

« CAS D'UNE POLLUTION : L'EUTROPHISATION DANS LES COURS D'EAU »

M. GAFSI¹ & A. KETTAB² & S. BENMAMAR² & S. BENZIADA²

(1) Université Ammar Telidji de Laghouat,
Email : m.gafsi@mail.lagh-univ.dz

(2) Laboratoire de recherches en Sciences de l'eau : LRS-EAU/ENP
Ecole Nationale Polytechnique, El Harrach, Avenue Hassen Badi, Alger,
Email: lrs-eau@netcourrier.com

Résumé

La nécessité de préserver la qualité des eaux superficielles est aujourd'hui reconnue et devient de plus en plus pressante. Les grands lacs constituent des réserves d'eau douces dans lesquelles l'humanité puise de plus en plus et peuvent être aussi de puissants centres d'intérêt touristiques et piscicoles capables de stimuler les économies régionales. A l'inverse de la pollution organique dont les effets se manifestent immédiatement dans la réserve, l'eutrophisation est un phénomène qui apparaît lentement. L'eutrophisation est une véritable pollution nutritionnelle qui résulte d'apport excessif dans les eaux des réserves d'éléments fertilisants provenant des activités humaines.

Les moyens de lutte ou de prévention contre l'eutrophisation sont nombreuses (chimiques, biologiques, mécaniques,...). Vu le coût excessif et le rendement relativement faible de quelque unes d'entre elles, le processus d'aération dynamique est un des moyen les plus prometteurs.

Le processus d'aération mécanique regroupe deux grandes catégories : la déstratification artificielle et l'aération hypolimnétique. Dans le premier cas, le lac entier est mélangé par la libération de l'air comprimé à partir des tubulures le long du fond du lac, tan disque le deuxième, l'objectif est d'oxygéner seulement l'hypolimnion tout en préservant la stratification thermique. La méthode la plus simple est la déstratification artificielle où l'air comprimé est introduit à travers des diffuseurs localisés au fond du lac. L'aération hypolimnétique est une stratégie utilisée pour maintenir un milieu aérobie dans l'hypolimnion tout en préservant la stratification thermique. La méthode la plus simple est la déstratification artificielle où l'air comprimé est introduit à travers des diffuseurs localisés au fond du lac.

Sur la base de ces recherches, l'étude présentée ici fait un état de synthèse sur un nombre d'issues liées à l'aération dans les lacs et réservoirs, incluant les avantages et les inconvénients de ces systèmes d'aération.

Mots clés : Eutrophisation – Aération – Déstratification - Aération hypolimnétique.

1. Introduction

Les problèmes des qualités des eaux sont reliés à la réduction dans le contenu de l'oxygène dissous de l'eau, particulièrement dans les couches basses (Davis, 1980 et Gafsi et al, 2004b), ces dernières peuvent se dégrader significativement, si l'oxygène dissous utilisé par les processus biochimiques n'est pas réapprovisionner par l'aération de la surface ou la photosynthèse (Zic et al, 1992 et Gafsi et al, 2005). Le contenu d'oxygène dissous de l'eau est l'une des mesures de la qualité de l'eau (Davis, 1980 et Kettab et al, 2005).

La stratification thermique des lacs et réservoirs peut résulter largement à une perte d'oxygène de l'hypolimnion, lequel peut avoir des impacts négatifs sur l'eau froide des poissons, l'eau d'alimentation et la qualité de l'eau à l'aval (McGinnis et al, 1998 ; McGinnis et al, 2001 ; Gafsi et al, 2004a ; Gafsi et al, 2004b). Aussi, ce déficit d'oxygène est causé par la glace couvrant la surface de l'eau pendant les saisons froides ; cette couverture de la glace empêche le transfert de l'oxygène à l'interface air eau, et par conséquent provoque la mort des poissons. Une concentration minimale de l'oxygène dissous (DO) de 2 à 2.5 mg/l est souhaitée pour éviter la mort des poissons. En pratique, une concentration de l'oxygène dissous de 3 mg/l est désirée (Stefan et al, 2000 et Gafsi et al, 2005 et Kettab et al, 2005 et Kettab et al, 2006).

La restauration des lacs doit améliorer le niveau d'oxygène hypolimnétique et de limiter le recyclage du phosphore à partir des sédiments dans l'eau du lac (Wuest et al, 1992 Gafsi et al, 2004a et Gafsi et al, 2004b et Kettab et al, 2005).

Les techniques utilisées pour résoudre l'état anaérobie des lacs peuvent être groupées en deux grandes catégories : la déstratification artificielle et l'aération hypolimnétique (McGinnis et al, 2001). Dans le premier cas, le lac entier est mélangé par la libération de l'air comprimé à partir des tubulures le long du fond du lac, tandis que le deuxième, l'objectif est d'oxygéner seulement l'hypolimnion tout en préservant la stratification thermique (Fast et al, 1973, Gafsi et al, 200a et Gafsi et al, 2004b)

2. Systèmes d'aération

a. L'aération par le système de déstratification

L'aération par déstratification est premièrement exposée par Scott et Foley en 1919, cette technique est plus fréquemment achevée par injection de l'air à travers un seul diffuseur d'air, lié à un compresseur d'air à la partie la plus haute du lac localisé (Fig.1) (Fast, 1978 et Gafsi et al, 2004a et Gafsi et al, 2004b et Kettab et al, 2005).

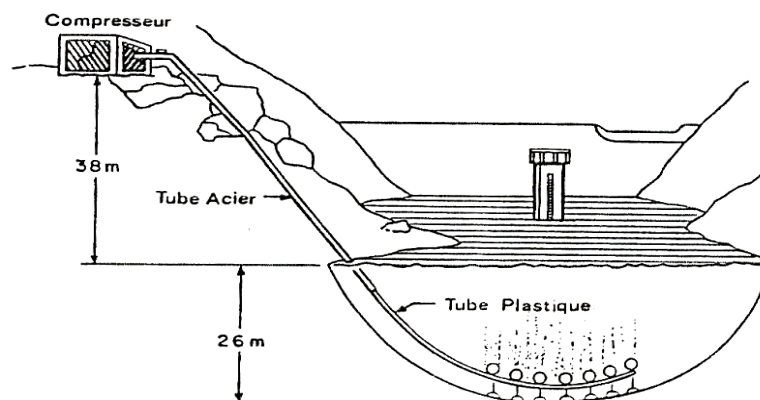


Figure 1 : Système de déstratification d'un lac (Fast, 1978).

En plus de l'injection de l'air, d'autres techniques incluant le pompage de l'eau du fond du lac à la surface, et le pompage de l'eau de surface au fond du lac (Fast, 1978 et Gafsi et al, 2004a et Gafsi et al, 2004b et Kettab et al, 2005).

b. L'aération hypolimnétique

La pratique de l'aération hypolimnétique est dirigée à introduire de l'oxygène seulement dans l'hypolimnion sans distribution du gradient de température.

* Trois mécanismes principaux sont utilisés pour l'aération hypolimnétique (Figure 2) (McGinnis et al, 1997 et Gafsi et al, 2005 et Kettab et al, 2005 et Gafsi et al, 2007).

- L'aérateur d'élévation d'air (air lift) (Figure 2-a).
- Les bulles plumes (Figure 2-b).
- Le Speece Cône (Figure 2-c).

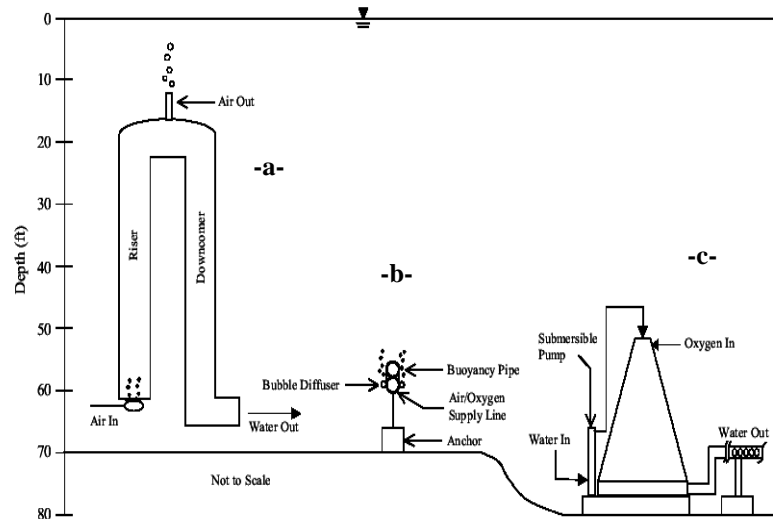


Figure 2 : Représentation des trois mécanismes d'aération hypolimnétiques (McGinnis et al, 1997).

Typiquement, l'oxygène pur est utilisé dans le Speece Cône, l'air est utilisé dans les aérateurs d'élévation d'air (air lift), et les bulles plumes utilisent l'oxygène ou l'air (McGinnis et al, 1997 et McGinnis et al, 2001 et Gafsi et al, 2005 et Kettab et al, 2005). L'oxygène pur est utilisé pour l'oxygénation hypolimnétique pour empêcher l'accumulation des molécules d'azote, lesquelles peuvent être toxique aux poissons (Wuest et al, 1992 et Gafsi et al, 2005 et Kettab et al, 2005). Alors que l'aération avec l'air augmente la turbulence dans l'hypolimnion, qui par conséquent augmente la demande d'oxygène des sédiments, ou qui peut résulter à une déstratification accidentelle (Beutel, 2002 ; Gafsi et al, 2005 et Kettab et al, 2005).

Dans tous les trois mécanismes d'oxygénations, les bulles de gaz en contact avec l'eau facilitent le transfert inter facial de l'oxygène, aussi bien que l'azote et d'autres gaz solubles (McGinnis et al, 2001 ; Gafsi et al, 2005 et Kettab et al, 2005).

c. Effets comparés des systèmes d'aération

i. *Effets comparés des systèmes d'aération hypolimnétiques*

Sur la base d'une étude faite dans lac Standley (en Colorado : USA), McGinnis et Little (1997), ont révélé une analyse technique et économique de ces trois systèmes d'aération (Fig. 2) pour sélectionner le mécanisme le plus approprié pour un lac spécifique ou réservoir et ainsi optimiser à la fois la conception et l'opération qui peut assurer la plus grande efficacité du transfert d'oxygène.

Tableau 1 : Aérateur hypolimnétique d'élévation d'air partiel

(McGinnis et al, 1997 ; Gafsi et al, 2005 et Kettab et al, 2005)

Variable et performances prévues	Valeurs
-Débit d'air (Nm ³ /s)	0.12
-Hauteur du tube élévateur (m)	12.2
-Diamètre du tube élévateur (m)	3.10
-Débit d'eau écoule (m ³ /s)	1.17
-Augmentation dans la concentration d'oxygène (g/m ³)	4.60
-Efficacité du transfert d'oxygène (%)	16
-Transfert total d'oxygène (16 aérateurs) (kg/jour)	464
-Transfert d'oxygène par aérateur (kg/jour)	7400

Tableau 2 : Les bulles plumes (McGinnis et al, 1997 ; Gafsi et al, 2005 et Kettab et al, 2005)

Variable et performances prévues :	Valeurs
-Débit d'oxygène (Nm ³ /s)	0.069
-Diamètre initiale des bulles (mm)	2.5
-Longueur du diffuseur (m)	2.500
-Vitesse initiale de la plume (m/s)	0.038
-Hauteur de montée de la plume	1.5
-Efficacité du transfert d'oxygène (%)	93
-Transfert total d'oxygène (kg/jour)	7400

Tableau 3 : Le Speece Cône (McGinnis et al, 1997 ; Gafsi et al, 2005 et Kettab et al, 2005)

Variable et performances prévues :	Valeurs
-Débit d'oxygène (Nm ³ /s)	0.068
-Diamètre initiale des bulles (mm)	2.0
-Débit d'eau imposée (m ³ /s)	1.3
-Temps de détention des bulles (min)	2.0
-Augmentation dans la concentration d'oxygène (g/m ³)	66
-Transfert total d'oxygène (kg/jour)	94
-Efficacité du transfert d'oxygène (%)	7400

ii. Résultats

McGinnis et Little (1997) ont montré que le diffuseur des bulles plumes est le système le plus économique et peut être le plus simple de ces trois systèmes. Leurs conclusions se sont basées sur les faits suivants (McGinnis et al, 1997 ; Gafsi et al, 2005 ; Kettab et al, 2005 ; Kettab et al, 2006 et Gafsi et al, 2007) :

- Dans l'aérateur d'élévation d'air, qui sont au nombre de 16, l'efficacité de transfert d'oxygène étant la plus faible d'une valeur de 16 %.
- Dans le Speece Cône, et les bulles plumes, les valeurs de l'efficacité de transfert d'oxygène sont très rapprochées de valeurs respectives 94 et 93 % ; en plus, une grande vitesse d'eau dans tout le cône doit être maintenue, et ceci pour assurer que les bulles n'atteignent pas l'équilibre avec l'eau dans le cône ; ceci pouvait conduire à une grande accumulation des bulles et une coalescence dans le cône, ce qui engendre une diminution dans l'efficacité totale.

iii. Effets comparés des systèmes d'aération par déstratification et hypolimnétique

Ruane et ses collaborateurs (1977) ont comparés les deux méthodes d'aérations (Tableau 4) avec les conditions sous lesquelles elles peuvent être appliquées au barrage Patrick Henry (au sud de la rivière Holston, USA) (Ruane et al, 1977 et Gafsi et al, 2005 et **Kettab et al, 2005**).

Tableau 4 : Domaine d'application des différentes méthodes d'aération pour le barrage Patrick Henry (Ruane et al, 1977 et Gafsi et al, 2005 ; kettab et al, 2005 et Gafsi et al, 2007).

Conditions sous lesquelles la technique d'aération doit être appliquée	Déstratification		Aération hypolimnétique avec diffusion	
	Pompage Méca.	Diffusion d'air	Air	Oxygène
Eaux froides	-	-	+	+
Forte augmentation de DO	-	-	?	?
Effet minimal sur la production d'énergie	+	+	+	+
Augmentation minimale dans l'azote dissous	?	?	?	+
Faible coût	+	+	-	-

Note : + Indique un effet positif sur la méthode d'aération particulière

- Indique un effet négatif sur la méthode d'aération particulière

? Indique un effet inconnu sur la condition indiquée

d. Constat

Ruane et ses collaborateurs (1977), ont constaté que la déstratification et l'aération hypolimnétique ne sont pas faisable au barrage Patrick Henry, car la première méthode pouvait augmenter la température de l'eau, ce qui peut engendrer des effets néfastes sur la vie piscicole, puisque le barrage en question est classé comme une pêcherie des eaux froides.

En plus l'aération hypolimnétique avec l'air cause des supersaturations de l'azote, et l'aération avec l'oxygène n'est pas attractive vu le coût élevé de l'oxygène (Ruane et al, 1977 ; Gafsi et al, 2005 ; Kettab et al, 2005 et Kettab et al, 2006). Des effets publiées de

l'oxygénation sur la concentration d'azote n'ont pas été consistantes, l'azote total et l'ammonium décroissent dans certaines, mais augmentent dans d'autres (Vickie et al, 2002). Sur la base de leurs études réalisées au barrage Patrick Henry, et en utilisant la diffusion d'oxygène dans une turbine d'aération, Ruane et ses collaborateurs, ont mentionné que la plupart des sources économiques de l'oxygène pouvaient être probablement de l'oxygène liquide à partir des provisions des réservoirs, plutôt que la production du gaz d'oxygène à ce site, parce que l'oxygène nécessaire est saisonnier, varie largement, et relativement faible (Ruane et al, 1977 et Gafsi et al, 2005 et Kettab et al, 2005).

La technique du gaz d'oxygène peut être utilisée à la place de l'air pour augmenter le contenu de l'oxygène de l'hypolimnion. L'avantage de cette technique, c'est que le compresseur n'est pas nécessaire, et que la sursaturation avec l'azote ne peut se produire (Ruane et al, 1977).

3. Effets comparés positifs de l'aération hypolimnétique et l'aération par déstratification

a. Systèmes d'aération par déstratification

- La déstratification est généralement très effective, spécialement quand le sulfure d'hydrogène, fer, manganèse et d'autres conditions associées avec l'eau anaérobie est un problème (Fast, 1978).
- La déstratification peut limiter la croissance des algues, si le mélange est complet, et si le lac a une profondeur relativement suffisante à sa zone euphotique (Fast, 1978 et Gafsi et al, 2005).
- Plusieurs études avaient montré une augmentation substantielle dans la distribution de la profondeur des poissons associées avec la déstratification (Fast, 1978).
- Le système de déstratification peut empêcher en hiver les poissons d'être tués par oxygénation des glaces couvrant les lacs (Fast, 1978 et Stefan et al, 2000 et Gafsi et al, 2005 ; Kettab et al, 2005 ; Kettab et al, 2006 et Gafsi et al, 2007)).
- La déstratification peut parfois augmenter la production, en amenant à la surface les éléments nutritifs régénérés de l'hypolimnion, qui ne sont pas précipités par l'augmentation du potentiel redox ou avec CaCO_3 (Fast et al, 1973).

b. Systèmes d'aération hypolimnétique

L'aération hypolimnétique a plusieurs avantages sur le système de déstratification, les éléments nutritifs (l'azote et le phosphore), ne sont pas transportés à l'épilimnion où ils peuvent stimuler la croissance algale, et le processus peut préserver un habitat d'eau froide pour les poissons tel que les truites et les saumons (Vickie et al, 2002). L'avantage de l'aération hypolimnétique est l'aptitude de réapprovisionner l'oxygène dissous tout en préservant la stratification thermique (McGinnis et al, 2001 et McGinnis et al, 2004 et Gafsi et al, 2005).

L'aération hypolimnétique peut augmenter une diversité des espèces par création d'un habitat convenable des poissons des eaux froides telles que les « truites » et les « saumons » (Fast, 1978).

L'aération hypolimnétique est parfois plus désirable que la déstratification dans la gérance de la pêche et dans la provision des eaux domestiques et industrielles, puisqu'un mélange complet peut promouvoir une croissance des algues (Fast et al, 1973 et Fast, 1978 et Gafsi et al, 2005 et Kettab et al, 2005).

L'aération hypolimnétique peut être aussi utilisée pour empêcher la mort des poissons en hiver. L'opération de ce système durant l'été oxyde les matières organiques et ainsi réduit la demande de l'oxygène en hiver (Fast, 1978 et Gafsi et al, 2004a et Gafsi et al, 2004b et Gafsi et al, 2005 ; Kettab et al, 2006 et Gafsi et al, 2007).

4. Conclusion

L'étude qui vient d'être menée, nous permet de conclure que :

- L'aération avec l'oxygène limite la saturation en gaz d'azote, tan disque l'aération avec l'air crée une saturation en gaz d'azote.
- Parmi les systèmes d'aérations hypolimnétique, le système le plus efficace est le diffuseur des bulles plumes, quoiqu'une déstratification accidentelle puisse survenir.
- La déstratification peut être utilisée en hiver, parce que la température du lac n'est pas modifiée. L'aération hypolimnétique est quand à elle utilisée en été, afin d'éviter d'homogénéiser la température du lac pendant cette période de l'année.
- Pour les réservoirs ou barrage, la déstratification en été n'est pas rentable, car l'eau du réservoir s'échauffe, ce qui rend l'eau impropre à la consommation.

Cependant, des expériences ont montré que l'aération mécanique en elle-même n'est pas durable, car :

- Les tubulures des conduits sont fréquemment bouchées par les algues, ce qui rend leur entretien difficile ;
- Une fois l'aération mécanique arrêtée, le lac rechute rapidement et devient de nouveau eutrophisé ;
- Les installations de l'aération mécanique sont placées à environ 7 cm au dessus du fond du lac, cette disposition ne permet pas de restaurer la zone située en dessous, ce qui aura pour effet de provoquer la disparition des poissons peuplant le fond du lac par asphyxie.

En conclusion, nous distinguons qu'en fonction des profondeurs et des dimensions des exploitations deux types de restaurations :

- La restauration par déstratification paraît plus adapté par temps froid et pour des lacs ou réservoirs de faibles profondeurs ayant des exploitations destinées exclusivement à l'alimentation ou l'irrigation.
- L'aération hypolimnétique convient à des lacs ou réservoirs profonds destinées à diverses exploitations (alimentation, irrigation, loisirs, etc...), permettant l'amortissement des coûts investis dans le système.

Cependant, il faut remarquer dans les lacs ou retenues destinées à l'élevage de poissons, l'oxygénation hypolimnétique permet d'éviter les apports indésirables d'azote provenant de l'aération avec l'air, et de garantir la préservation des peuplades poissonnières.

On estime dans l'état actuel de nos connaissances et avec les réserves qu'impose la prudence, que le meilleur moyen de lutter contre la pollution croissante du milieu aquatique, est de réduire la teneur en phosphore et en azote des décharges provenant des sources ponctuelles, les effluents domestiques en particulier.

Références bibliographiques

Davis, J. M. (1980). Destratification of reservoirs- A design approach for perforated-pipe compressed-air systems. *Water Serv.*, 84, 497-505.

Fast, AW., Brian Moss, et Robert G. Wetzel. (1973). Effets of Artificial Aeration on the Chemistry and Algae of Two Michigan Lakes. *Water Resources Research*, 9, 624-647.

Fast, AW. (1978). Artificial Aeration as a lake restoration technique. *Proceeding of National Conf on lake restoration*, 121-131.

Gafsi, M., Kettab, A., Benmamar, S., et Benziada, S. (2004a). L'eutrophisation dans les eaux de Surface: Effets Comparés des Systèmes d'Aerations. *Seminaire International sur l'eau dans le contexte saharien, université de laghouat (Algerie) du 19 au 23 Novembre, 2004. Proceeding.....*

Gafsi, M., Kettab, A., Benmamar S., et Benziada, S. (2004b). Lutte contre l'Eutrophisation des Lacs par les Systèmes Mécaniques. *Workshop sur l'apport des technologies de l'information : Problématique de l'Eutrophisation., ENP d'Alger (Algérie), du 4 au 6 décembre, 2004.*

Gafsi, M., Kettab, A., Benmamar, S., et Benziada, S. (2005). Etat de Connaissance sur les Différents Systèmes Mécaniques Impliqués dans la restauration des Lacs et réservoirs. *Congrès International sous le thème : De l'Eau pour le développement Durable dans le Bassin méditerranéen, LRS-EAU/RMEI, le 21-22-23 Mai, 2005, Alger (Algérie). ALgerian Journal of Technologie (AJOT), Numéro spécial, 363-373, Mai, 2005.*

Gafsi, M., Kettab, A., Benmamar, S. (2007). L'aération artificielle et ses effets sur le contrôle de la pollution dans les réserves. *Acte du 9^{ème} Symposium International de Cannes 2007 (France), 26-28 juin 2007.*

Kettab, M., Gafsi, M., Benmamar, S., et Benziada, S. (2005). Etudes Comparatives des Différents Systèmes Mécaniques Impliqués dans la Restauration des Lacs et Réservoirs. *6th International Conference. Menton. 7-10 September 2005.*

"Sharing a common vision for our water resources". *Proceeding*

Kettab, M., Gafsi, M., Benmamar, S., et Benziada, S. (2006). Les Systèmes d'Aérations Mécaniques et leurs Effets sur le Contrôle de l'Eutrophisation dans les Réserves. *Acte du 8^{ème} Symposium International de Cannes 2006 (France), 26-28 juin 2006.*

Marc Beutel. (2002). Improving Raw Water Quality with Hypolimnetic Oxygenation. *AWWA 2002 Annual Conference Marc Beutel, Brown and Caldwell Environmental and Consulting 201 North Civic Drive, Walnut Creek, CA 94596 925-210-2844, mbeutel@brwncald.com*

McGinnis, D.F et Little, J.C. (1997). Nutrient Control in Standley lake : Evaluation of Three Oxygen Transfer Devices. *In Proceeding of the IAWQ/IWSA joint Specialist*

Conference Reservoir Management and Water Supply-an Integrated System Prague, Czech Republic, May 1997.

McGinnis, D.F et Little, J.C. (1998). Bubble dynamics and oxygene transfer in Speece Cone. In Proceeding of the IAWQ/IWSA joint Specialist Conference, Reservoir Management and water Supply- an Integrated System, Prague, Czech Republic, 19-23 May, 1997.

McGinnis, D.F, Little J.C and Wuest A. (2001). Hypolimnetic Oxygenation: Coupling Bubble-Plume and Reservoir Models. Proceedings of Asian WATERQUAL 2001, IWA Regional Conference, Fukuoka, Japan, September 2001

McGinnis, D.F., A.Lorke, A.Wuest, A.Stockli, and J.C. Little. (2004). Interaction between a bulle plume and the near field in a stratified lake. Water Resources Research, Vol.40, W10206, doi:10.1029/2004WR003038, 2004.

Richard J. Ruane, Svein Vigander, et William R. Nicholas. (1977). Aeration of Hydro Releases at Ft. Patrick Henry Dam. Proceeding of American Society of Civil Engineers, Vol. 103, N°. HY10, October, 1977, 1135-1145.

Stefan A. McCord, P.E., S. Geoffrey Schladow, and Theron.(2000). Modeling Artificial Aeration Kinetics in Ice-Covered Lakes. Journal of Environmental Engineering, Vol.126, N°.1, January, 2000. Paper N°.17874. pp.21-31, 2000.

Vickie L. Burris, Daniel F. McGinnis and John C. Little. (2002). Predecting oxygen transfer and water flow rate in airlift aerators. Water Research 36, 4605-4615.

Wuest, A., Brooks, N.H.et Imboden, D.M.(1992). Bubble plume modelling for lake restoration. Water Resources Research, 28,12, 3235-3250.

Zic, K., Stefan, H.G., and Ellis, C. (1992). Laboratory study of water déstratification by a bubble plume. J. Hydraul. Res, Vol. 30, N° 1. pp 7-27.