

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

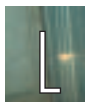
d'une puissance d'aération adaptée facilitant l'obtention de réglages optimisés et donnant par là les conditions d'une consommation d'énergie minimale.

- 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