

Article

« Evaluation à l'échelle pilote d'un aérateur à cheminement prolongé »

P. Murray et J. de la Noüe

Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, vol. 1, n° 3, 1988, p. 179-201.

Pour citer cet article, utiliser l'information suivante :

URI: <http://id.erudit.org/iderudit/705008ar>

DOI: 10.7202/705008ar

Note : les règles d'écriture des références bibliographiques peuvent varier selon les différents domaines du savoir.

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter à l'URI <https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/>

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche. Érudit offre des services d'édition numérique de documents scientifiques depuis 1998.

Pour communiquer avec les responsables d'Érudit : info@erudit.org

Evaluation à l'échelle pilote d'un aérateur à cheminement prolongé

Evaluation of an
«extended contact» pilot-scale aerator

P. MURRAY (1) et J. de la NOÛE (2)

RÉSUMÉ

En vue d'optimiser l'aération de substrats liquides à forte charge organique dissoute, un système d'aération fonctionnant selon le principe du "cheminement prolongé" a été conçu et construit à l'échelle pilote (3 000 L). Le principe mis à l'essai consiste à injecter de l'air à la base de longs tuyaux enroulés. La dynamique hydraulique du système à cheminement prolongé a été caractérisée. Un système d'aération plus conventionnel, soit un injecteur d'air de type poreux, a été utilisé comme base de comparaison. Les performances d'oxygénation des deux systèmes ont été mesurées dans l'eau, sous les mêmes conditions, puis comparées entre elles et aux valeurs rapportées dans la littérature pour d'autres systèmes.

Les principaux résultats montrent que le coefficient de transfert d'oxygène ($K_L a$) est bon à l'intérieur des tuyaux de l'aérateur à cheminement prolongé (jusqu'à 230 h^{-1}). Le nouveau prototype démontre également une forte capacité d'emprisonnement de l'air puisque le gonflement atteint 20 %. Finalement, de bonnes efficacités énergétiques ont été obtenues : des valeurs brute de $1.9 \text{ kg O}_2/\text{kWh}$ et nette de $9.2 \text{ kg O}_2/\text{kWh}$ ont été atteintes. Le prototype, tel que construit, a offert des performances d'oxygénation globales similaires à celles démontrées par l'injecteur d'air de type poreux, le volume

(1) Département de génie rural, Université Laval, Sainte-Foy, Québec G1K 7P4.

(2) Département de biologie et Groupe de recherche en recyclage biologique et aquiculture, Université Laval, Sainte-Foy, Québec, G1K 7P4.

interne des tuyaux, qui présente un intérêt particulier pour le transfert d'oxygène, ne représentant que 26 % du volume liquide total.

L'optimisation de l'aérateur à cheminement prolongé passe donc par l'accroissement maximal du volume interne des tuyaux par rapport au volume liquide total. Cette mesure se traduirait par une augmentation de la capacité d'oxygénation totale et des efficacités physique et énergétique du transfert d'oxygène, ainsi que par une diminution des puissances spécifiques requises.

Les performances du système à cheminement prolongé dans un liquide chargé en substrat organique restent à étudier, mais les résultats préliminaires obtenus dans l'eau du robinet sont encourageants.

Mots-clés : aérateur, injecteur, oxygénation, pilote, système, traitement.

SUMMARY

Aeration represents the major operating cost in the various aerobic treatment processes intended for wastewaters or other effluents showing a high dissolved organic load, such as swine manure ; it is therefore necessary to maximize the utilization of the oxygen provided to any treatment system.

Various types of air injectors and turbines have been studied or built in order to achieve an adequate oxygenation of liquid wastes to be treated : porous and non-porous injectors, immersed and surface turbines, the latter rotating vertically or horizontally. The aeration performances of these systems appear to be variable ; moreover, these systems are not always well adapted to a substrate such as swine manure. With a view to possible application to swine manure treatment, we have designed an "extended contact" pilot-scale aerator (3000 L).

The strategy involved injecting air at the basal end of long coiled pipes in which the manure to be treated was circulated. The objective was to increase the time of contact between the air bubbles and the liquid and, consequently, oxygen transfer to the latter. The internal surface of the pipes was large and could become an effective physical support for microbial attachment, thus promoting further digestion.

We evaluated the performance of the system with tap water and compared it with a more conventional aeration system, i.e. a porous-type injector also known as a mini-bubble diffusor.

Eight oxygenation parameters were evaluated for each of the two systems : oxygen transfer coefficient ($K_L a$), swelling (SWEL), standard oxygenation capacity (SOC), specific standard oxygenation capacity (SSOC), physical efficiency of oxygen transfer [ϵ , cf. Equation (1)], power consumed (P), specific power injected (SP) and energy efficiency (E). A theoretical simulation of the performances of a hybrid system combining the two aeration principles was carried out. The hydraulic dynamics of the extended-contact system were established through the evaluation of the recirculated flows due to the aerator. The best results obtained were finally compared to

those taken from the literature.

The main results show the following positive aspects of the extended-contact aerator :

- 1 - high oxygen transfer coefficients inside the pipes ;
- 2 - high air retention capacity ;
- 3 - good energy efficiency for low air flows.

Inside the pipes, values of 230 h^{-1} were obtained for $K_L \cdot a$. The new prototype retained up to 546 L of air which corresponds to a swelling of 20 %. A raw energy efficiency of $1.9 \text{ kg O}_2/\text{kWh}$ was obtained, and the net value (based upon the net power) was $9.2 \text{ kg O}_2/\text{kWh}$.

The prototype, as constructed, gave oxygenation performances globally similar to those obtained with the porous type air injector despite the fact that the internal volume of the pipes, which is of special interest for oxygen transfer, was only 26 % of the total liquid volume.

The optimization of the extended-contact system therefore calls for a maximal increase of the internal volume of the pipes as compared to the total liquid volume. Ideally, the internal volume should represent 100 % of the total volume. By doing so, oxygenation performances should be improved because of :

- 1 - increased total oxygenation capacity due to a better overall $K_L \cdot a$;
- 2 - increased physical efficiency of oxygen transfer (ϵ) in relation to the length of the pipes (in theory, ϵ could reach 100 %) ;
- 3 - decreased injected specific power (SP) ;
- 4 - increased energy efficiency of oxygen transfer (E).

With such improvements in view and considering the requirements of the aerobic treatment of highly loaded effluents such as swine manure, the extended-contact aerator appears to be a promising aeration technique that still has, however, to be tested under practical conditions.

Key-words : aerator, injector, oxygenation, pilot, treatment system.

INTRODUCTION

Lors de la conception d'installations de traitement des eaux usées, le choix des équipements d'aération revêt une importance économique majeure (RAMALHO, 1983) ; il convient donc de maximiser l'utilisation de l'oxygène fourni. Ceci est encore plus vrai lorsqu'on considère un matériel aussi chargé que le lisier de porc brut. Le ministère de l'Environnement du Québec indique les données de base suivantes quant au lisier brut : solides totaux (S.T.) : $60\,000 \text{ mg/L}$; demande biologique d'oxygène (D.B.O.) : $35\,000 \text{ mg/L}$; demande chimique d'oxygène (D.C.O.) : $90\,000 \text{ mg/L}$ (DAIGLE et COURNOYER, 1985).

De plus, l'examen de la littérature révèle que les systèmes d'aération traditionnels ne sont pas toujours bien adaptés à notre climat nordique et à un substrat tel que le fumier liquide. En effet, VASSEUR et LAIGNEAU (1975) précisent que les injecteurs d'air de type poreux sont sujets au colmatage, celui-ci étant dû soit à une croissance biologique, soit à des précipités chimiques. Pour leur part, CUMMINGS et JEWELL (1977) ont observé une abondante production de mousse qui peut se révéler gênante lors du traitement aérobic de lisier de vache à l'aide d'une turbine de surface à rotation horizontale (système LICOM II). Enfin, STUKENBERG *et al.* (1977) ne recommandent pas l'emploi de turbines de surface dans le cas d'un climat à risques de gel.

La mise au point d'un nouveau type de digesteur, mieux adapté à l'aération de fumier liquide et qui permettrait d'optimiser le transfert d'oxygène, apparaît donc comme un objectif justifié. Considérant les problèmes de pollution agricole qui ont surgi au Québec depuis quelques années, nous avons entrepris une telle mise au point dans la perspective d'une application éventuelle à la digestion aérobic du lisier de porc. Les essais dans l'eau de robinet, correspondant à des conditions standard et étant une pratique reconnue et largement employée dans le but de caractériser les performances des aérateurs, nous avons jugé que ces essais représentaient une première étape fondamentale et essentielle dans le développement d'un nouveau prototype d'aérateur, qui fait donc l'objet du présent article.

Divers types d'injecteurs et de turbines ont été étudiés ou construits pour assurer une oxygénation satisfaisante des milieux liquides à traiter : injecteurs de type poreux ou non poreux (Water Pollution Control Federation, 1971), turbines submergées (LOEHR, 1977) ou de surface (WPCF, 1971 ; LOEHR, 1977) à rotation verticale ou horizontale.

On peut comparer entre elles les performances de ces systèmes d'aération par la mesure de six paramètres d'oxygénation fondamentaux : coefficient de transfert d'oxygène, $K_L a$ (WPCF, 1971 ; LOEHR, 1977 ; Standard methods for the examination of water and wastewater, 1980 ; RAMALHO, 1983), capacité d'oxygénation standard spécifique, COSS (HASHIMOTO et CHEN, 1976 ; FENLON et ROBINSON, 1977 ; FENLON et MILLS, 1980 ; GINNIVAN, 1983 ; RAMALHO, 1983), pourcentage de gonflement, GONF (MUNTEANU, 1972 ; ROBINSON et FENLON, 1975 ; GINNIVAN, 1983 ; PROKOP *et al.*, 1983), efficacité physique du transfert d'oxygène, ϵ (WPCF, 1971 ; LOEHR, 1977 ; RAMALHO, 1983), puissance spécifique injectée, PS (HÉDUIT, 1980 ; Standard methods for the examination of water and wastewater, 1980) et efficacité énergétique, E (WPCF, 1971 ; LOEHR, 1977 ; HÉDUIT, 1980 ; Standard methods for the examination of water and wastewater, 1980 ; RAMALHO, 1983).

Afin d'augmenter le temps de contact entre les bulles d'air et le liquide et, en conséquence, le transfert de l'oxygène dans ce dernier, nous avons conçu et construit un prototype d'aérateur à l'échelle pilote dit "à cheminement prolongé". Le principe appliqué est l'injection d'air à la base de longs tuyaux de plastique enroulés à l'intérieur desquels circule le liquide à traiter. La surface interne des tuyaux est considérable et peut constituer un intéressant support de fixation microbienne, propice à une digestion accrue (DOYLE, 1985).

Nous avons évalué la performance de ce système dans l'eau du robinet et l'avons comparée avec celle d'un système d'aération plus conventionnel, soit un injecteur de type poreux appelé aussi diffuseur de mini-bulles.

Plusieurs paramètres d'oxygénation ont été évalués pour chacun des deux systèmes cités ci-dessus. Une simulation théorique des performances d'un système hybride, combinant les deux principes d'aération (cheminement prolongé et injecteur poreux), a été réalisée. La dynamique hydraulique du système à cheminement prolongé a été établie par l'évaluation des débits liquides de recirculation, engendrés par l'aérateur. Finalement, les meilleurs résultats obtenus ont été comparés avec ceux provenant de littérature.

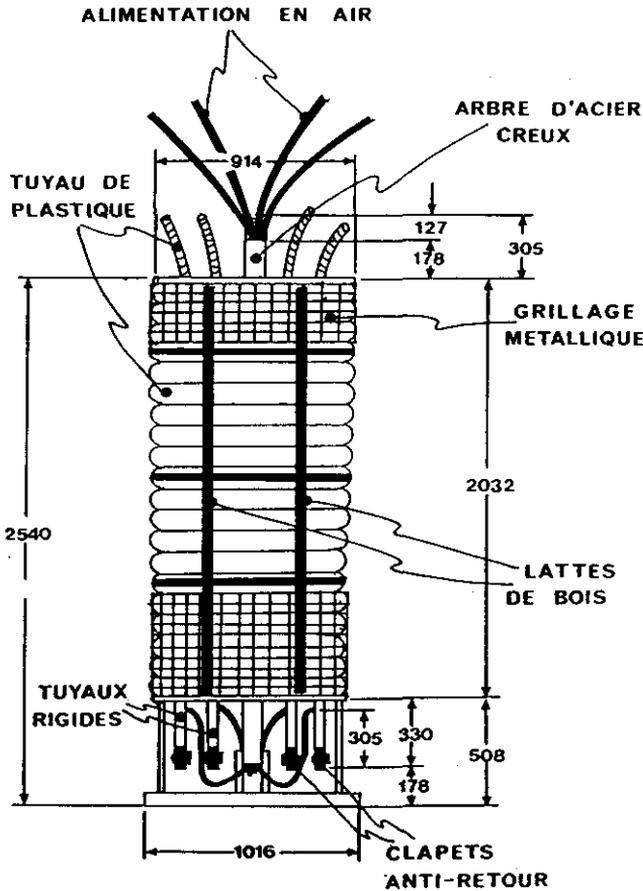


Figure 1.- Schéma de l'aérateur à cheminement prolongé.

Figure 1.- Diagram of the "extended contact" aerator.

Note : toutes les cotes sont en mm.

Note : all dimensions are in mm.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les essais, tant avec l'injecteur d'air de type poreux qu'avec l'aérateur à cheminement prolongé, sont réalisés dans une cuve d'acier cylindrique et verticale, d'une hauteur de 3.66 m, d'un diamètre de 1.17 m et d'une capacité utile de 3 m³. Cette cuve est remplie d'eau du robinet à une température de 24 °C.

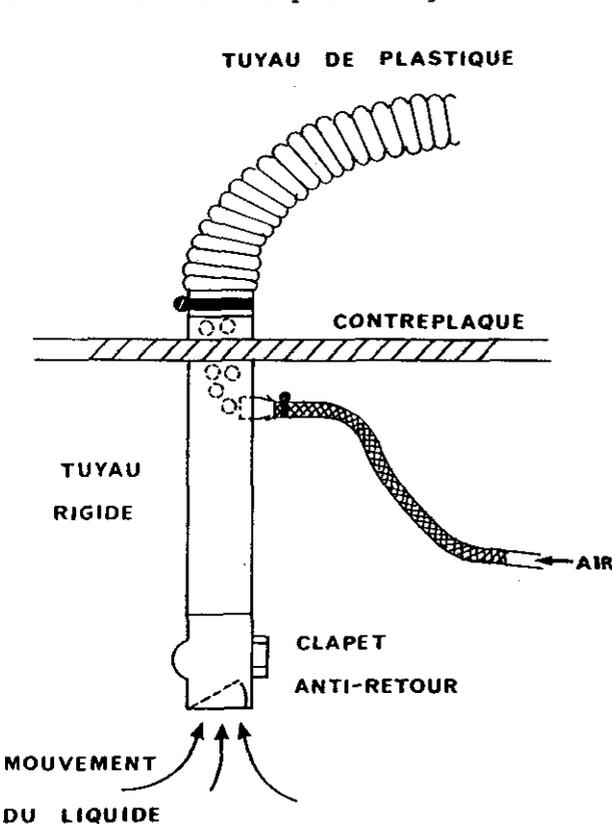
Injecteur d'air de type poreux

L'injecteur d'air poreux utilisé est un "WYSS FLEX-A-TUBE". Chaque unité mesure environ 60 cm de long et consiste en un demi-cylindre rigide entouré d'une membrane souple de vinyle parsemée de petites perforations. Nous avons utilisé un réseau de quatre unités reliées entre elles par des tuyaux de plastique.

Aérateur à cheminement prolongé

Le prototype d'aérateur à cheminement prolongé (figure 1) est de fabrication domestique. Il consiste principalement en un enroulement de douze spirales de tuyau de plastique blanc ondulé (diamètre moyen de 40 mm) enroulées autour d'un tuyau métallique vertical central. La spirale intérieure mesure 16.5 m de long et la spirale la plus extérieure, 91 m. La longueur moyenne des spirales est de 57 m et la longueur totale de tuyau enroulé est de 685 m pour un volume interne total d'environ 780 L. La surface interne totale des tuyaux, disponible pour une colonisation bactérienne éventuelle, est de 111.5 m².

Chaque spirale est reliée, à sa base, à un bout de tuyau rigide vertical à l'intérieur duquel est injecté l'air acheminé par un boyau



d'arrosage d'environ 10 mm de diamètre intérieur (figure 2). Ces tuyaux rigides sont terminés, à leur base, par un clapet anti-retour qui, en se fermant sous l'effet de la pression de l'air injecté, oblige l'air à monter dans les tubes lorsque l'aération démarre. Lorsque la colonne de liquide dans les tubes exerce une pression inférieure à celle de la colonne de liquide située de l'autre côté du clapet, ce dernier s'ouvre alors pour permettre au liquide de circuler avec l'air dans le tuyau.

Les lignes d'air destinées à alimenter chaque spirale séparément sont constituées de boyau d'arrosage ordinaire ; elles passent à l'intérieur de l'arbre central creux et en ressortent à sa partie inférieure. L'enrou-

Figure 2.- Dispositif d'injection de l'air de l'aérateur à cheminement prolongé.

Figure 2.- Air injected set-up for the "extended contact" aerator.

lement de tuyau est maintenu en place par du grillage métallique et des lattes de bois.

Montage expérimental

Le montage expérimental de l'aérateur à cheminement prolongé est illustré à la figure 3. Il consiste en un compresseur centrifuge à palettes de graphite actionné par un moteur électrique monophasé de 1.5 kW qui alimente un réservoir cylindrique d'uniformisation d'environ 0.4 mètre cube. Ce dernier possède une valve de déviation du débit d'air et une sortie qui envoie l'air dans le rotamètre principal (BROOKS ; Modèle No. R10M-25-3 pour le tube et 10-RS-64 pour le flotteur) qui mesure le débit d'air total injecté dans le système d'aération. De la sortie du rotamètre principal, l'air est canalisé dans un "distributeur" muni de douze valves permettant d'ajuster le débit d'air de chacune des douze spirales de tuyau. Le distributeur inclut également un manomètre conventionnel de type Bourdon (Continental Precision Instruments) dont la fonction est de mesurer la pression relative de l'air dans le réseau d'alimentation. De ce distributeur, l'air est acheminé dans douze conduites distinctes en passant par un panneau de mesure des débits d'air de chaque spirale. Ce panneau est muni de plusieurs petits rotamètres (GILMONT, modèle No. 4 ; GILMONT, modèle No. 5 ; MATHESON, modèle No. 605 ; BROOKS, modèle No. R8M-127-4 (tube) et 8-RV-8 (flotteur) à partir desquels les conduites d'air vont rejoindre l'arbre creux, puis les douze spirales indépendantes de l'aérateur à cheminement prolongé ; ce dernier est inséré dans la cuve d'acier cylindrique et verticale.

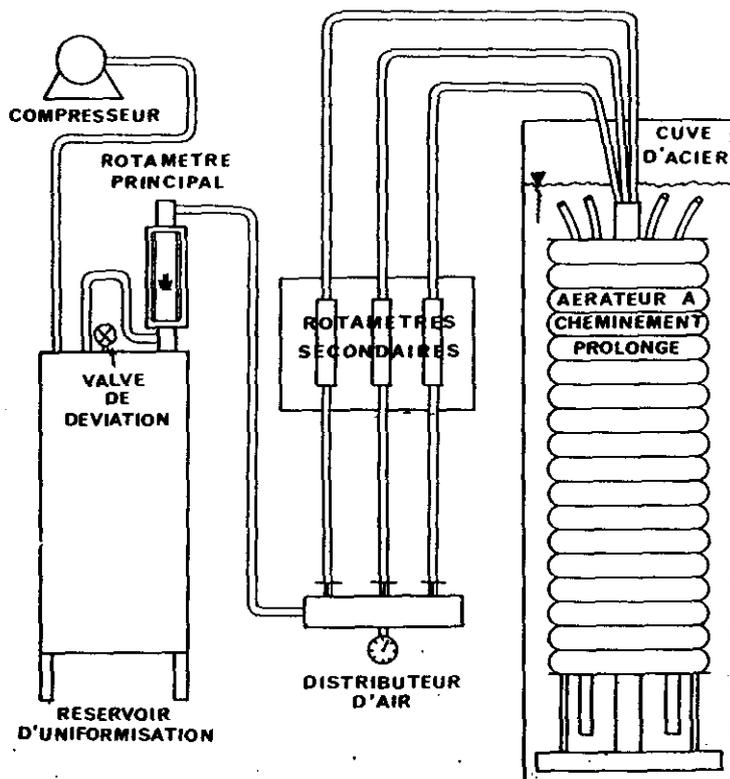


Figure 3.- Montage expérimental de l'aérateur à cheminement prolongé.

Figure 3.- Experimental set-up of the "extended contact" aerator.

L'installation de l'injecteur d'air de type poreux est identique, mais ne comporte ni le distributeur d'air ni le panneau qui porte les petits rotamètres. Le réseau de quatre unités de diffusion d'air est placé au fond de la cuve d'acier et alimenté en air par une conduite de plastique rigide qui remonte jusqu'à la partie supérieure de la cuve.

Evaluation des paramètres relatifs à la recirculation

Les trois paramètres relatifs à la recirculation (tableau 1) ne valent que pour l'aérateur à cheminement prolongé. Ils sont évalués, dans l'eau, avec des variations contrôlées du débit d'air total injecté. Deux modes de répartition, égale ou proportionnelle, du débit d'air total ont été étudiés. Dans le premier cas, le débit d'air total est réparti également entre les douze spirales de tuyau, tandis que dans le second cas, il est réparti de façon proportionnelle à la longueur de chaque spirale.

Tableau 1.- Paramètres de recirculation évalués pour l'aérateur à cheminement prolongé.

Table 1.- Evaluated recirculation parameters for the "extended contact" aerator.

NOM DU PARAMETRE	SYMBOLE	UNITÉS	MESURÉ	CALCULÉ
1. Débit liquide total de recirculation	Q_r	L/min	X	
2. Temps de passage du volume liquide total	T_p	h		X
3. Temps moyen de séjour interne et externe du liquide	T_s	h		X

Le seul paramètre directement mesuré est le débit liquide de recirculation (Q_r). La méthode employée consiste à percer le fond de récipients de plastique (capacité = 80 litres) pour y insérer l'extrémité supérieure des spirales afin de recueillir les volumes liquides recirculés dans les tuyaux dans un laps de temps donné. A l'aide de cette technique, des courbes du débit liquide de recirculation en fonction du débit d'air injecté sont établies pour chacune des douze spirales. A partir de ces courbes, on peut calculer le débit liquide total de recirculation pour différentes conditions d'opération (variation du débit d'air total et du mode de répartition de ce dernier).

A l'aide de ce paramètre et de mesures expérimentales du volume d'air enfermé dans les différentes spirales, trois autres paramètres reliés à la recirculation peuvent être calculés : temps de passage du volume liquide total, temps moyen de séjour interne et temps moyen de séjour externe. Le temps de passage du volume liquide total (T_p) correspond, en fait, à la durée d'un cycle pour un volume liquide total de 3 000 L ou encore au temps requis pour que le volume liquide total passe dans l'aérateur à cheminement prolongé. Le temps moyen de séjour interne (T_s in-

terne) est le temps de résidence moyen du liquide à l'intérieur des tuyaux, au cours d'un cycle. Le temps moyen de séjour externe (T_s externe) s'obtient en soustrayant le second paramètre du premier.

Evaluation des paramètres relatifs à l'oxygénation

Il existe huit paramètres relatifs à l'oxygénation (tableau 2) ; ils sont évalués dans l'eau, avec variation du débit d'air total injecté et ce, pour quatre cas précis :

- 1) l'injecteur d'air de type poreux ;
- 2) l'aérateur à cheminement prolongé avec une répartition égale du débit d'air total entre les douze spirales de tuyau ;
- 3) l'aérateur à cheminement prolongé avec une répartition du débit d'air total proportionnelle à la longueur de chaque spirale ;
- 4) un système hybride comportant l'aérateur à cheminement prolongé avec une répartition proportionnelle de l'air et un système poreux d'injection d'air à l'extérieur des tuyaux.

Tableau 2.- Paramètres d'oxygénation évalués pour différents systèmes d'aération.

Table 2.- Oxygenation parameters as evaluated for various aeration systems.

PARAMETRES	SYMBOLE	UNITÉS	MESURÉ	CALCULÉ
PHYSIQUES				
1. Coefficient de transfert d'oxygène	$K_L \cdot a$	h^{-1}	X	
2. Gonflement	GONF	%	X	
3. Capacité d'oxygénation standard	COS	kg O ₂ /h		X
4. Capacité d'oxygénation standard spécifique	COSS	kg O ₂ /h.m ³		X
5. Efficacité physique du transfert d'oxygène	ϵ	%		X
ENERGETIQUES				
6. Puissance injectée, nette et brute	P	kW		X
7. Puissance spécifique injectée, nette et brute	PS	kW/m ³		X
8. Efficacité énergétique de l'aération, nette et brute	E	kg O ₂ /kWh		X

Simulation théorique

Rappelons, à propos du système hybride, que l'installation décrite ci-dessus n'a pas été physiquement mise en place. Les résultats exposés plus loin sont le fruit d'un exercice (simulation théorique) réalisé en accord avec les hypothèses suivantes :

- 1) les deux systèmes d'aération (aérateur à cheminement prolongé et injecteur poreux) sont conjointement mis en place dans la cuve d'acier, l'injecteur poreux étant dans le fond de cette dernière et diffusant des bulles uniquement dans le volume liquide extérieur aux tuyaux de l'aérateur à cheminement prolongé ;
- 2) nous prenons toujours pour acquis que le débit d'air total injecté est réparti également entre les deux systèmes d'aération ;
- 3) nous considérons toujours que la moitié du débit d'air total qui est injectée dans l'aérateur à cheminement prolongé, l'est de façon proportionnelle à la longueur de chaque spirale ;
- 4) les performances d'oxygénation de ce système hybride sont calculées à partir des résultats expérimentaux obtenus séparément pour chacun des deux systèmes d'aération ;

Le coefficient de transfert d'oxygène ($K_L a$) est mesuré selon la méthode la plus reconnue et la plus utilisée, soit la méthode standard en régime transitoire (WPCF, 1971 ; MUNTEANU, 1972 ; PHILLIPS, 1972 ; LIU, 1973 ; LOEHR, 1977 ; STUKENBERG *et al.*, 1977 ; SNEATH, 1978 ; HÉDUI, 1980 ; MARTIN *et al.*, 1980 ; NAKANOH et YOSHIDA, 1980 ; Standard methods for the examination of water and wastewater, 1980). L'instrumentation utilisée consiste en un oxymètre de marque Yellow Spring Instruments (YSI, modèle No. 54 ARC) et une électrode à membrane submersible de même marque que l'oxymètre. La désoxygénation de l'eau est réalisée avec du sulfite de sodium (Na_2SO_3) et du chlorure de cobalt (CoCl_2) comme catalyseur ou, à l'occasion, avec de l'azote gazeux. Les valeurs de coefficients de transfert d'oxygène obtenues expérimentalement sont toutes ramenées, selon la procédure donnée par RAMALHO (1983), à des valeurs correspondant à une température de l'eau de 20 °C.

La capacité d'emprisonnement de l'air des systèmes d'aération est évaluée par la mesure du gonflement (GONF) du volume liquide. Il s'agit simplement de mesurer le déplacement du niveau de surface de l'eau par rapport au niveau statique prévalant avant le début de l'aération (MUNTEANU, 1972). Le gonflement peut s'exprimer en termes de volume d'air emprisonné ou en pourcentage du volume initial au repos.

La capacité d'oxygénation standard (COS) est calculée à partir du $K_L a_{20^\circ\text{C}}$ et du volume liquide aéré (LOEHR, 1977). La capacité d'oxygénation standard spécifique (COSS) est simplement la capacité d'oxygénation standard (COS) divisée par le volume liquide aéré.

L'efficacité physique du transfert d'oxygène (ϵ) est définie comme suit (WPCF, 1971 ; RAMALHO, 1983) :

$$\epsilon = \frac{\text{masse d'oxygène transférée/unité de temps}}{\text{masse d'oxygène fournie/unité de temps}} \times 100 \quad (1)$$

Le numérateur de l'équation (1) est, en fait, la capacité d'oxygénation standard (COS) et le dénominateur se calcule à partir des valeurs de débit d'alimentation en air.

La puissance (P) nette est calculée à l'aide des débits d'air et de la pression d'air. La puissance brute, qui représente la consommation

électrique, est calculée à partir de la puissance nette, en tenant compte des pertes énergétiques attribuables aux composantes mécaniques du système d'alimentation en air (compresseur, courroies et poulies, moteur électrique).

Les puissances spécifiques (PS) nette et brute sont les puissances nette et bruta divisées par le volume liquide aéré.

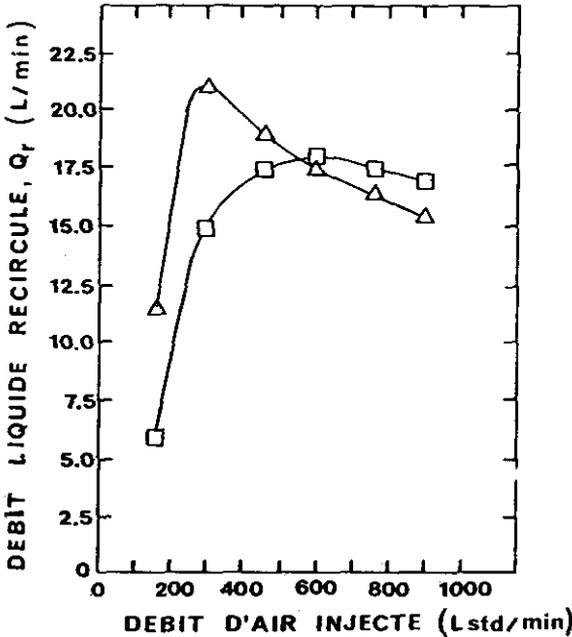


Figure 4.- Variation du débit liquide total recirculé (Q_r) en fonction du débit d'air total injecté et du mode de répartition de l'air pour l'aérateur à cheminement prolongé.

Figure 4.- Variation in total recirculated liquid output (Q_r) as a function of total injected air delivery and of the air distribution mode for the "extended contact" aerator.

□ : répartition proportionnelle ; Δ : répartition égale.

□ : proportional distribution ; Δ : even distribution.

emprisonnées dans des dizaines de mètres de tuyau, sans pouvoir opérer en mode continu. Les résultats exposés ci-dessous démontrent au moins que le système à cheminement prolongé n'est pas statique, mais dynamique, et qu'une optimisation du temps de contact entre le liquide et la paroi interne du tuyau est possible grâce à l'ajustement de deux variables d'opération indépendantes, soit le débit d'air total injecté et le mode de répartition de ce débit entre les douze spirales de tuyau.

Les efficacités énergétiques (E) nette et brute sont obtenues en faisant le quotient de la capacité d'oxygénation standard (COS) et des puissances nette et brute.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

A. Recirculation dans l'aérateur à cheminement prolongé

Cette partie de l'expérimentation nous est apparue comme un travail préliminaire essentiel en vue d'essais ultérieurs éventuels en milieu chargé et vivant. Selon nous, la présentation de résultats strictement relatifs à l'oxygénation serait peu valable dans le cas de l'aérateur à cheminement prolongé si l'on ne pouvait quantifier la circulation du liquide dans ce dernier. En effet, on peut se demander quel intérêt il y aurait de pouvoir mener un traitement aérobie à la limite et saturer en oxygène dissous quelques centaines de litres d'eau usée

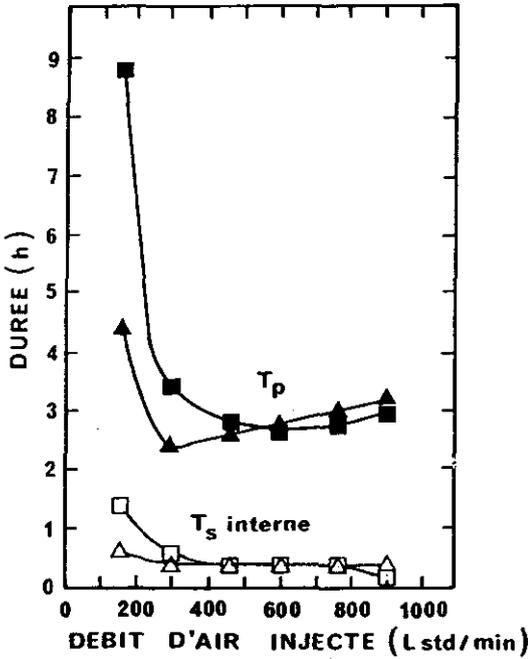


Figure 5.- Variation du temps de passage (T_p) du volume liquide total (3000 L) et de la durée moyenne du séjour interne (T_s interne) en fonction du débit d'air total injecté et du mode de répartition de l'air.

Figure 5.- Variation in crossing time (T_p) of total liquid volume (3000 L) and of mean internal residence time (T_s int.) as a function of total injected air delivery and of the air distribution mode.

□, ■ : répartition proportionnelle ; Δ, ▲ : répartition égale.
 □, ■ : proportional distribution ; Δ, ▲ : even distribution.

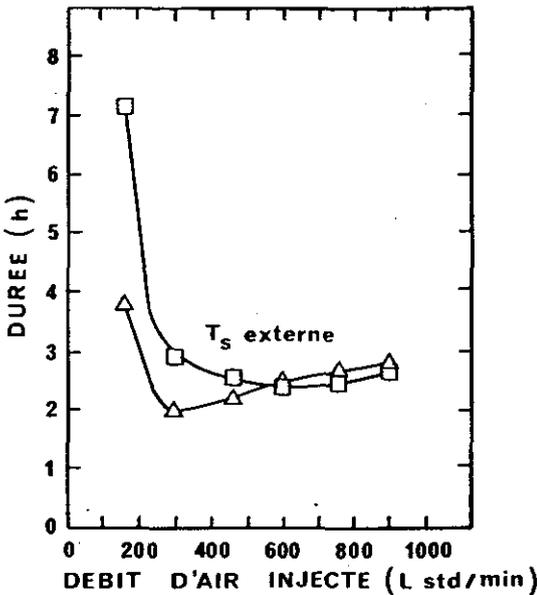


Figure 6.- Variation de la durée moyenne du séjour externe (T_s externe) du liquide en fonction du débit d'air total injecté et du mode de répartition de l'air.

Figure 6.- Variation in mean external residence time (T_s ext.) of the liquid phase as a function of total injected air delivery and of the air distribution mode.

□ : répartition proportionnelle ; Δ : répartition égale.
 □ : proportional distribution ; Δ : even distribution.

1 - Débit liquide total recirculé (Q_r)

En mode de répartition égale (figure 4), le débit liquide total recirculé (Q_r) atteint une valeur maximale d'environ 21 L/min et ce, à un débit d'air injecté de 300 litres d'air standard par minute (Lstd/min). Le mode de répartition proportionnelle, pour sa part, permet une recirculation maximale de liquide d'environ 18 L/min à un débit d'air injecté de 600 Lstd/min.

On observe également que le mode de répartition égale procure les meilleurs débits de recirculation dans la basse gamme de débits d'air (150-550 Lstd/min), alors que le mode de répartition proportionnelle offre des performances supérieures dans la haute gamme de débits d'air (550-900 Lstd/min).

2 - Temps de passage du volume liquide total (T_p)

Le temps de passage le plus court pour 3 000 litres est 2.4 h en mode de répartition égale avec un débit d'air total de 300 Lstd/min. Il correspond évidemment au débit liquide maximal de recirculation illustré à la figure 4. Le temps de passage le plus long est de 8.7 h et correspond à 150 Lstd/min en mode de répartition proportionnelle (figure 5).

3 - Durée de séjour (T_s)

La durée du séjour interne du liquide dans les tuyaux varie de 0.3 à 1.4 h (figure 5) et la durée du séjour externe, de 2 à 7.3 h (figure 6). Si l'on émet l'hypothèse que l'oxygène transféré dans un liquide fortement chargé comme le lisier de porc pourrait être rapidement utilisé par les micro-organismes, le liquide à l'extérieur des tuyaux serait en anaérobiose plus ou moins complète, ce qui n'est pas, à prime abord, intéressant. On peut cependant considérer le système comme alors équivalent à un système d'aération intermittent dont la phase de transfert d'oxygène serait très efficace. Dans ce contexte, l'aérateur à cheminement prolongé pourrait constituer un système de nitrification (phase aérobie) - dénitrification (phase anaérobie).

B. Performances d'oxygénation des différents systèmes

Les paramètres relatifs à l'oxygénation peuvent être classés en deux catégories, soit ceux liés à l'aspect physique du transfert d'oxygène (sections 1 à 5) et ceux qui ont trait à l'aspect énergétique (sections 6 à 8).

1 - Coefficient de transfert d'oxygène ($K_{L-a_{20^\circ C}}$)

La figure 7 illustre les comportements de l'aérateur à cheminement prolongé à l'intérieur des tuyaux en régime proportionnel, à l'intérieur des tuyaux en régime égal et à l'extérieur des tuyaux en régime proportionnel et de l'injecteur d'air de type poreux. Dans tous les cas, le coefficient de transfert d'oxygène augmente linéairement avec le débit d'air total injecté, avec une pente différente selon les cas, cependant.

Dans le cas de l'aérateur à cheminement prolongé, on remarque qu'à l'extérieur des tuyaux les coefficients sont faibles, la valeur la plus élevée étant de 5.5 h^{-1} à 900 Lstd/min. C'est cependant à l'intérieur

des tuyaux de l'aérateur à cheminement prolongé que sont notés les $K_L.a$ les plus élevés. En mode de répartition égale du débit d'air, le coefficient de transfert d'oxygène s'est chiffré à 215 h^{-1} à l'intérieur des tuyaux pour un débit d'air total de 900 Lstd/min . Dans les mêmes conditions, mais en régime proportionnel, une valeur moyenne de 230 h^{-1} a été atteinte, soit cinq fois plus que le maximum obtenu avec l'injecteur poreux (46 h^{-1}).

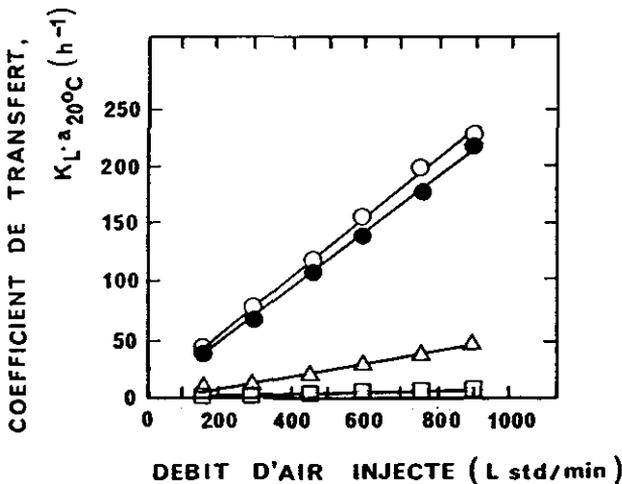


Figure 7.- Variation du coefficient de transfert d'oxygène ($K_L.a_{20^\circ C}$) en fonction du débit d'air total injecté à l'intérieur des tuyaux (○ : répartition proportionnelle ; ● : répartition égale), à l'extérieur des tuyaux (◻ : répartition proportionnelle) dans le cas de l'aérateur à cheminement prolongé et dans celui de l'injecteur poreux (Δ).

Figure 7.- Variation in oxygen transfer coefficient ($K_L.a_{20^\circ C}$) as a function of total injected air delivery inside the pipes (○ : proportional distribution ; ● : even distribution), outside the pipes (◻ : proportional distribution) for the "extended contact" aerator and for the porous injector (Δ).

Les résultats obtenus avec le cheminement prolongé se comparent bien aux données de la littérature. En effet, à l'échelle de laboratoire (18.3 L) et dans l'eau de robinet, c'est PHILLIPS (1972) qui a obtenu le meilleur $K_L.a$, soit 30 h^{-1} , avec une turbine de surface à rotation verticale. A l'échelle pilote (140 L), PROKOP *et al.* (1983) rapportent une valeur de 432 h^{-1} avec une buse spéciale dans une solution d'éthanol. A l'échelle industrielle et dans l'eau du robinet, STUKENBERG *et al.* (1977) n'ont pu faire mieux que 22.2 h^{-1} avec une turbine de surface à rotation horizontale. Le système de PROKOP *et al.* (1983) serait donc, du point de vue capacité d'oxygénation, le meilleur de tous. Il faut cependant se rappeler que la solution d'éthanol employée par ces auteurs peut invalider les comparaisons faites avec des essais réalisés dans l'eau.

Les résultats précédents obtenus avec l'aérateur à cheminement prolongé nous ont conduits à une autre démarche visant à le caractériser de façon globale en intégrant l'excellent transfert d'oxygène mesuré à l'intérieur des tuyaux et celui mesuré à l'extérieur des tuyaux. Ainsi, la figure 8 montre une courbe des valeurs globales pondérées de $K_L.a$ pour l'aérateur à cheminement prolongé en régime proportionnel.

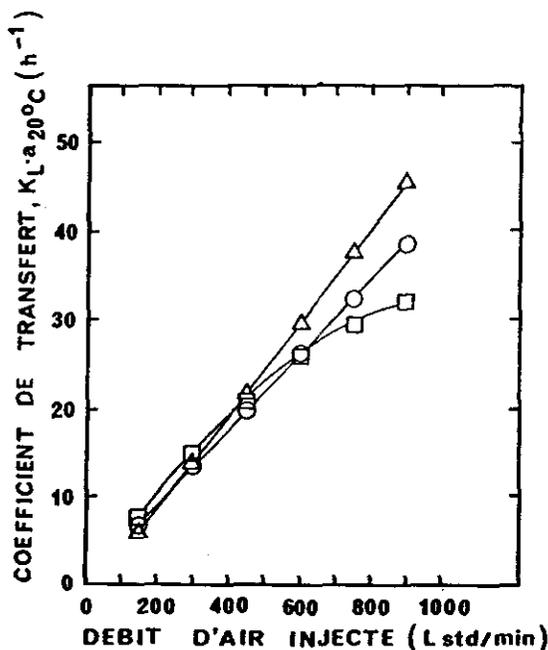


Figure 8.- Variation du coefficient global de transfert d'oxygène ($K_L.a_{20^\circ C}$) en fonction du débit d'air total injecté pour l'injecteur poreux (Δ), l'aérateur à cheminement prolongé (\square : répartition proportionnelle) et le système hybride (\circ : répartition proportionnelle).

Figure 8.- Variation in global oxygen transfer coefficient ($K_L.a_{20^\circ C}$) as a function of total injected air delivery for the porous injector (Δ), the "extended contact" aerator (\square : proportional distribution) and the hybrid system (\circ : proportional distribution).

On remarque donc, à la figure 8, que dans la basse gamme de débits d'air (150-500 Lstd/min) les trois dispositifs montrent des $K_L.a$ globaux semblables. Par contre, dans la haute gamme de débits d'air (500-900 Lstd/min), l'injecteur d'air de type poreux est supérieur à l'aérateur à cheminement prolongé seul et au système hybride. Ce résultat s'explique par le fait que le volume interne des tuyaux occupé par le liquide aux débits d'air élevés devient relativement faible, d'où un ralentissement de l'accroissement du $K_L.a$ global, puisque ce dernier est calculé en tenant compte des volumes liquides aérés.

2 - Volume d'air emprisonné et gonflement (GONF)

L'aérateur à cheminement prolongé s'est révélé un dispositif efficace pour emprisonner l'air dans le milieu liquide. La figure 9 montre en effet qu'à un débit d'air de 900 Lstd/min, il retient jusqu'à 546 litres d'air pour un volume liquide total, au repos, de 2775 litres. L'injecteur d'air de type poreux, pour le même débit d'air, voit sa capacité d'emprisonnement plafonner à 100 litres d'air. Le comportement du système hybride, avec répartition égale du débit de 900 Lstd/min, se rapproche davantage de celui de l'aérateur à cheminement prolongé. Il montre un volume d'air emprisonné maximal de 407 litres.

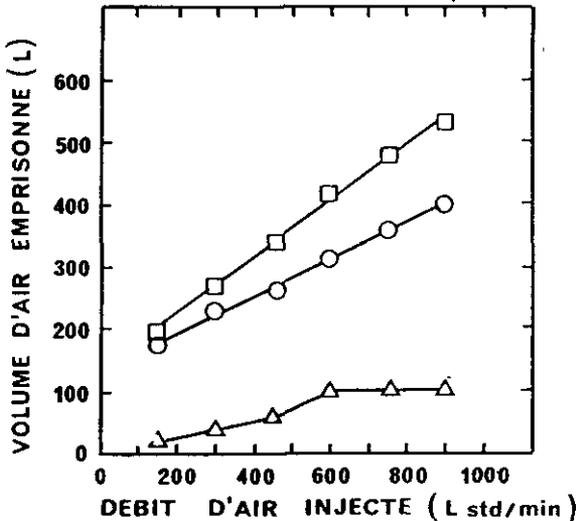


Figure 9.- Variation du volume d'air emprisonné dans la cuve en fonction de débit d'air total injecté dans l'injecteur poreux (Δ : volume liquide total, 2750 L), l'aérateur à cheminement prolongé (\square) opéré en régime proportionnel (volume liquide total, 2775 L) et le système hybride (\circ) avec un volume liquide total de 3000 L.

Figure 9.- Variation in the volume of entrapped air in the tank as a function of total injected air delivery for the porous injector (Δ : total liquid volume, 2750 L), the "extended contact" aerator (\square) operated under the proportional distribution mode (total liquid volume, 2775 L) and the hybrid system (\circ) with a total liquid volume of 3000 L.

capacités d'oxygénation standard totales en fonction du débit d'air injecté pour l'injecteur de type poreux, le système hybride et l'aérateur à cheminement prolongé avec répartition proportionnelle du débit d'air. On constate que l'allure des courbes est effectivement semblable à celle des courbes de la figure 8.

Les valeurs de capacité d'oxygénation varient de 0.15 kg O₂/h à 1.16 kg O₂/h selon le débit d'air injecté et le système d'aération employé. Ces deux valeurs extrêmes ont été obtenues avec l'injecteur d'air de type poreux. Il convient de souligner que ces valeurs correspondent aux conditions standard qui sont des conditions idéales que l'on ne retrouve pas lors de l'aération des eaux usées ou du fumier liquide, par exemple. Il faut donc retenir qu'en conditions réelles, les capacités d'oxygénation seraient inférieures aux valeurs standard rapportées à la figure 10.

Le pourcentage de gonflement est une façon adimensionnelle de présenter la capacité d'emprisonnement de l'air. Sous cette forme, les valeurs citées ci-dessus correspondent respectivement à des gonflements de 19.7 %, 3.7 % et 13.6 %.

A l'échelle du laboratoire, ROBINSON et FENLON (1975) rapportent un gonflement de 26.4 % avec une turbine submergée dans un volume de 12.6 L de lisier de porc. A l'échelle pilote (140 L), PROKOP *et al.* (1983) ont obtenu 23 %. On ne trouve pas mention de ce paramètre pour l'échelle industrielle dans la littérature. Compte tenu des échelles respectives, l'aérateur à cheminement prolongé se compare donc assez bien à ces deux systèmes.

3 - Capacité d'oxygénation standard (COS)

La capacité d'oxygénation standard est étroitement reliée au coefficient de transfert d'oxygène. La figure 10 montre les

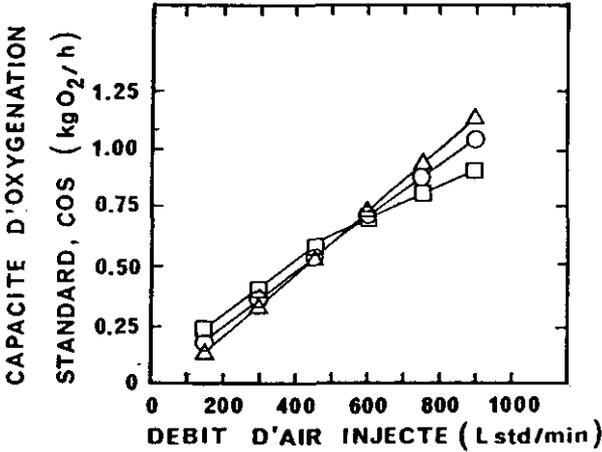


Figure 10.- Variation de la capacité d'oxygénation standard (COS) en fonction du débit d'air total injecté dans les différents systèmes d'aération (Δ : injecteur poreux ; \square : cheminement prolongé, répartition proportionnelle ; \circ : système hybride).

Figure 10.- Variation in standard oxygenation capacity (COS) as a function of total injected air delivery for the various aeration systems (Δ : porous injector ; \square : "extended contact", proportional distribution ; \circ : hybrid system).

de l'eau usée domestique et par PROKOP *et al.* (1983) dans une solution d'éthanol, soit 2.89 kg O₂/h.m³ et 3.97 kg O₂/h.m³ respectivement.

5 - Efficacité physique du transfert d'oxygène (ϵ)

On remarque (figure 11) que l'aérateur à cheminement prolongé est plus efficace aux faibles débits d'air et que le mode de répartition égale est un peu moins efficace que le mode de répartition proportionnelle.

D'autre part, l'injecteur d'air de type poreux montre un comportement opposé à celui de l'aérateur à cheminement prolongé. En effet, les plus faibles efficacités de l'injecteur poreux sont obtenues aux faibles débits d'air et les plus fortes dans la haute gamme de débits d'air.

Les comportements opposés des deux systèmes expliquent l'allure stable de la courbe du système hybride. L'efficacité de ce dernier oscille entre 7.14 % et 7.54 % dans la gamme de débits d'air étudiée. Finalement, il est intéressant de remarquer qu'à un débit d'air de 450 Lstd/min, le système hybride est légèrement plus efficace que les deux autres systèmes.

4 - Capacité d'oxygénation standard spécifique (COSS)

Ce paramètre étant directement proportionnel au coefficient de transfert d'oxygène, sa mise en graphique apporterait peu d'éléments nouveaux. Nous nous contentons ici de citer les meilleures valeurs numériques obtenues, en vue d'une comparaison, avec la littérature.

Au débit maximum d'aération de 900 Lstd/min, l'injecteur d'air de type poreux a atteint 0.42 kg O₂/h.m³ contre 0.29 kg O₂/h.m³ pour l'aérateur à cheminement prolongé (valeur globale) et 0.36 kg O₂/h.m³ pour le système hybride. A l'intérieur des tuyaux de l'aérateur à cheminement prolongé, une valeur de 2.12 kg O₂/h.m³ a été obtenue en régime proportionnel. Cette valeur se rapproche de celles obtenues par Eco-Recherche (1978) dans

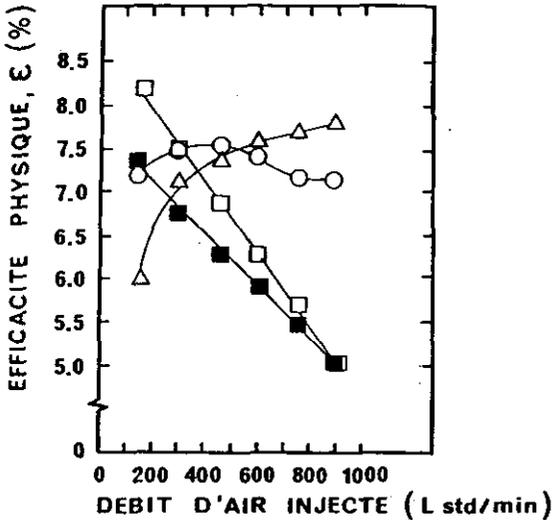


Figure 11.- Variation de l'efficacité physique du transfert d'oxygène (ϵ) en fonction du débit d'air total injecté dans le cas de l'injecteur poreux (Δ), l'aérateur à cheminement prolongé opéré en modes de répartition égale (\blacksquare) et proportionnelle (\square) et du système hybride (\circ).

Figure 11.- Variation in physical efficiency of oxygen transfer (ϵ) as a function of total injected air delivery for the porous injector (Δ), the "extended contact" aerator operated under the even (\blacksquare) or proportional (\square) distribution modes and under the hybrid system (\circ).

tèmes d'aération étudiés est du même ordre de grandeur (figure 12). Il existe néanmoins, pour les deux familles de courbes (puissances nettes et brutes), des nuances qui méritent mention.

Par exemple, à de faibles débits d'air, l'injecteur poreux est plus énergivore que l'aérateur à cheminement prolongé. Par contre, dans la haute gamme de débits d'air, c'est ce dernier qui consomme plus d'énergie.

Avec une division du débit d'air total en deux fractions, égales entre chacune des composantes du système hybride, celui-ci, quant à lui, requiert des puissances intermédiaires dans la basse gamme de débits d'air, mais se révèle moins énergivore que ses deux composantes prises de façon individuelle, à des débits d'air plus élevés. Ceci est attribuable au fait que, dans le cas du système hybride, le débit d'air total est divisé également en deux débits partiels parallèles, ce qui résulte en des pertes de charge, dans le circuit d'aération, inférieures à celles que l'on obtient lorsque le débit d'air total est canalisé au complet dans un seul système d'aération.

Pour ce paramètre, les meilleures performances à l'échelle de laboratoire et à l'échelle pilote relevées dans la littérature sont comparables. Dans le premier cas, GARRAWAY (1982) rapporte 17.4 % avec une turbine de surface à rotation horizontale dans 20 litres de lisier de porc et, dans le second, MUNTEANU (1972) obtient 18.1 % avec une colonne à bulles de 150 litres d'eau de robinet. Par contre, à l'échelle industrielle, quelques auteurs (CUMMINGS et JEWELL, 1977 ; LOEHR, 1977 ; RAMALHO, 1983) citent des valeurs supérieures à ces dernières. Entre autres, TRAN et GANNON (1981) mentionnent que le "puits profond" atteint une efficacité de 90 % dans de l'eau usée domestique.

6 - Puissance (P)

La puissance consommée par les trois sys-

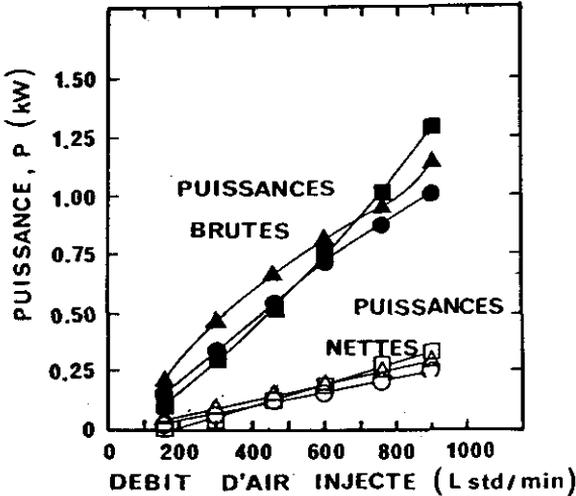


Figure 12.- Variation des puissances (P) nettes (Δ : injecteur poreux ; \square : cheminement prolongé ; \circ : système hybride) et brutes (Δ : injecteur poreux ; \square : cheminement prolongé ; \bullet : système hybride) en fonction du débit d'air total injecté et du type d'aérateur employé.

Figure 12.- Variation in net power (Δ : porous injector ; \square : "extended contact" ; \circ : hybrid system) and in gross power (Δ : porous injector ; \square : "extended contact" ; \bullet : hybrid system) as a function of total injected air delivery and of the type of aerator used.

ces spécifiques, soit 4 W/m^3 (valeur nette) et 7 W/m^3 (valeur brute). Ils ont, par contre, obtenu des performances d'oxygénation également faibles. L'aérateur à "jet plongeant" de SNEATH (1978) a, pour sa part, consommé une puissance spécifique nette de 34 W/m^3 , tout en offrant des performances d'oxygénation intéressantes.

A l'échelle industrielle, les injecteurs de type poreux de VANSTAEN *et al.* (1979) n'ont consommé que 13 W/m^3 (valeur nette) dans un bassin de 250 m^3 . RAMALHO (1983) indique des puissances spécifiques nette et brute de 10.6 W/m^3 et 13.2 W/m^3 respectivement et ce, pour des turbines de surface à rotation horizontale dans un bassin de 568 mètres cubes. MCKINNEY et BENJES (1965) de même que RAMALHO (1983) rapportent des valeurs de 5 W/m^3 pour les lagunes aérées.

En résumé, on constate que les systèmes d'aération à l'échelle de laboratoire consomment beaucoup d'énergie par rapport au volume liquide traité. Les systèmes à l'échelle pilote et industrielle montrent une dépense énergétique beaucoup plus intéressante, ce qui est aussi le cas de l'aérateur à cheminement prolongé.

7 - Puissance spécifique (PS)

La mise en graphique de ce paramètre fournirait des courbes d'allure identique à celle de la figure 12. Nous nous contentons donc de citer les valeurs moyennes obtenues pour les trois systèmes d'aération étudiés.

L'injecteur de type poreux est celui qui requiert les puissances spécifiques moyennes les plus élevées avec 62 W/m^3 (nette) et 256 W/m^3 (brute). Suit l'aérateur à cheminement prolongé avec 55 W/m^3 (nette) et 221 W/m^3 (brute). Finalement, le système hybride est le moins énergivore avec 47 W/m^3 (nette) et 200 W/m^3 (brute).

A l'échelle de laboratoire, les systèmes d'aération se révèlent peu efficaces. GARRAWAY (1982) a employé les plus faibles puissances spécifiques. Sa turbine de surface à rotation horizontale a montré une consommation nette de 500 W/m^3 et une consommation brute de $1\,250 \text{ W/m}^3$.

A l'échelle pilote, HUMENIK *et al.* (1975) rapportent de faibles puissances

8 - Efficacité énergétique (E)

A notre avis, ce paramètre est le plus important et le plus significatif quant à l'évaluation des systèmes d'aération parce qu'il tient compte à la fois de la capacité d'oxygénation du système et de sa consommation d'énergie. L'efficacité énergétique permet donc d'étudier l'optimisation technicoéconomique des systèmes d'aération.

On note (figure 13) que, dans la basse gamme de débits d'air, l'aérateur à cheminement prolongé est nettement le plus efficace avec des valeurs nette et brute respectives de 9.2 et 1.9 kg O₂/kWh pour un débit

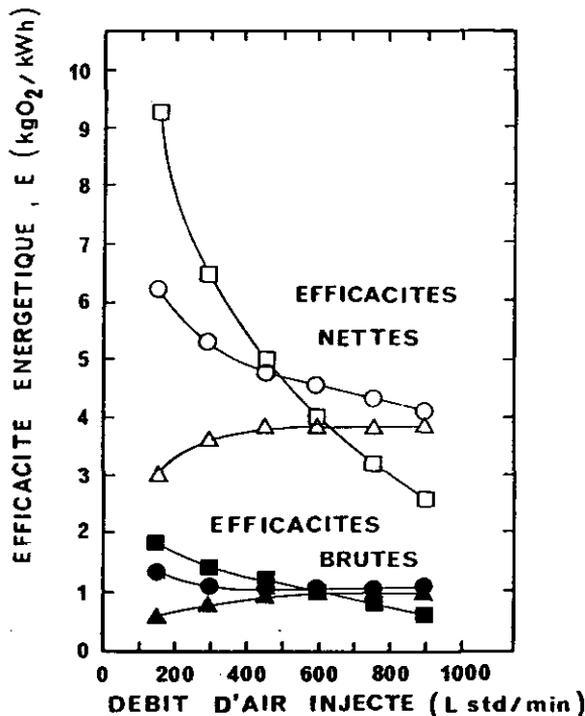


Figure 13.- Variation des efficacités énergétiques (E) nettes (Δ : injecteur poreux ; □ : cheminement prolongé ; ○ : système hybride) et brutes (▲ : injecteur poreux ; ■ : cheminement prolongé ; ● : système hybride) en fonction du débit d'air total injecté et du type d'aérateur employé.

Figure 13.- Variation in net (Δ : porous injector ; □ : "extended contact" ; ○ : hybrid system) and gross (▲ : porous injector ; ■ : "extended contact" ; ● : hybrid system) energy efficiencies as a function of total injected air delivery and of the type of aerator used.

(E_{nette} = 6.1 kg O₂/kWh), ces deux derniers ayant réalisé leurs essais dans de l'eau du robinet.

d'air de 150 Lstd/min. A des débits d'air moyens (500-600 Lstd/min), l'efficacité des trois systèmes d'aération est comparable. Finalement, dans la haute gamme de débits d'air, le système hybride est légèrement plus efficace que l'injecteur de type poreux, tandis que l'aérateur à cheminement prolongé est nettement moins efficace que les deux autres.

Les systèmes d'aération à l'échelle de laboratoire se révèlent peu efficaces du point de vue énergétique. Les résultats les plus intéressants ont été obtenus par GARRAWAY (1982) dans le lisier de porc avec 0.22 kg O₂/kWh comme efficacité énergétique nette et 0.09 kg O₂/kWh comme valeur brute.

Certains systèmes à l'échelle pilote se sont montrés particulièrement efficaces. Citons PROKOP *et al.* (1983) avec une buse spéciale dans une solution d'éthanol (11.6 kg O₂/kWh), SNEATH (1978) avec un aérateur à "jet plongeant"

(E_{nette} = 8.2 kg O₂/kWh) et MUNTEANU (1972) avec une colonne à bulles

A l'échelle industrielle, c'est l'aérateur de type puits profond qui démontre la meilleure valeur d'efficacité énergétique, soit 5.5 kg O₂/kWh (HEMMING, 1979). Les informations données par cet auteur, tout comme dans le cas de PROKOP *et al.* (1983), ne nous permettent malheureusement pas de préciser si les valeurs rapportées sont des efficacités énergétiques nettes ou brutes.

L'aérateur à cheminement prolongé se révèle donc concurrentiel par rapport aux meilleures performances d'efficacité énergétique relevées dans la littérature.

CONCLUSION

Les résultats obtenus ont permis de bien cerner le fonctionnement et les caractéristiques d'aération d'un prototype pilote d'aérateur à cheminement prolongé. Les performances d'oxygénation du prototype ont pu également être comparées avec celles d'un aérateur plus conventionnel et celles relevées dans la littérature.

Suite à ces travaux, les aspects positifs de l'aérateur à cheminement prolongé sont :

- 1) très bons coefficients de transfert d'oxygène à l'intérieur des tuyaux ;
- 2) forte capacité d'emprisonnement de l'air ;
- 3) bonne efficacité énergétique dans la basse gamme de débits d'air.

Par contre, le prototype utilisé présente des performances d'oxygénation globales similaires à celles démontrées par l'injecteur d'air de type poreux. Ceci est attribuable au fait que le volume interne des tuyaux ne représente que 26 % du volume liquide total.

Le volume intérieur des tuyaux présentant de l'intérêt quant au transfert d'oxygène, l'optimisation du principe d'aération à cheminement prolongé passe donc par l'accroissement maximal du volume interne des tuyaux par rapport au volume liquide total. En fait, il est possible de concevoir un système dans lequel le traitement se ferait uniquement à l'intérieur des tuyaux, soit une situation où le volume interne représenterait pratiquement 100 % du volume liquide total (BENOIT, 1985). Cette modification devrait se traduire par une amélioration des performances d'oxygénation, notamment :

- 1) augmentation de la capacité d'oxygénation totale due à un meilleur coefficient global de transfert d'oxygène ($K_L \cdot a$) ;
- 2) augmentation de l'efficacité physique du transfert d'oxygène (ϵ) avec la longueur des tuyaux (en théorie, ϵ pourrait atteindre 100 %) ;
- 3) diminution des puissances spécifiques injectées (PS) ;
- 4) augmentation de l'efficacité énergétique du transfert d'oxygène (E).

Considéré dans cette optique et dans la perspective du traitement aérobie d'effluents hautement chargés tels que le lisier de porc, l'aérateur à cheminement prolongé apparaît comme une technique d'aération prometteuse qu'il reste cependant à évaluer en conditions réelles. Nous admettons que la valeur et l'intérêt des résultats présentés seraient

rehaussés par l'acquisition de données expérimentales avec un substrat fortement chargé. Nous sommes conscients du fait que le travail accompli jusqu'à présent caractérise le nouveau prototype comme aérateur mais non comme bioréacteur.

Dès que les circonstances le permettront, nous comptons poursuivre l'étude de ce système avec un effluent chargé à traiter.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Fonds FCAR (EQ-1211) et le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (thématique-biotechnologies) pour leur appui financier, le Professeur Jacques CHOINIÈRE pour son support constant, ses conseils et suggestions, le Professeur Denis DÉSILETS pour ses commentaires judicieux, le Dr. Fernand BENOIT qui nous a communiqué l'idée originale du nouveau principe d'aération à cheminement prolongé, nous a fait don de matériel et aimablement prêté des équipements tout en témoignant un intérêt soutenu et, finalement, Mme Deirdre EIDHIN pour la rédaction du résumé anglais.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BENOIT F. (1985). Projet de recherche en cours au Collège MacDonald de L'Université McGill, Ste-Anne-de-Bellevue, Québec.
- CUMMINGS R.J., JEWELL W.J. (1977). Thermophilic aerobic digestion of dairy waste. Food, fertilizer and agricultural residues ; *Proceedings of the Cornell agricultural waste management conference*, 637-657.
- DAIGLE A., COURNOYER M. (1985). Conception de l'usine pilote à la ferme de traitement et de valorisation du lisier de porc. *Premier colloque sur la recherche et le développement en traitement et valorisation du fumier au Québec : textes des conférences*, rapport n° RD-2, Environdoq 850671, Ministère de l'Environnement du Québec, 171-185.
- DOYLE Y. (1985). Traitement aérobie du lisier de porc : aspects physico-chimiques et microbiens. *Thèse de maîtrise*, Département de biologie, Université Laval, Québec, 98 p..
- ECO-RECHERCHE (1978). Deep shaft effluent treatment process. Brochure technique publicitaire, 8 p..
- FENLON D.R., MILLS P.J. (1980). On farm aerobic treatment of piggery waste. The effect of residence time and storage on effluent quality. *Water Res.*, 14(7): 805-808.
- FENLON D.R., ROBINSON K. (1977). Denitrification of aerobically stabilised pig waste. *Water Res.*, 11(3): 269-273.
- GARRAWAY J.L. (1982). Investigations on the aerobic treatment of pig slurry. *Agric. Wastes*, 4: 131-142.
- GINNIVAN M.J. (1983). The effects of aeration rates on odour and solids of pig slurry. *Agric. Wastes*, 7: 197-207.
- HASHIMOTO A.G., CHEN Y.R. (1976). Design criteria for turbine-air aeration of poultry wastes. *Trans. ASAE*, 19: 1181-1186.
- HÉDUIT A. (1980). Transfer of oxygen in piggery wastes. Rapport No. EUR-6633, Commission of the European Communities, 481-495.
- HEMMING M.L. (1979). General biological aspects of wastewater treatment including the deep shaft process. *Wat. Poll. Control*, 78: 312-325.
- HUMENIK F.J., OVERCASH M.R., MILLER T. (1975). Surface aeration : design and performance for lagoons. Managing livestock wastes, *Proceeding of the 3rd international symposium on livestock wastes*, ASAE, St-Joseph, Michigan, 568-571.

- LIU M.S. (1973). Oxygen transfer in a fermenter. *Thèse de doctorat*, Département de génie chimique, Université de la Colombie-Britannique (U.B.C.), 258 pp.
- LOEHR R.C. (1977). *Pollution control for agriculture*. Academic Press Inc., New-York, N.Y. 383 p..
- MARTIN J.H., LOEHR R.C., CUMMINGS R.J. (1980). The oxidation ditch-as a dairy waste management alternative. Livestock waste : a renewable resource. *Proceedings of the 4th international symposium on livestock wastes*, ASAE, St-Joseph, Michigan, 346-349.
- McKINNEY R.E., BENJES H.B. (1965). Evaluation of two aerated lagoons. *J. Sanit. Eng. Div., Am. Soc. Civ. Eng.*, 91, SA6, 43-56.
- MUNTEANU A.G. (1972). Evaluation théorique du taux d'oxygénation de l'eau par aération avec bulles d'air. *Thèse de maîtrise*, Ecole Polytechnique, Département de génie civil, Université de Montréal, 280 p..
- NAKANOH M., YOSHIDA F. (1980). Gas absorption by newtonian and non-newtonian liquids in a bubble column. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 19(1): 190-195.
- PHILLIPS P.A. (1972). Short-term aeration of swine manure. *Thèse de maîtrise*, Department of Agricultural Engineering, Université McGill, Montréal, 117 p..
- PROKOP A., JANIK P., SOBOTKA M., KRUMPHANZL V. (1983). Hydrodynamics, mass transfer and yeast culture performance of a column bioreactor with ejector. *Biotechnol., Bioeng.*, 25(10): 1147-1160.
- RAMALHO R.S. (1983). *Introduction to wastewater treatment processes*. Academic Press Inc., New-York, N.Y. 2^e édition, 580 p..
- ROBINSON K., FENLON D. (1975). Biologically-controlled loading of aerobic stabilization plants. Managing livestock wastes. *Proceedings of the 3rd international symposium on livestock wastes*. ASAE, St-Joseph, Michigan, 560-563.
- SNEATH R.W. (1978). The performance of a plunging jet aerator and aerobic treatment of pig slurry. *Water Pollut. Control*, 77(3): 408-420.
- STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER. (1980). 15^e édition, American Public Health Association, Yearbook Publ., Chicago, Illinois, 1193 p..
- STUKENBERG J.R., WAHBEH V.N., McKINNEY R.E. (1977). Experiences in evaluating and specifying aeration equipment. *J. WPCF*, 49(1): 66-82.
- TRAN P., GANNON D. (1981). Deep shaft high rate aerobic digestion : laboratory and pilot plant performance. *Water Pollut. Res. J. Can.*, 16: 71-89.
- VANSTAEN H., NEUKERMANS G., DEBRUYCKERE M., VERSTRAETE W. (1979). Complete aerobic treatment of piggery wastewaters by the acidic sludge separation process. Engineering problems with effluents from livestock, Rapport No EUR-6249, Commission of the European Communities, 273-286.
- VASSEUR J., LAIGNEAU E. (1975). Désodorisation du lisier - Etude comparative de trois méthodes de stockage aéré. *Publication du CNEEMA*, Etude No 403, 59 p..
- WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION. (1971). *Aeration in wastewater treatment-manual of practice No. 5*. Washington, D.C., 89 p..