant à la charge « réelle durable à traiter » pourraient être le débit de la situation « actuelle » mais les charges organiques, en N et P, de la même situation multipliées par 0,7. Ainsi, le bilan énergétique (par exemple par kg DBO) ne devrait plus être une mauvaise surprise pour le maître d'ouvrage. Pour le cas particulier de l'aération, on peut donc considérer que la situation actuelle doit être atteinte en 5-10 ans plutôt qu'à la date de réception définitive.

DES ÉLÉMENTS DE CONSTAT

Après une période (les années 1990 en simplifiant) pendant laquelle les mesures de réception des systèmes d'aération montraient, sauf cas aisément explicables (Fndae n° 26, 2000), que les garanties des constructeurs étaient tenues, on a souvent observé, ces dernières années, des écarts importants entre performances annoncées et performances mesurées, en particulier dans le cas des chenaux d'aération en insufflation d'air pour lesquels la vitesse horizontale de circulation n'atteint pas la valeur prévue. Notre interprétation, scientifiquement incomplète mais globalement fiable, est que ces contre-performances résultent en grande partie du fait que les conditions de vérification des performances sont les conditions nominales de pointe. Cela oblige les constructeurs à tenter de maximiser simultanément AH_p et ASB (et ceci dans un souci encore trop fort d'être proche du moins disant en coût d'investissement).

Conclusion : notre recommandation

En droite ligne des éléments ci-dessus, il nous paraît donc fécond, au moins dans les cas des projets de stations d'épuration alimentées par un réseau unitaire, de demander et de vérifier à la réception des garanties sur :

- l'apport horaire correspondant à la charge nominale de temps de pluie en situation prochaine (AH_p) ;
- l'apport spécifique brut correspondant aux charges réelles durables à traiter ;
- le cas échéant, la vitesse horizontale moyenne avec le débit d'air pour les charges réelles durables à traiter.

Quelques réflexions sur les conséquences

Un tel choix doit faire évoluer les propositions des constructeurs dans des directions qui nous paraissent vertueuses, parmi lesquelles on peut citer les suivantes.

- Amener à des annonces de vitesses horizontales différenciées en fonction du débit d'air insufflé (les progrès seront relativement limités et pragmatiques), les modèles prenant en compte le freinage de l'eau par les rideaux de bulles n'étant pas aujourd'hui suffisants.
- L'incitation ainsi produite à ce que les constructeurs proposent des systèmes de fourniture d'air à leur optimum énergétique pour la situation la plus fréquente (la situation réelle).

Plus explicitement, il devrait être prévu, le plus souvent, pour cette situation de fonctionnement un surpresseur parfaitement adapté (et non en petite vitesse et de rendement moindre) ce qui, au prix d'un renchérissement à l'investissement (un surpresseur de plus), permettrait à l'exploitant de disposer

d'une puissance d'aération adaptée facilitant l'obtention de réglages optimisés et donnant par là les conditions d'une consommation d'énergie minimale.

- L'ouverture, pour les constructeurs, de la piste satisfaction de l' AH_p même au prix d'une consommation énergétique élevée, par exemple en mettant en marche pour cette situation des moyens d'agitation supplémentaires ou toute autre voie à prospecter.

Philippe Duchène



Introduction



Les systèmes d'insufflation d'air en fines bulles équipant des bassins d'aération de taille et de géométrie variées connaissent depuis les années 90 un fort développement. Les avantages en matière d'insonorisation, de performances, de modularité de la puissance mise en œuvre, ou encore en matière de limitation de production d'aérosols ont contribué au succès de ces systèmes.

L'optimisation de ces dispositifs d'aération est nécessaire non seulement pour assurer la qualité et la fiabilité du traitement, mais également en termes de dépenses énergétiques, l'aération étant l'un des postes le plus important de consommation électrique d'une installation à boues activées (souvent 60 à 70 %). Les performances de l'aération doivent être connues et optimisées pour pouvoir fournir aux utilisateurs un équipement permettant d'atteindre les objectifs de traitement fixés et ce au coût le plus bas.

Les études menées à ce sujet ont permis de mettre en évidence l'intérêt d'appliquer une vitesse horizontale de liquide en chenal d'aération (Déronzier *et al.* 1998) puis de définir les configurations les plus performantes quant à la répartition des modules de diffuseurs en bassins classiques (FNDAE, 2000, Duchène *et al.*, 2001) et enfin d'apporter des éléments théoriques d'interprétation aux résultats obtenus (Capela *et al.*, 2001). L'avancée suivante consiste à prédire, au stade du projet, les capacités d'oxygénation des systèmes d'insufflation d'air en fines bulles en prenant en compte les conditions particulières du site étudié. À ce jour, les performances du transfert d'oxygène prévues au stade des projets prennent peu ou pas en compte les conditions hydrodynamiques particulières du site. Il en résulte parfois des écarts considérables entre les apports horaires ou les rendements d'oxygénation annoncés (souvent issus d'abaques obtenues en bassins d'essais) et ceux qui sont mesurés à la réception des installations.

La base de données constituée au Cemagref couplée avec les avancées théoriques et pratiques en matière de transfert d'oxygène en eau claire ont rendu possible l'établissement de relations donnant le coefficient de transfert d'oxygène en fonction du débit d'air, de la densité de diffuseurs, de leur répartition, et de la vitesse horizontale du liquide dans les chenaux d'aération. Les résultats obtenus pour les deux géométries classiques de bassins d'aération, les bassins cylindriques et les chenaux d'aération, sont présentés dans ce document.

La meilleure prévision de l'efficacité du transfert d'oxygène dans les stations d'épuration à boues activées se traduit par un gain en qualité et en fiabilité du traitement, notamment dans le cas de petites et moyennes installations pour lesquelles les vérifications des performances d'oxygénation en eau claire ne peuvent être effectuées systématiquement.

Le présent document comprend quatre parties principales :

- les définitions des variables caractéristiques du transfert d'oxygène en insufflation d'air fines bulles, des critères et des nombres sans dimension caractérisant les performances d'oxygénation des systèmes d'aération.

- les relations permettant de prédire les coefficients de transfert d'oxygène et les rendements d'oxygénation en fonction des facteurs précités en bassins cylindriques.
- les relations permettant de prédire les coefficients de transfert d'oxygène et les rendements d'oxygénation en fonction des facteurs précités en chenaux d'aération.
- des exemples d'application de ces relations au dimensionnement des systèmes d'aération.

Pour faciliter l'utilisation de ce document, le principe et l'application de la méthode utilisée pour développer les relations de prédiction (l'analyse dimensionnelle) sont consignés en annexe 1.





CHAPITRE 1 – DÉFINITIONS	11
Variables caractéristiques du transfert d'oxygène	11
Caractérisation des performances d'oxygénation des systèmes d'insufflation d'air fines bulles	11
Nombres sans dimension	12
 CHAPITRE 2 – RELATIONS PERMETTANT DE PRÉDIRE LE COEFFICIENT DE TRANSFERT D'OXYGÈNE ET LE RENDEMENT D'OXYGÉNATION DES SYSTÈMES D'AÉRATION EN BASSINS CYLINDRIQUES	 15
Variables caractéristiques	15
Domaine de validité	15
Expression des performances d'oxygénation en fonction des variables caractéristiques du transfert d'oxygène	 15
 CHAPITRE 3 – RELATIONS PERMETTANT DE PRÉDIRE LE COEFFICIENT DE TRANSFERT D'OXYGÈNE ET LE RENDEMENT D'OXYGÉNATION DES SYSTÈMES D'AÉRATION EN CHENAUX D'AÉRATION	 17
Variables caractéristiques	17
Domaine de validité	17
Expression des performances d'oxygénation en fonction des variables caractéristiques du transfert d'oxygène	 17
 CHAPITRE 4 – EXEMPLES D'APPLICATION : DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTÈME D'AÉRATION	 19
Bassin cylindrique d'une station d'épuration à boues activées de 3 000 EH	19
Chenal d'aération d'une station d'épuration à boues activées de 9 000 EH	21
 CONCLUSION	 23

ANNEXES	25
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	34
NOMENCLATURE	35



Variables caractéristiques du transfert d'oxygène

Les facteurs de conception et de fonctionnement influençant le transfert d'oxygène en bassins d'aération équipés de diffuseurs fines bulles sont rapportés dans le tableau 1 et sur les figures 1 et 2 (cf. pages 16 et 18).

Caractérisation des performances d'oxygénation des systèmes d'insufflation d'air fines bulles

Les bases de données requises pour l'analyse présentée ici réunissent les résultats des différents essais de réoxygénation d'eau claire effectués par les équipes du Cemagref sur des bassins équipés de systèmes d'insufflation d'air. Ces essais ont été réalisés selon une procédure intégrée dans la norme prEN 12255-15 (2004), les bassins étant équipés de diffuseurs à membrane EPDM (disques, tubes ou plaques).



Afin de comparer les dispositifs entre eux, les résultats des mesures de performances d'oxygénation en eau claire sont exprimés dans les conditions standard, définies comme suit :

- ❶ concentration en oxygène dissous nulle ;
- ❷ température de l'eau = 20 °C ;
- ❸ pression atmosphérique = 1 013 hPa.

Les performances d'oxygénation sont présentées en termes de :

➤ coefficient de transfert d'oxygène à 20 °C ($k_L a_{20}$), représentatif de la vitesse de dissolution de l'oxygène gazeux dans la phase liquide.

➤ apport horaire standard (AHs), quantité d'oxygène transféré par heure (équation 1) :

$$AHs = k_L a_{20} \cdot C_s \cdot V$$

avec :

- $k_L a_{20}$: coefficient de transfert d'oxygène à 20 °C (h^{-1})
- C_s : concentration de saturation en oxygène à 20 °C et à $(1013 + \Delta P)$ hPa ($mg \cdot L^{-1}$)
- ΔP : surpression due à la colonne d'eau (hPa)
- V : volume de liquide (m^3)

Facteur	Symbole	Unité
Surface du bassin	S	m ²
Surface totale des membranes (cf. calcul en annexe 2)	S _p	m ²
Surface couverte par les modules de diffuseurs (Surface aérée)	S _a	m ²
Hauteur d'eau	H	m
Hauteur d'immersion	h	m
Largeur du chenal	L ¹	m
Angle entre l'axe des agitateurs et le premier module de diffuseurs	Ang ¹	—
Accélération de la pesanteur	g	m · s ⁻²
Viscosité dynamique de l'eau	μ	Pa · s
Masse volumique de l'eau	ρ	kg · m ⁻³
Débit d'air insufflé	Q _G	Nm ³ · h ⁻¹
Vitesse de circulation horizontale de l'eau	U _C ¹	cm · s ⁻¹

¹ Facteurs spécifiques aux chenaux d'aération

Tableau 1 – Facteurs de dimensionnement et de fonctionnement caractéristiques du transfert d'oxygène.

➤ rendement d'oxygénation standard par mètre d'immersion des diffuseurs (RO_s/m), rapport de la quantité d'oxygène transféré et de la quantité d'oxygène insufflé par mètre d'immersion (équation 2) :

$$RO_s/m = \frac{k_L a_{20} \cdot C_s \cdot V}{10 \cdot h \cdot M_{O_2}}$$

avec :

- M_{O₂} : flux d'oxygène dans l'air insufflé (kgO₂ · h⁻¹)
- h : hauteur d'immersion des diffuseurs (m)

Nombres sans dimension

Les nombres sans dimension issus des paramètres précédents sont présentés dans le tableau 2. Ils permettent de définir le domaine de validité des relations développées.

De manière à faire apparaître la vitesse superficielle du gaz (U_G) dans la relation finale, le débit d'air insufflé (Q_G) est remplacé par U_G × S.

Nombre sans dimension	Formule
Densité des diffuseurs	$DD = \frac{S_p}{S}$
Densité locale des diffuseurs	$DD_L = \frac{S_p}{S_a}$
Diamètre du bassin rapporté à la hauteur d'immersion	$\frac{D}{h}$
Rapport de hauteurs d'eau et d'immersion	$\frac{H}{h}$
Surface du bassin rapportée au carré de la hauteur d'immersion	$\frac{S}{h^2}$
Rapport de la largeur du chenal à la hauteur d'immersion	$\frac{L}{h}$
Angle entre l'axe des agitateurs et le premier module de diffuseurs	Ang
Rapport des vitesses gaz - liquide	$\frac{U_C}{U_G}$
Nombre de Reynolds	$Re = \frac{\rho U_G h}{\mu}$
Nombre de Froude	$Fr = \frac{U_G^2}{gh}$
Nombre de transfert	$N_T = \frac{k_L a h}{U_G}$

Tableau 2 – Nombres sans dimension.

Le calcul des nombres de Reynolds et de Froude est développé en annexe 3.

RELATIONS PERMETTANT DE PRÉDIRE LE COEFFICIENT DE TRANSFERT D'OXYGÈNE ET LE RENDEMENT D'OXYGÉNATION DES SYSTÈMES D'AÉRATION EN BASSINS CYLINDRIQUES

Variables caractéristiques

Les variables caractéristiques du transfert d'oxygène en bassins cylindriques sont présentées sur la figure 1 (cf. définitions tableau 1, p. 7).

Domaine de validité

21 mesures effectuées sur 12 sites ont été prises en compte dans l'analyse. Les intervalles de variation des paramètres mesurés sont rapportés dans le tableau 3.

Les intervalles de variation des nombres sans dimension, qui représentent le domaine de validité des relations développées (équations 4 et 5), sont présentés dans le tableau 4.



Expression des performances d'oxygénation en fonction des variables caractéristiques du transfert d'oxygène

Les relations finales permettant de prédire les performances d'oxygénation des systèmes d'aération en fonction des variables caractéristiques du transfert sont présentées ici. Leur développement est détaillé en annexe 1.

Paramètre	D (m)	H (m)	V (m ³)	S (m ²)	S _p (m ²)	S _o (m ²)	U _G (Nm ³ · h ⁻¹)	k _L a ₂₀ (h ⁻¹)	ROs (%/m)
Gamme	7,5 - 14,7	2,4 - 6,1	108 - 757	44 - 170	3,4 - 13,1	9,2 - 167,6	2,2 - 10,6	3,2 - 13,4	3,7 - 5,6

Tableau 3 – Intervalles de variation des paramètres mesurés en bassins cylindriques.

Nombre sans dimension	DD	DD _L	D/h	H/h	Re	Fr × 10 ⁹
Gamme	0,04 - 0,14	0,05 - 0,41	1,4 - 5,1	1,03 - 1,11	1 432 - 12 141	8,8 - 220,0

Tableau 4 – Domaine de validité des relations développées en bassins cylindriques.

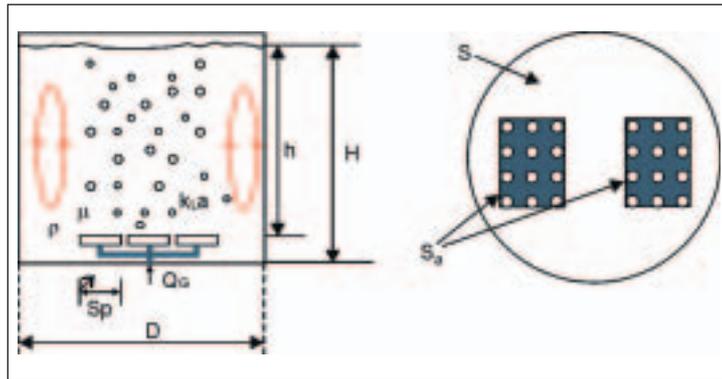


Figure 1 – Variables caractéristiques du transfert d'oxygène dans les bassins cylindriques.

➤ Concentration en oxygène à saturation (équation 3) :

$$C_s = 8,840 h^{0,109}$$

➤ Coefficient de transfert d'oxygène (équation 4) :

$$k_L a_{20} = 1,477 Q_G^{1,037} h^{-0,136} S^{-1,174} S_p^{0,042} S_a^{0,145}$$

➤ Rendement d'oxygénation standard spécifique (équation 5) :

$$RO_s/m = 4,616 Q_G^{0,037} h^{-0,026} S^{-0,174} S_p^{0,042} S_a^{0,145}$$

RELATIONS PERMETTANT DE PRÉDIRE LE COEFFICIENT DE TRANSFERT D'OXYGÈNE ET LE RENDEMENT D'OXYGÉNATION DES SYSTÈMES D'AÉRATION EN CHENAUX D'AÉRATION

Variables caractéristiques

Les variables caractéristiques du transfert d'oxygène en chenal d'aération sont présentées sur la figure 2. Les chenaux d'aération ont été séparés en deux sous-ensembles en fonction de la répartition des modules de diffuseurs : sur plus de la moitié du radier (Type I) ou sur seulement au plus $\frac{1}{2}$ radier (Type II).

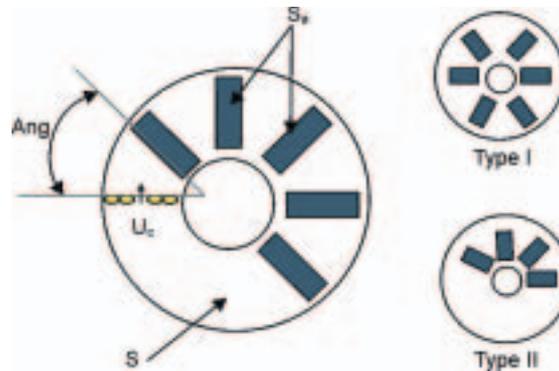


Figure 2 – Variables caractéristiques du transfert d'oxygène dans les chenaux d'aération.

Domaine de validité

Pour les chenaux de type I, dix-neuf mesures effectuées sur dix sites ont été prises en compte dans l'analyse.

Pour les chenaux de type II, 28 mesures effectuées sur seize sites ont été prises en compte.

Les domaines de validité des relations développées (équations 7 à 10) sont présentés dans le tableau 6.

Le calcul des nombres de Reynolds et de Froude est développé en annexe 3.



Paramètre	D _{in} (m)	D _{ext} (m)	h (m)	L (m)	V (m ³)	S (m ²)	S _p (m ²)	S _a (m ²)	U _G (m.h ⁻¹)	U _C (cm.s ⁻¹)	k _L a ₂₀ (h ⁻¹)	ROs/m (%/m)
Gamme	6,5 –	22,9 –	3,7 –	4,5 –	1 343 –	275 –	14,6 –	49,2 –	1,6 –	31,5 –	3,0 –	4,0 –
Type I	36,5	54,1	7,7	17,4	10 425	1 943	94,3	796,3	9,2	47,8	15,0	7,5
Gamme	0,6 –	14,4 –	3,7 –	4,0 –	452 –	116 –	5,7 –	8,6 –	2,3 –	25,2 –	2,5 –	3,6 –
Type II	36,5	54,1	7,6	7,9	9 860	1 312	93,1	290,5	7,2	47,2	8,1	6,2

Tableau 5 – Intervalles de variation des paramètres mesurés en chenaux d'aération.

Nombre sans dimension	DD	DD _L	S/h ²	L/h	H/h	Ang	U _C /U _G	Re	Fr * 10 ⁹
Gamme type I	0,04 – 0,19	0,12 – 0,55	8,2 – 72,8	0,8 – 3,4	1,02 – 1,07	0,4 – 1,7	3,4 – 20,8	2 016 – 18 554	4,2 – 94,5
Gamme type II	0,03 – 0,9	0,18 – 0,67	6,0 – 31,8	0,8 – 2,0	1,04 – 1,08	0,4 – 3,6	3,5 – 16,2	3 012 – 14 441	6,2 – 76,0

Tableau 6 – Domaine de validité des relations prédictives en chenaux d'aération.

Expression des performances d'oxygénation en fonction des variables caractéristiques du transfert d'oxygène

18

➤ Concentration en oxygène à saturation (équation 6) :

$$C_s = 9,012 h^{0,105}$$

➤ Chenaux d'aération de type I :

• Coefficient de transfert d'oxygène (équation 7) :

$$k_L a_{20} = 0,264 Q_G^{0,751} h^{-0,229} S^{-0,918} S_p^{0,603} S_a^{0,118} L^{-0,913} Ang^{0,453} U_C^{0,735}$$

Rendement d'oxygénation standard spécifique (équation 8) :

$$ROs/m = 0,828 Q_G^{-0,249} h^{-0,123} S^{0,082} S_p^{0,603} S_a^{0,118} L^{-0,913} Ang^{0,453} U_C^{0,735}$$

➤ Chenaux d'aération de type II :

Coefficient de transfert d'oxygène (équation 9) :

$$k_L a_{20} = 3,930 Q_G^{0,673} h^{0,130} S^{-1,076} S_p^{0,218} S_a^{0,185} L^{-0,167} Ang^{0,206} U_C^{0,112}$$

Rendement d'oxygénation standard spécifique (équation 10) :

$$ROs/m = 12,433 Q_G^{-0,327} h^{0,235} S^{-0,076} S_p^{0,218} S_a^{0,185} L^{-0,167} Ang^{0,206} U_C^{0,112}$$



EXEMPLES D'APPLICATION : DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTÈME D'AÉRATION

Bassin cylindrique d'une station d'épuration à boues activées de 3 000 EH

L'exemple de dimensionnement du système d'aération présenté ici, équipant le bassin d'une station de 3 000 EH, est basé sur la charge nominale de temps de pluie en situation prochaine reçue par la station pour une semaine type au sens du Fndae n° 25 (2001), soit 200 kg de DBO_5 par jour. En considérant une charge volumique de $0,28 \text{ kg DBO}_5 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{j}^{-1}$, le volume de bassin retenu est de 700 m^3 . La quantité d'oxygène à apporter (apport horaire AHP) est estimée à $60 \text{ kg d'O}_2 \cdot \text{h}^{-1}$ en conditions standard (eau claire à $20 \text{ }^\circ\text{C}$, $P = 1\,013 \text{ hPa}$, $C = 0 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$) (cf. FNDAE n° 25, 2001).

L'équation 4 permet de calculer le débit d'air nécessaire pour obtenir cet apport horaire en bassin cylindrique, en prenant en compte les caractéristiques du couple bassin/système d'aération choisi. Les différentes étapes à suivre peuvent se résumer ainsi :



1. choix d'une hauteur d'eau (H) ;
2. calcul de la surface S du bassin ($S = V/H$) ;
3. choix de la hauteur d'immersion des diffuseurs (h) ;
4. calcul de la concentration en oxygène dissous à saturation du bassin (équation 3) ;
5. calcul du $k_L a_{20}$ à obtenir (équation 1) ;
6. choix de la densité de diffuseurs (DD) ;
7. calcul de la surface totale des membranes ($S_p = DD \cdot S$) ;
8. choix du diffuseur (de surface unitaire perforée S_i , cf. annexe 2) ;
9. calcul du nombre n de diffuseurs à installer ($n = S_p/S_i$) ;
10. choix de la surface aérée S_a ;
11. calcul de Q_G (équation 4) et vérification que le débit d'air par diffuseur est compatible avec le diffuseur choisi ;
12. vérification du domaine de validité des équations (calcul des nombres sans dimension, cf. tableau 4 et annexe 3) ;
13. calcul du rendement d'oxygénation standard par mètre d'immersion (équation 5).

Exemple d'application pour la station de 3 000 EH

➤ Cas 1. Diffuseurs disposés en couverture plancher ($S_o = S$) :

1. $H = 5,3 \text{ m}$;
2. $S = 132 \text{ m}^2$ ($D = 13,0 \text{ m}$) ;
3. $h = 5 \text{ m}$;
4. $C_s = 8,840 \times 5,0^{0,109} = 10,54 \text{ mg.l}^{-1}$;
5. $k_1 a_{20} = AH_p / (V.C_s) = 60 \times 1\,000 / (700 \times 10,54) = 8,14 \text{ h}^{-1}$;
6. $DD = 0,07$;
7. $S_p = DD.S = 9,2 \text{ m}^2$;
8. Disques de surface percée de $0,04 \text{ m}^2$;
9. $n = S_p/S_i = 9,2/0,04 = 231$. Le nombre de diffuseurs retenu est de 240 ;
10. $S_o = S = 132 \text{ m}^2$ (couverture plancher) ;
11. l'équation 4 donne $Q_G = 744 \text{ Nm}^3.\text{h}^{-1}$ ($U_G = 5,6 \text{ Nm.h}^{-1}$), correspondant à un débit d'air à insuffler de $3,1 \text{ Nm}^3.\text{h}^{-1}$ par diffuseur ;
12. Les nombres sans dimension correspondant au couple bassin d'aération/système d'aération sont reportés dans le tableau suivant ;
13. Le rendement d'oxygénation standard est estimé à $5,4 \text{ \%.m}^{-1}$.

DD	DD _l	D/h	H/h	Re	Fr × 10 ⁹
0,07	0,07	2,6	1,06	7 809	49,9

Tableau 7 – Nombres sans dimension pour la station de 3 000 EH (cylindre, $S_o = S$).

Les nombres sans dimension sont bien compris dans le domaine de validité des équations (cf. tableau 4).

➤ Cas 2. Diffuseurs disposés sur 1 module ($S_o < S$)

1. $H = 5,3 \text{ m}$;
2. $S = 132 \text{ m}^2$ ($D = 13,0 \text{ m}$) ;
3. $h = 5 \text{ m}$;

4. $C_s = 8,840 \times 5,0^{0,109} = 10,54 \text{ mg.l}^{-1}$;
5. $k_1 a_{20} = AH_p / (V.C_s) = 60 \times 1\,000 / (700 \times 10,54) = 8,14 \text{ h}^{-1}$;
6. $DD = 0,07$;
7. $S_p = DD.S = 9,2 \text{ m}^2$;
8. Disques de surface percée de $0,04 \text{ m}^2$;
9. $n = S_p/S_i = 9,2/0,04 = 231$. Le nombre de diffuseurs retenu est de 240 ;
10. $S_o = 50 \text{ m}^2$ (disposition modulaire, $S_o / S = 0,38$) ;
11. l'équation 4 donne $Q_G = 852 \text{ Nm}^3.\text{h}^{-1}$ ($U_G = 6,4 \text{ Nm.h}^{-1}$), correspondant à un débit d'air à insuffler de $3,5 \text{ Nm}^3.\text{h}^{-1}$ par diffuseur ;
12. les nombres sans dimension correspondant au couple bassin d'aération/système d'aération sont reportés dans le tableau suivant ;
13. le rendement d'oxygénation standard est estimé à $4,7 \text{ \%.m}^{-1}$.

DD	DD _l	D/h	H/h	Re	Fr × 10 ⁹
0,07	0,18	2,6	1,06	8 940	65,4

Tableau 8 – Nombres sans dimension pour la station de 3 000 EH (cylindre, $S_o < S$).

Les nombres sans dimension sont bien compris dans le domaine de validité des équations (cf. tableau 4).

Cet exemple illustre la supériorité de la disposition plancher par rapport à la disposition modulaire, déjà notée dans le Fndae n° 26 (2000). À nombre de diffuseurs donné, les performances d'oxygénation obtenues sont meilleures dans le premier cas.

Par ailleurs, l'effet des paramètres de dimensionnement (hauteur d'eau, densité des diffuseurs, surface aérée...) sur la quantité d'air à injecter, et donc la puissance des surpresseurs à installer, peut être étudié à l'aide des relations obtenues, ce qui permet d'optimiser le dimensionnement du couple bassin/système d'aération.

Chenal d'aération d'une station d'épuration à boues activées de 9 000 EH

En utilisant les mêmes règles de dimensionnement du système d'aération que l'exemple précédent, la charge reçue par une station de 9 000 EH pour une semaine type au sens du Fndae n° 25 (2001) est de 620 kg de DBO_5 par jour. En considérant une charge volumique de $0,28 \text{ kg DBO}_5 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{j}^{-1}$, le volume de bassin retenu est de $2\,200 \text{ m}^3$. La quantité d'oxygène à apporter (apport horaire AHs) est estimée à $180 \text{ kg d'O}_2 \cdot \text{h}^{-1}$ en conditions standard (eau claire à 20°C , $P = 1\,013 \text{ hPa}$, $C = 0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) (cf. Fndae n° 25, 2001).

Les équations 7 et 9 permettent de calculer le débit d'air nécessaire pour obtenir cet apport horaire en chenal d'aération respectivement de type I et II, en prenant en compte les caractéristiques du couple bassin/système d'aération choisi. Les différentes étapes à suivre peuvent se résumer ainsi :

1. choix d'une hauteur d'eau (H) ;
2. calcul de la surface du chenal (S) ;
3. choix du diamètre intérieur du chenal (D_{in}) ;
4. calcul du diamètre extérieur du chenal ($D_{\text{ext}} = \sqrt{4S/\pi + D_{\text{in}}^2}$) ;
5. calcul de la largeur du chenal ($L = (D_{\text{ext}} - D_{\text{in}})/2$) ;
6. choix d'une hauteur d'immersion des diffuseurs (h) ;
7. calcul de la concentration en oxygène dissous à saturation du bassin (équation 6) ;
8. calcul de $k_1 a_{20}$ à obtenir (équation 1) ;
9. choix de la densité de diffuseurs (DD) ;
10. calcul de la surface totale des membranes ($S_p = \text{DD} \cdot S$) ;
11. choix du diffuseur (de surface unitaire perforée S_i , cf. annexe 2) ;
12. calcul du nombre (n) de diffuseurs à installer ($n = S_p/S_i$) ;

13. choix de la surface aérée S_a , en fonction du nombre de diffuseurs à installer et des contraintes d'installation (largeur du chenal, dimension standard d'un module, ...) ;

14. choix de l'angle entre les agitateurs et le premier module d'aération (Ang) ;

15. choix d'une vitesse horizontale de circulation (U_c) ;

16. calcul de Q_G (équation 7 ou 9) et vérification que le débit d'air par diffuseur est compatible avec le diffuseur choisi ;

17. vérification du domaine de validité des équations (calcul des nombres sans dimension, cf. tableau 6 et annexe 3) ;

18. calcul du rendement d'oxygénation standard (équations 8 ou 10).

Exemple d'application pour la station de 9 000 EH

➤ Cas 1. Chenal d'aération de type I (diffuseurs disposés sur l'ensemble du radier) :

1. $H = 5,25 \text{ m}$;
2. $S = 419 \text{ m}^2$;
3. $D_{\text{in}} = 15 \text{ m}$;
4. $D_{\text{ext}} = 27,5 \text{ m}$;
5. $L = 6,3 \text{ m}$;
6. $h = 5 \text{ m}$;
7. $C_s = 10,67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;
8. $k_1 a_{20} = 180 \times 1\,000 / (2\,200 \times 10,67) = 7,67 \text{ h}^{-1}$;
9. $\text{DD} = 0,07$;
10. $S_p = \text{DD} \cdot S = 29,3 \text{ m}^2$;
11. plaques de surface percée de $0,1 \text{ m}^2$;
12. $n = 293$, le nombre de diffuseurs retenu est de 300 ;
13. en considérant un module de $2,4 \text{ m}$ de large qui couvre la quasi-totalité de la largeur du chenal ($L = 0,5 \text{ m}$), on peut proposer 5 modules de 60 diffuseurs, correspondant à une surface aérée de $S_a = 69,3 \text{ m}^2$;

14. $\text{Ang} = 1,2 \text{ rad } (70^\circ)$;
15. $U_c = 30 \text{ cm.s}^{-1}$;
16. l'équation 5 donne $Q_G = 2372 \text{ Nm}^3.\text{h}^{-1}$ ($U_G = 5,7 \text{ Nm.h}^{-1}$) , correspondant à un débit d'air à insuffler de $7,9 \text{ Nm}^3.\text{h}^{-1}$ par diffuseur ;
17. nombres sans dimension ;
18. le rendement d'oxygénation standard est estimé à $5,0 \text{ \%.m}^{-1}$.

DD	DD _i	S/h ²	L/h	H/h	Ang	U _c /U _G	Re	Fr × 10 ⁹
0,07	0,42	16,8	1,3	1,05	1,2	5,3	7 847	50,4

Tableau 9 – Nombres sans dimension pour la station de 9 000 EH (chenal de Type I).

Les nombres sans dimension sont bien compris dans le domaine de validité des équations (cf. tableau 6).

➤ Cas 2. Chenal d'aération de type II (diffuseurs disposés sur la moitié du radier)

1. $H = 5,25 \text{ m}$;
2. $S = 419 \text{ m}^2$;
3. $D_{in} = 15 \text{ m}$;
4. $D_{ext} = 27,5 \text{ m}$;
5. $L = 6,3 \text{ m}$;
6. $h = 5 \text{ m}$;
7. $C_s = 10,67 \text{ mg.l}^{-1}$;
8. $k_{l20} = 180 \times 1\,000 / (2\,200 \times 10,67) = 7,67 \text{ h}^{-1}$;
9. $DD = 0,07$;

10. $S_p = DD.S = 29,3 \text{ m}^2$;
11. plaques de surface percée de $0,1 \text{ m}^2$;
12. $n = 293$, le nombre de diffuseurs retenu est de 300 ;
13. en considérant un module de $2,4 \text{ m}$ de large qui couvre la quasi-totalité de la largeur du chenal ($L = 0,5 \text{ m}$), on peut proposer 5 modules de 60 diffuseurs, correspondant à une surface aérée de $S_o = 69,3 \text{ m}^2$;
14. $\text{Ang} = 1,2 \text{ rad}$;
15. $U_c = 30 \text{ cm.s}^{-1}$;
16. l'équation 7 donne $Q_G = 2\,725 \text{ Nm}^3.\text{h}^{-1}$, ($U_G = 6,5 \text{ Nm.h}^{-1}$) correspondant à un débit d'air à insuffler de $9,1 \text{ Nm}^3.\text{h}^{-1}$ par diffuseur ;
17. nombres sans dimension ;
18. le rendement d'oxygénation standard est estimé à $4,4 \text{ \%.m}^{-1}$.

DD	DD _i	S/h ²	L/h	H/h	Ang	U _c /U _G	Re	Fr × 10 ⁹
0,07	0,42	16,8	1,3	1,05	1,2	5,3	7 847	50,4

Tableau 10 – Nombres sans dimension pour la station de 9 000 EH (Chenal de Type II).

Les nombres sans dimension sont bien compris dans le domaine de validité des équations (cf. tableau 6).

Ce second exemple montre la meilleure efficacité de transfert d'oxygène dans les chenaux de type I plutôt que de type II. De nouveau, les relations peuvent être utilisées pour optimiser le dimensionnement du couple bassin/système d'aération.



L'objectif de cette étude était de développer des relations permettant de prédire le coefficient de transfert d'oxygène et le rendement d'oxygénation en eau claire dans les conditions standard des systèmes d'aération par insufflation d'air, ces relations étant utilisables au stade d'un projet.

L'interprétation des résultats d'essais d'aérateurs en eau claire effectués par le Cemagref, à l'aide de l'analyse dimensionnelle, a permis d'établir trois relations donnant le coefficient de transfert d'oxygène à 20 °C ($k_L a_{20}$), en fonction des paramètres retenus comme caractéristiques du transfert d'oxygène.

En bassins cylindriques, les paramètres caractéristiques sont : le débit d'air insufflé (Q_G), la hauteur d'immersion des diffuseurs (h), la surface du bassin (S), la surface des membranes (S_p) et la surface aérée (S_a).

En chenaux d'aération, les mêmes paramètres ont été retenus, augmentés de la largeur du chenal (L), l'angle entre les agitateurs et le premier module de diffuseurs (Ang) et la vitesse horizontale de circulation de l'eau (U_C). Par ailleurs, deux types de chenaux ont été considérés suivant la disposition des modules de diffuseurs : sur l'ensemble du radier (type I) ou sur au plus la moitié du radier (type II).

Les relations obtenues sont rapportées dans le tableau suivant.

Type de bassin	Relation dimensionnelle
Bassins cylindriques	$k_L a_{20} = 1,477 Q_G^{1,037} h^{-0,136} S^{-1,174} S_p^{0,042} S_a^{0,145}$
Chenaux d'aération type I	$k_L a_{20} = 0,264 Q_G^{0,751} h^{-0,229} S^{0,918} S_p^{0,603} S_a^{0,118} L^{-0,913} Ang^{0,453} U_C^{0,735}$
Chenaux d'aération type II	$k_L a_{20} = 3,930 Q_G^{0,673} h^{0,130} S^{-1,076} S_p^{0,218} S_a^{0,185} L^{-0,167} Ang^{0,206} U_C^{0,112}$

Des relations permettant d'évaluer le rendement d'oxygénation par mètre d'immersion s'en déduisent (cf. tableau suivant).

Type de bassin	Relation dimensionnelle
Bassins cylindriques	$RO_s/m = 4,616 Q_G^{0,037} h^{-0,026} S^{-0,174} S_p^{0,042} S_a^{0,145}$
Chenaux d'aération type I	$RO_s/m = 0,828 Q_G^{-0,249} h^{-0,123} S^{0,082} S_p^{0,603} S_a^{0,118} L^{-0,913} Ang^{0,453} U_C^{0,735}$
Chenaux d'aération type II	$RO_s/m = 12,433 Q_G^{-0,327} h^{0,235} S^{-0,076} S_p^{0,218} S_a^{0,185} L^{-0,167} Ang^{0,206} U_C^{0,112}$

Ces relations peuvent être utilisées lors du dimensionnement d'un système d'aération, pour des formes de bassin conventionnelles (chenaux et bassins cylindriques). Elles permettent d'optimiser le dimensionnement du couple bassin/système d'aération.

Elles constituent également un outil utilisable pour l'évaluation des apports horaires et des rendements d'oxygénation des propositions remises par les constructeurs.

Cependant, cette utilisation doit impérativement être restreinte aux bassins «classiques» tels que ceux constituant la base de données. Ces relations ne sauraient être appliquées à des systèmes d'aération dont la conception et le dimensionnement seraient particulièrement innovants ou atypiques. De plus, ces relations ne sont applicables que pour des gammes de nombres sans dimension indiquées dans les tableaux 4 et 6.

Enfin, les relations proposées sont appelées à évoluer parallèlement aux résultats de mesures de performances d'aération constituant les bases de données.



LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 – L'analyse dimensionnelle

Annexe 2 – Calcul de la surface des poreux

Annexe 3 – Calcul des nombres sans dimension

Annexe 1 – L'analyse dimensionnelle

• PRINCIPE DE LA MÉTHODE

L'analyse dimensionnelle permet de représenter un phénomène physique à l'aide d'une relation adimensionnelle déduite de données expérimentales. Elle fournit une loi fonction des paramètres du système sans que l'influence de chaque paramètre soit étudiée individuellement.

L'analyse dimensionnelle repose sur le théorème de Vaschy-Buckingham (théorème des Π), qui s'énonce de la façon suivante : toute fonction $X = f(x_i)$ de variables indépendantes x_i peut se mettre sous la forme $f(\Pi) = 0$ dans laquelle les Π_i sont des nombres sans dimension indépendants. Si on dénombre $p - 1$ variables indépendantes x_i et une variable dépendante X , et si q est le nombre d'unités fondamentales, il est possible de former $p - q$ nombres sans dimension.

L'analyse dimensionnelle consiste en fait à relier entre eux les facteurs influençant le phénomène étudié à l'aide des nombres adimensionnels, sous la forme suivante :

$$k \prod_{i=1}^{i=n} G_i^{\alpha_i} = 1 \quad (A1)$$

avec :

k : constante ;

G_i : nombres sans dimension ;

α_i : exposants numériques.

Si G_1 est le nombre sans dimension formé à partir de la variable dépendante X recherchée, l'équation 1 peut se mettre sous la forme suivante :

$$\prod_1^{\alpha_1} = \frac{\prod_{i=2}^{i=n} G_i^{\alpha_i}}{k}$$

d'où :

$$\prod_1 = K \prod_{i=2}^{i=n} G_i^{-\alpha_i/\alpha_1} = K \prod_{i=2}^{i=n} G_i^{e_i} \quad (A2)$$

avec :

$K = (1/k)^{1/\alpha_1}$: constante ;

$e_i = -\alpha_i/\alpha_1$: exposants numériques.

L'application du théorème des Π nécessite la connaissance *a priori* des paramètres influençant le phénomène étudié. Elle s'effectue en plusieurs étapes.

① Élaboration de la liste des paramètres influençant le phénomène étudié : à l'exception du paramètre recherché ($k_1 a$ dans le cas de l'insufflation d'air), les paramètres considérés doivent être indépendants entre eux et significatifs (c'est-à-dire variables d'une expérience à l'autre) (Zlokarnik, 1998). De plus, une liste n'est valide que pour une géométrie donnée. Les bassins cylindriques ont donc été différenciés des chenaux d'aération.

② Génération des nombres adimensionnels : les nombres adimensionnels considérés peuvent être générés à l'aide d'une matrice regroupant les grandeurs des paramètres influents (matrice des dimensions). Le choix des nombres sans dimension n'est pas unique. De manière générale, les nombres adimensionnels usuels (Reynolds, Froude...) sont recherchés.

③ Détermination de la constante k et des exposants α_i : les résultats d'expériences effectuées sur des systèmes dans lesquels les paramètres influents sont variables permettent de déterminer la constante et les exposants de l'équation adimensionnelle.

Il s'agit, en fait, d'une procédure itérative. La constante k et les exposants α_i de l'équation adimensionnelle sont obtenus par régression non linéaire. Les nombres sans dimension (et donc les paramètres) retenus pour expliquer un phénomène sont ceux qui donnent la meilleure corrélation entre valeurs déduites de la relation adimensionnelle et valeurs mesurées. Le nombre minimum de nombres adimensionnels fournissant une corrélation acceptable est retenu.

• **PARAMÈTRES CARACTÉRISTIQUES ET NOMBRES ADIMENSIONNELS EN INSUFFLATION D'AIR FINES BULLES**

Les bassins cylindriques ont été différenciés des chenaux d'aération afin d'introduire des nombres adimensionnels propres à chaque géométrie considérée. Les facteurs de conception et de fonctionnement retenus comme caractéristiques du transfert d'oxygène en bassins d'aération équipés de diffuseurs fines bulles sont rapportés dans les paragraphes suivants.

Bassins cylindriques

La figure 1 (p. 16) et le tableau A1 présentent les paramètres caractéristiques retenus en bassins cylindriques.

	Paramètre	Symbole	Dimension	Unité usuelle
Variable dépendante	Coefficient de transfert d'oxygène	$k_L a$	T^{-1}	h^{-1}
Variables géométriques	Surface du bassin	S	L^2	m^2
	Surface totale des membranes ¹	S_p	L^2	m^2
	Surface couverte par les modules de diffuseurs (Surface aérée)	S_a	L^2	m^2
	Hauteur d'eau	H	L	m
	Hauteur d'immersion	h	L	m
Variables cinématiques	Débit d'air insufflé	Q_G	$L^3 T^{-1}$	$Nm^3 \cdot h^{-1}$
	Accélération de la pesanteur	g	$L T^{-2}$	$m \cdot s^{-2}$
Variables caractérisant les propriétés des fluides	Viscosité dynamique de l'eau	μ	$ML^{-1} T^{-1}$	$Pa \cdot s$
	Masse volumique de l'eau	ρ	ML^{-3}	$kg \cdot m^{-3}$

¹ Pour le calcul de la surface des membranes, se reporter à l'annexe 2.

Tableau A1 – Paramètres caractéristiques du transfert d'oxygène dans les bassins d'aération.

Remarques : le diamètre des bulles d'air, considéré comme invariant, n'est pas pris en compte dans l'analyse. La diffusivité de l'oxygène est prise en compte dans le coefficient de transfert côté liquide k_L .

À partir des dix variables et de leurs trois dimensions (M, L et T), il est possible d'établir une relation entre sept nombres sans dimension. Les nombres retenus sont rapportés dans le tableau A2.

De manière à faire apparaître la vitesse superficielle du gaz (U_G) dans la relation finale, le débit d'air insufflé (Q_G) est remplacé par $U_G \times S$.

Nombre	Symbole	Relation	Signification physique
Densité des diffuseurs	DD	$\frac{S_p}{S}$	Rapport de la surface de poreux à la surface du bassin
Densité locale des diffuseurs	DD_L	$\frac{S_p}{S_a}$	Rapport de la surface de poreux à la surface aérée
Diamètre du bassin rapporté à la hauteur d'eau	-	$\frac{D}{h}$	Rapport du diamètre du bassin à la hauteur d'immersion des diffuseurs
Rapport de hauteurs d'eau et d'immersion		$\frac{H}{h}$	Rapport de la hauteur d'eau à la hauteur d'immersion des diffuseurs
Nombre de Reynolds	Re	$\frac{\rho U_G h}{\mu}$	Rapport de l'énergie cinétique de la colonne d'eau au travail des forces de friction dues à la viscosité
Nombre de Froude	Fr	$\frac{U_G^2}{gh}$	Rapport de l'énergie cinétique du volume d'eau à son énergie potentielle
Nombre de transfert	N_T	$\frac{k_L a h}{U_G}$	Rapport de la vitesse de transfert dans la colonne d'eau sur la vitesse du gaz

Tableau A2 – Nombres sans dimension retenus à l'issue de l'analyse dimensionnelle.

28

Le coefficient de transfert d'oxygène $k_L a$, qui est la variable dépendante recherchée, est compris dans le nombre sans dimension nommé nombre de transfert N_T .

La relation adimensionnelle donnant le nombre de transfert s'écrit alors (cf. équation A2) :

$$N_T = K(DD)^{e_1} (DD_L)^{e_2} \left(\frac{D}{h}\right)^{e_3} (Re)^{e_5} (Fr)^{e_6} \quad (A3)$$

avec $K, e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7 = \text{constantes}$.

Le coefficient de transfert d'oxygène peut se mettre sous la forme :

$$k_L a_{20} = K \frac{U_G}{h} (DD)^{e_1} (DD_L)^{e_2} \left(\frac{D}{h}\right)^{e_3} \left(\frac{H}{h}\right)^{e_4} \left(\frac{\rho U_G h}{\mu}\right)^{e_5} \left(\frac{U_G^2}{gh}\right)^{e_6} \quad (A4)$$

Chenaux d'aération

Pour rendre compte de l'effet de la vitesse horizontale sur le transfert d'oxygène, les chenaux d'aération ont été séparés en deux sous-ensembles en fonction de la répartition des modules de diffuseurs : sur l'ensemble du radier (Type I) ou sur seulement au plus $\frac{1}{2}$ radier (Type II), comme présenté figure 3 et dans le tableau A3.

	Paramètre	Symbole	Dimension	Unité usuelle
Variable dépendante	Coefficient de transfert d'oxygène	$k_L a$	T^{-1}	h^{-1}
Variables géométriques	Surface du bassin	S	L^2	m^2
	Surface totale des membranes ¹	S_p	L^2	m^2
	Surface couverte par les modules de diffuseurs (Surface aérée)	S_a	L^2	m^2
	Largeur du chenal	L	L	m
	Angle axes des agitateurs – premier module de diffuseurs	Ang	-	rad
	Hauteur d'eau	H	L	m
	Hauteur d'immersion	h	L	m
Variables cinématiques	Débit d'air insufflé	Q_G	$L^3 T^{-1}$	$Nm^3 \cdot h^{-1}$
	Vitesse de circulation horizontale de l'eau	U_C	LT^{-1}	$cm \cdot s^{-1}$
	Accélération de la pesanteur	g	LT^{-2}	$m \cdot s^{-2}$
Variables caractérisant les propriétés des fluides	Viscosité dynamique de l'eau	μ	$ML^{-1}T^{-1}$	Pa.s
	Masse volumique de l'eau		$M \cdot L^{-3}$	$kg \cdot m^{-3}$

¹ Pour le calcul de la surface des membranes, se reporter à l'annexe 2.

Tableau A3 – Paramètres caractéristiques du transfert d'oxygène dans les chenaux d'aération.

Pour les chenaux, dix nombres sans dimension peuvent être formés (13 variables – 3 dimensions).

Le tableau A4 présente les nombres sans dimension retenus.

Nombre	Symbole	Relation	Signification physique
Densité des diffuseurs	DD	$\frac{S_p}{S}$	Rapport de la surface de poreux à la surface du bassin
Densité locale des diffuseurs	DD_L	$\frac{S_p}{S_a}$	Rapport de la surface de poreux à la surface aérée
Surface du bassin rapportée au carré de la hauteur d'eau	-	$\frac{S}{h^2}$	Rapport de la surface du bassin à la section carrée équivalente
Rapport de L à la hauteur d'immersion	-	$\frac{L}{h}$	Rapport de la largeur du chenal à la hauteur d'immersion
Rapport de hauteurs d'eau et d'immersion		$\frac{H}{h}$	Rapport de la hauteur d'eau à la hauteur d'immersion
Angle axes des agitateurs – premier module de diffuseurs	-	Ang	
Nombre de Reynolds	Re	$\frac{\rho U_G h}{\mu}$	Rapport de l'énergie cinétique de la colonne d'eau au travail des forces de friction dues à la viscosité
Nombre de Froude	Fr	$\frac{U_G^2}{gh}$	Rapport l'énergie cinétique du volume d'eau à son énergie potentielle
Rapport des vitesses gaz - liquide	-	$\frac{U_C}{U_G}$	Rapport de la vitesse de circulation horizontale du liquide à la vitesse du gaz
Nombre de transfert	N_T	$\frac{k_L a h}{U_G}$	Rapport de la vitesse de transfert dans la colonne d'eau sur la vitesse du gaz

Tableau A4 – Nombres sans dimension retenus à l'issue de l'analyse dimensionnelle.

La relation adimensionnelle s'écrit alors (cf. équation 2) :

$$N_T = K(DD)^{e_1} (DD_L)^{e_2} \left(\frac{S}{h^2}\right)^{e_4} \left(\frac{H}{h}\right)^{e_5} \text{Ang}^{e_6} \left(\frac{U_C}{U_G}\right)^{e_7} (\text{Re})^{e_8} (\text{Fr})^{e_9} \quad (\text{A5})$$

avec $K, e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7, e_8, e_9, e_{10} = \text{constantes}$.

Le coefficient de transfert d'oxygène peut se mettre sous la forme :

$$k_L a_{20} = K \frac{U_G}{h} (DD)^{e_1} (DD_L)^{e_2} \left(\frac{S}{h^2}\right)^{e_3} \left(\frac{L}{h}\right)^{e_4} \left(\frac{H}{h}\right)^{e_5} \text{Ang}^{e_6} \left(\frac{U_C}{U_G}\right)^{e_7} \left(\frac{\rho U_G h}{\mu}\right)^{e_8} \left(\frac{U_G^2}{gh}\right)^{e_9} \quad (\text{A6})$$

• RELATIONS PERMETTANT DE PRÉDIRE LES PERFORMANCES D'OXYGÉNATION EN EAU CLAIRE

Bassins cylindriques

Concentration en oxygène à saturation	$C_s = 8,840 h^{0,109}$
Coefficient de transfert d'oxygène	$k_L a_{20} = 1,477 Q_G^{1,037} h^{-0,136} S^{-1,174} S_p^{0,042} S_o^{0,145}$
Rendement d'oxygénation standard spécifique	$RO_s/m = 4,616 Q_G^{0,037} h^{-0,026} S^{-0,174} S_p^{0,042} S_o^{0,145}$

Les coefficients de transfert obtenus à l'aide de la relation de prédiction sont comparés à ceux mesurés sur la figure A1.

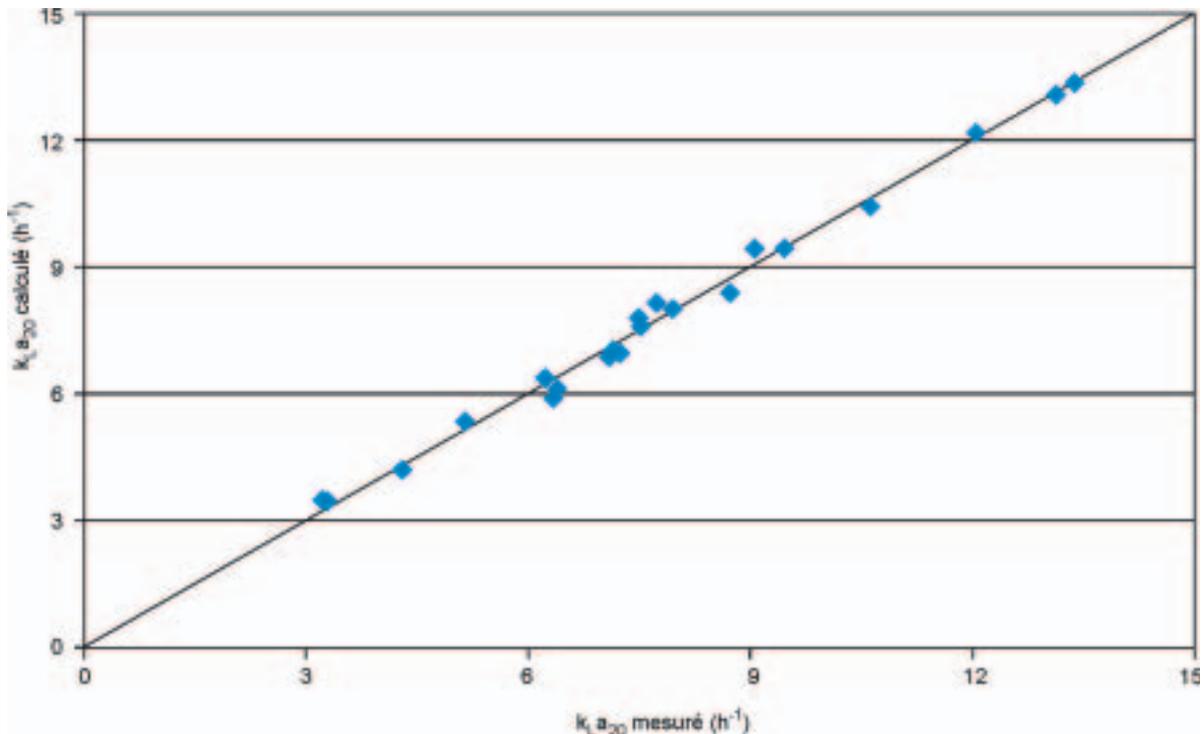


Figure A1 – Comparaison des coefficients de transfert d'oxygène mesurés et calculés.

l'écart relatif est en moyenne de 2,7 %, avec une valeur maximale de 7,2 %. L'adéquation entre valeur calculée et valeur mesurée est donc très satisfaisante.

Chenaux d'aération

Concentration en oxygène à saturation	$C_s = 9,012 h^{0,105}$
Coefficient de transfert d'oxygène	Type I $k_L a_{20} = 0,264 Q_G^{0,751} h^{-0,229} S^{-0,918} S_p^{0,603} S_a^{0,118} L^{-0,913} Ang^{0,453} U_C^{0,735}$ Type II $k_L a_{20} = 3,930 Q_G^{0,673} h^{0,130} S^{-1,076} S_p^{0,218} S_a^{0,185} L^{-0,167} Ang^{0,206} U_C^{0,112}$
Rendement d'oxygénation standard spécifique	Type I $RO_s/m = 0,828 Q_G^{-0,249} h^{-0,123} S^{0,082} S_p^{0,603} S_a^{0,118} L^{-0,913} Ang^{0,453} U_C^{0,735}$ Type II $RO_s/m = 12,433 Q_G^{-0,327} h^{0,235} S^{-0,076} S_p^{0,218} S_a^{0,185} L^{-0,167} Ang^{0,206} U_C^{0,112}$

Les coefficients de transfert obtenus à l'aide des relations sont comparés à ceux mesurés sur la figure A2.

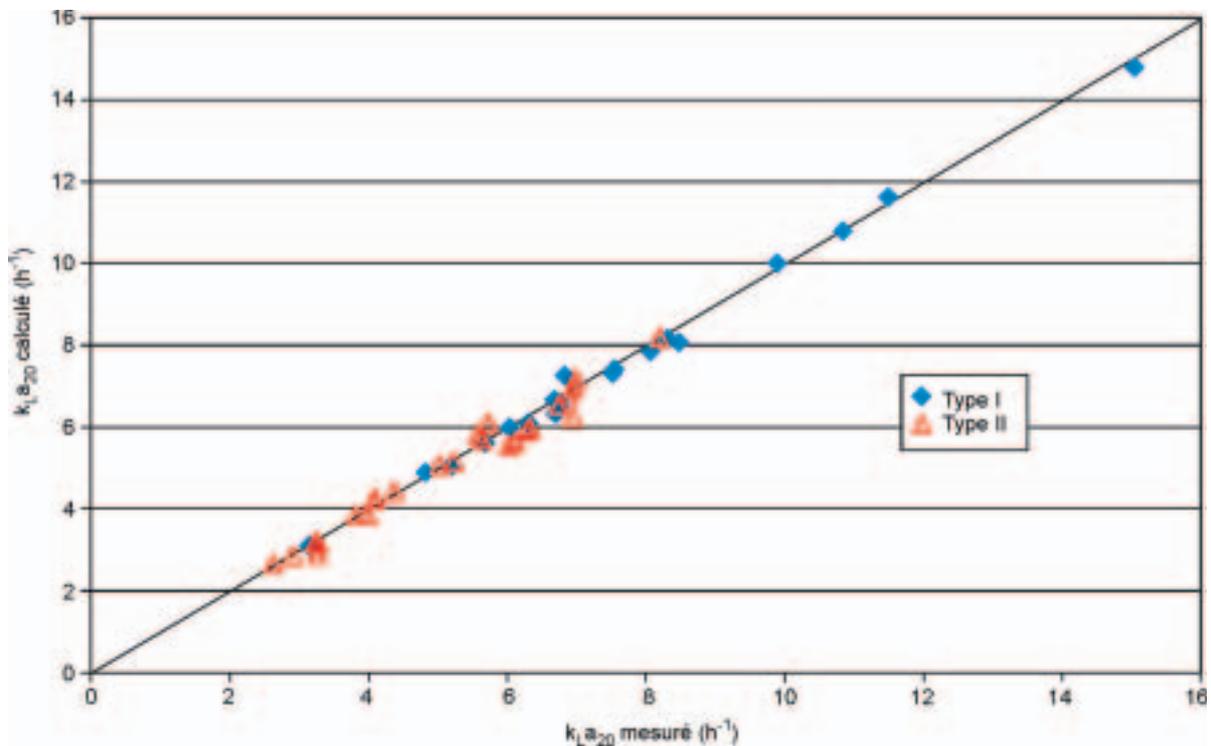


Figure A2 – Comparaison des coefficients de transfert d'oxygène mesurés et calculés.

Les écarts relatifs sont en moyenne de 2,5 % (Type I) et 3,3 % (Type II), avec une valeur maximale de 7,3 % (Type I) et 10,6 % (Type II).

Annexe 2 – Calcul de la surface des poreux

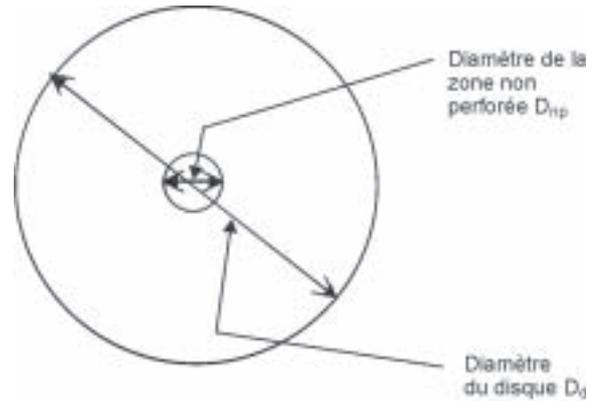
La surface des poreux est calculée comme le produit du nombre de diffuseurs par la surface perforée de chaque diffuseur.

La surface perforée est fonction de la forme des diffuseurs.

Surface perforée des disques

La surface perforée d'un disque s'écrit :

$$S_{\text{perf}} = \frac{\pi}{4}(D_d^2 - D_{np}^2)$$

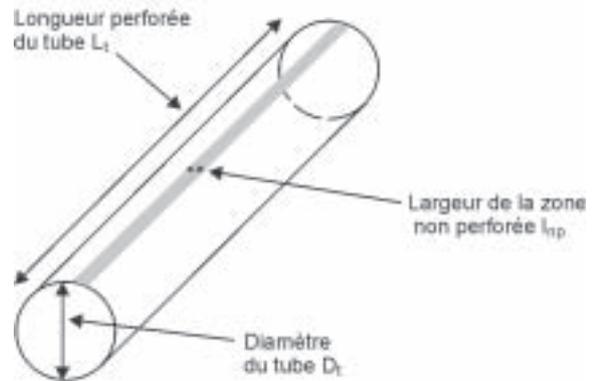


32

Surface perforée des tubes

La surface perforée d'un tube s'écrit :

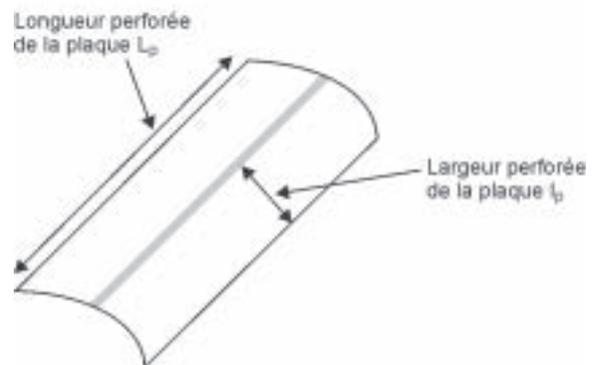
$$S_{\text{perf}} = (\pi D_t - l_{np})L_t$$



Surface perforée des plaques

La surface perforée d'une plaque s'écrit :

$$S_{\text{perf}} = 2l_p l_p$$



Annexe 3 – Calcul des nombres sans dimension

Données numériques :

Masse volumique de l'eau à 20 °C	$\rho = 998$	kg.m^{-3}
Viscosité cinématique de l'eau à 20 °C	$\mu = 10^{-3}$	Pa.s
Accélération de la pesanteur	$g = 9,81$	m.s^{-1}

Nombre de Reynolds :

$$\text{Re} = \frac{\rho U_G h}{\mu} = \frac{998 U_G h}{0,001 \times 3600} = 277,22 U_G h$$

avec U_G en m.h^{-1} et h en m .

Nombre de Froude :

$$\text{Fr} = \frac{U_G^2}{gh} = \frac{U_G^2}{3600^2 \times 9,81 h} = 2,8 \times 10^{-5} \frac{U_G^2}{h}$$

avec U_G en m.h^{-1} et h en m .

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Capela S., Roustan M., and Héduit A., 2001, Transfer Number in fine bubble diffused aeration systems. *Wat. Sci. Tech.*, 43(11), pp. 145-152.

Deronzier G., Duchène Ph. and Héduit A., 1998, Optimisation of oxygen transfer in clean water by fine bubble diffused air system and separate mixing in aeration ditches, *Wat. Sci. Tech.*, 3, pp. 35-42.

Duchène Ph., Cotteux E., and Capela S., 2001, Applying fine bubble aeration to small aeration tanks *Wat. Sci. Tech.*, 44(2-3), pp. 203-210.

Duchène, P. and Héduit, A., 2000, *Expérience et interprétation de mesures de performances d'aération en boues activées*, Réseau Environnement 2000, 23^e Symposium sur les eaux usées.

FNDAE n° 25, 2001, Traitement de l'azote dans les stations d'épuration biologique des petites collectivités.

FNDAE n° 26, 2002, *Insufflation d'air fines bulles pour les boues activées en petites collectivités : influence de la forme du bassin et de la répartition des diffuseurs sur l'efficacité du transfert d'oxygène*.

prEN 12255-15, 2004, European Standard : Wastewater treatment plants – Part 15 : Measurement of the oxygen transfer in clean water in activated sludge aeration tanks. (DRAFT : prEN 12255-15, December 1999).

Zlokarnik, M., 1998, *Comparaison de différents systèmes d'aération et méthodes de dimensionnement*, Journées d'études gaz-liquide, INSA Toulouse: 7/1-7/13.

NOMENCLATURE

AH	Apport horaire d'oxygène (MT^{-1})
AHp	Apport horaire d'oxygène de pointe (MT^{-1})
AHs	Apport horaire d'oxygène dans les conditions standard (MT^{-1})
ASB	Apport spécifique brut ($L^{-2}T^2$)
Ang	Angle entre l'axe des agitateurs et le premier module de diffuseurs
Cs	Concentration de saturation en oxygène à 20 °C ($M.L^{-3}$)
D	Diamètre du bassin (L)
D_{ext}	Diamètre extérieur du chenal (L)
D_{in}	Diamètre intérieur du chenal (L)
DD	Densité des diffuseurs
DD_L	Densité locale des diffuseurs
Fr	Nombre de Froude
g	Accélération de la pesanteur (LT^{-2})
h	Hauteur d'immersion des diffuseurs (L)
H	Hauteur d'eau (L)
$k_L a$	Coefficient de transfert d'oxygène (T^{-1})
$k_L a_{20}$	Coefficient de transfert d'oxygène à 20°C (T^{-1})
L	Largeur du chenal (L)
M_{O_2}	Flux d'oxygène dans l'air insufflé ($M.T^{-1}$)
N_T	Nombre de transfert
Q_G	Débit d'air insufflé (L^3T^{-1})
Re	Nombre de Reynolds
ROs/m	Rendement d'oxygénation standard par mètre d'immersion des diffuseurs (L^{-1})
S	Surface du bassin (L^2)
S_a	Surface couverte par les modules de diffuseurs (L^2)
S_p	Surface totale des membranes (L^2)
U_C	Vitesse de circulation horizontale de l'eau (LT^{-1})
U_G	Vitesse superficielle du gaz (LT^{-1})
V	Volume de liquide (L^3)
μ	Viscosité dynamique de l'eau ($ML^{-1}T^{-1}$)
ρ	Masse volumique de l'eau (ML^{-3})



Résumé

Les systèmes d'insufflation d'air en fines bulles équipant des bassins d'aération de taille et de géométrie variées connaissent depuis les années 90 un fort développement. Cependant, à ce jour, les performances du transfert d'oxygène prévues au stade des projets prennent peu ou pas en compte les conditions hydrodynamiques spécifiques à chaque site. L'interprétation des résultats d'essais d'aérateurs en eau claire effectués par le Cemagref, à l'aide de l'analyse dimensionnelle, a permis d'établir des relations donnant le coefficient de transfert d'oxygène à 20 °C ($k_L a_{20}$) et le rendement d'oxygénation standard par mètre d'immersion (ROs/m), en fonction des paramètres caractéristiques du transfert d'oxygène.

En bassins cylindriques (21 mesures), les paramètres caractéristiques sont : le débit d'air insufflé (Q_G), la hauteur d'immersion des diffuseurs (h), la surface du bassin (S), la surface des membranes (S_p) et la surface aérée (S_a).

En chenaux d'aération (47 mesures), les mêmes paramètres ont été retenus, additionnés de la largeur du chenal (L), de l'angle entre les agitateurs et le premier module de diffuseurs (Ang) et de la vitesse horizontale de circulation de l'eau (U_C). Deux types de chenaux ont été considérés suivant la disposition des modules de diffuseurs : sur plus de la moitié du radier (type I) ou sur au plus la moitié du radier (type II).

Le présent document propose des définitions des variables caractéristiques du transfert d'oxygène en insufflation d'air fines bulles, des critères et des nombres sans dimension caractérisant les performances d'oxygénation des systèmes d'aération. Les relations permettant de prédire les coefficients de transfert d'oxygène et les rendements d'oxygénation en fonction des facteurs précités sont présentées. Enfin, des exemples illustrent l'application de ces relations au dimensionnement des systèmes d'aération.

Mots-clés : analyse dimensionnelle, épuration des eaux résiduaires, fines bulles, modèle, transfert d'oxygène.

Predicting aeration capacities of fine pore aeration systems in clean water

36



Abstract

Since the 1990's, aeration tanks of various sizes and geometry have been increasingly equipped with EPDM membrane diffusers. Oxygenation performance prediction, at a project stage, is however still relatively inaccurate, as it fails to take into account hydrodynamic conditions of the site under study. As a substantial number of oxygenation, performance measurements of fine bubble aeration systems has been performed by the Cemagref, the establishment of relationships between the oxygen transfer and the parameters affecting it has been considered using dimensional analysis. Relationships have been established between the oxygen transfer coefficient at 20 °C ($k_L a_{20}$) and standard oxygen transfer efficiency per meter of submergence (ROs/m) and the parameters characteristic of the oxygen mass transfer.

In cylindrical tanks (21 measurements), characteristics parameters are the following: the air flow rate (Q_G), the depth of submergence (h), the tank surface area (S), the total membrane area (S_p) and the aerated surface (S_a).

In circular ditches (47 measurements), the same parameters have been retained, complemented with the tank width (the angle between the mixers and the first grid of diffusers (Ang) and the horizontal velocity of water (U_C). In addition, the annular ditches have been differentiated according to the tank coverage: tank coverage higher than 50 % of the surface area (Type I) or at the maximum 50 % of the area (Type II).

The specific variables of the oxygen in fine bubble aeration as well as the dimensionless numbers characterising the oxygenation capacities of aeration systems are defined. The relationships predicting oxygen transfer coefficients and oxygen transfer efficiencies in function of the pre-cited factors are then presented. Finally, some examples illustrate the application of the relationships to aeration system design.

Keywords : dimensional analysis, wastewater treatment, fines bubbles, model, oxygen transfer

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	Élaboration des dispositions locales de secours pour la distribution d'eau potable	2002
5	Les stations d'épuration adaptées aux petites collectivités	1986
5 bis	Stations d'épuration – Dispositions constructives pour améliorer leur fonctionnement et faciliter leur exploitation	2002
= 22 bis		
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	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 membranaires pour le traitement de l'eau	2002
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
27	Guide méthodologique d'études anti-bélier pour les réseaux d'eau potable	2002
28	Étude des prétraitements compacts basés uniquement sur le tamisage fin. Cas du traitement des eaux résiduaires urbaines ou domestiques.	2004
29	Traitement du phosphore dans les petites stations d'épuration à boues activées.	2004
30	Traitement des matières de vidange en milieu rural. Évaluation technico-économique des filières	2004
31	Prédiction des capacités d'oxygénation en eau claire des systèmes d'insufflation d'air	2004
Documents hors-série		
HS 4	Élimination des nitrates des eaux potables	2002
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
HS10	Le renouvellement des réseaux d'eau potable	1994
HS11	L'utilisation des eaux usées épurées en irrigation	1998
HS 12	La dégradation de la qualité de l'eau potable dans les réseaux	2002
HS13	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
INV00DE	Synthèse nationale et résultats départementaux 2000	2004