

## ETAT DE CONNAISSANCE SUR LES DIFFERENTS SYSTEMES MECANQUES IMPLIQUES DANS LA RESTAURATION DES LACS ET RESERVOIRS

M. Gafsi<sup>(1,2)</sup>, A. Kettab<sup>(2)</sup>, S. Benmamar<sup>(2)</sup>, et S. Benziada<sup>(2)</sup>

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

(2) Laboratoire de recherches en Sciences de l'eau : LRS-EAU/ENP

Ecole Nationale Polytechnique

### RESUME

Les techniques de restauration des lacs ou prévention contre l'eutrophisation sont nombreuses (chimiques, biologiques, mécaniques,...). Vu le coût excessif et le rendement relativement faible de quelques unes d'entre elles, le processus d'aération dynamique est un des moyens les plus prometteurs [8].

Quatre techniques de stratégies de contrôle des éléments nutritives sont sélectionnées pour cette étude : déstratification artificielle par les bulles plumes, l'aérateur d'élévation partiel (ou total) d'air, l'oxygénation par les bulles plumes et l'oxygénation par le Speece Cône.

Chacune de ces méthodes a ses avantages et ses inconvénients. Une analyse technique et économique élaborées par différentes recherches révèle que l'oxygénation hypolimnétique est la stratégie la plus favorable pour le contrôle des éléments nutritives ([5], [11]). Dans tous les systèmes d'aération hypolimnétique, le système d'aération par les bulles plumes apparaît d'être le plus économique, et peut être le plus simple pour les systèmes utilisés dans le lac Standley (Colorado, USA). Alors que d'autres recherches sélectionnent le système d'aération Speece Cône [14].

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. Aussi, cette étude se concentre sur le côté économique et technique associés avec ces systèmes d'aération.

Le travail qu'on doit présenter ici est une étude d'avant projet, qui consiste à présenter les limites d'utilisations et les impacts de ces techniques sur les réserves d'eau, et ceci pour décider à un choix de la technique la plus efficace pour la projeter dans notre futur projet.

**Mots clés** : Déstratification - Aération hypolimnétique - Oxygène dissous - Gaz d'azote - lacs.

### 1. INTRODUCTION

La densité de stratification des lacs et les eaux des réservoirs est un fait commun ([7], [9]). 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 [13]. Quand la durée est suffisamment longue la perte de l'oxygène résultant de la demande biochimique et biologique se produit dans l'eau hypolimnétique qui est devenue isolée de la surface d'eau. Les conséquences immédiates de celles-ci varient et peuvent inclure à la formation des composés du fer et du manganèse en solution et en suspension qui provoquent la mort des poissons ([9], [10]), des recyclages internes accélérés des éléments nutritifs, solubilisation du métal, et des problèmes de goûts et d'odeurs qui sont indésirables dans les réserves d'eau ([10], [12]).

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 [8].

Le mélange artificiel des lacs stratifiés avec les aérateurs peut effectuer un nombre de changement par exemple, dans la composition de la population algale, dans le nombre total des algues, dans le taux de croissance, en plus causant une compensation presque complète du déficit de l'oxygène résultant à partir de l'activité métabolique [6].

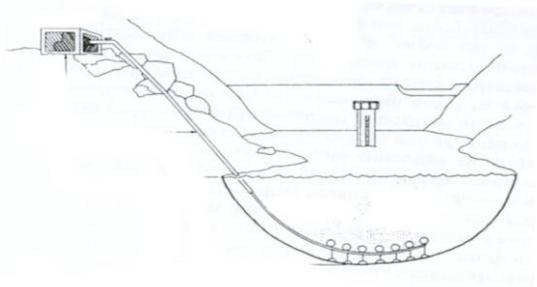
Les techniques utilisées pour résoudre l'état anaérobie des lacs peuvent être groupées en deux grandes catégories : la destratification artificielle et l'aération hypolimnétique. La méthode la plus simple est la destratification artificielle où l'air comprimé est introduit à travers des diffuseurs localisés au fond du lac. L'aération hypolimnétique est une stratégie utilisée pour maintenir le milieu aérobie dans l'hypolimnion tout en préservant la stratification thermique [14]. Chacune de ces méthodes a ses avantages et ses inconvénients.

Sur la base de plusieurs recherches axées sur ce domaine, l'étude présentée ici fait un état de synthèse bibliographique 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. Aussi, cette étude se concentre sur les cotés économique et technique associés avec ces systèmes d'aération.

## 2. SYSTEMES D'AERATION

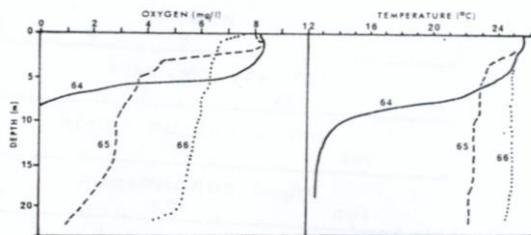
### 2.1. L'aération par le système de destratification

L'aération par destratification 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 (Figure N°1) [5].



**Figure 1** : Système de destratification d'un lac

La figure N°2 représente les valeurs d'oxygène et de la température du réservoir d'**El Capitan** avant et durant la destratification artificielle. Ces valeurs sont prises pour la période mi-août pour chaque année ; ce lac n'est pas aéré durant 1964, il a été aéré en juin 1965 et en

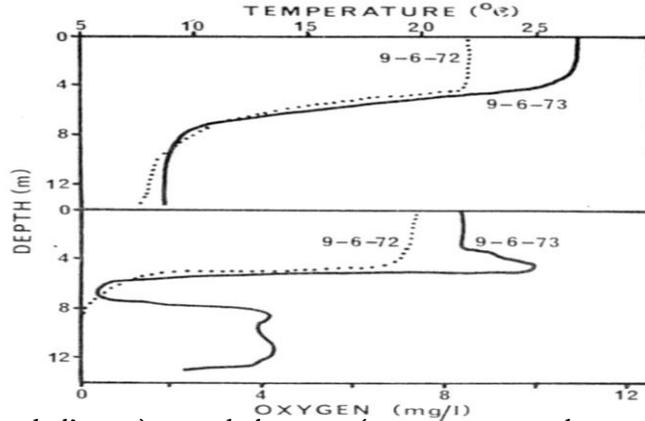


**Figure 2** : Valeurs de l'oxygène et de la température avant et durant la destratification

L'efficacité, le coût opérationnel, ou l'investissement nécessaire, ou tous les trois varient considérablement et imposent des limitations sur l'utilisation de la plupart des aérateurs [1].

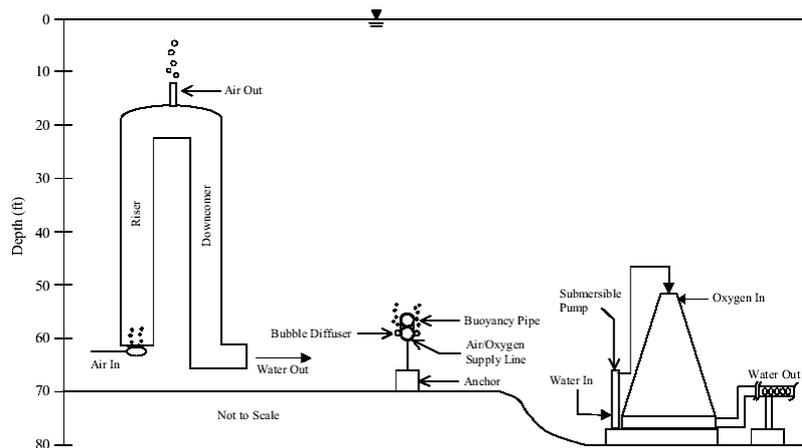
## 2.2. L'aération hypolimnétique

La figure N°3 représente les valeurs de l'oxygène et de la température au lac **Waccabuc N.Y**, avant et durant l'aération hypolimnétique ([3] et [5]). Ce lac n'est pas aéré durant 1972, mais l'aération commence au début de juillet 1973. Les concentrations d'oxygène augmentent de 0.0 mg/l à plus de 4 mg/l, tandis que les températures n'avaient pas changé beaucoup [5].



**Figure 3 :** Valeurs de l'oxygène et de la température avant et durant l'aération hypolimnétique au lac **Waccabuc** [5].

\*Trois mécanismes principaux sont utilisés pour l'aération hypolimnétique (Figure 4) [11].  
-Le Speece Cône; L'aérateur d'élévation d'air (air lift) ; Les bulles plumes.



**Figure 4 :** Représentation des trois mécanismes d'aération hypolimnétiques [11].

Typiquement, l'oxygène pure est utilisée 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 ([11],[14]). L'oxygène pure est utilisé pour l'oxygénation hypolimnétique pour empêcher l'accumulation des molécules d'azote, lesquelles peuvent être toxiques aux poissons [8]. 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 [13].

L'un des trois types d'oxygénateurs qui est généralement utilisé est l'aérateur d'élévation d'air (air lift) [15].

Dans les trois mécanismes d'oxygénations, les bulles de gaz en contact avec l'eau facilitent le transfert interfacial de l'oxygène, aussi bien que l'azote et d'autres gaz solubles [14].

### Effets comparés des systèmes d'aérations hypolimnétiques

Sur la base d'une étude faite dans lac Standley (en Colorado : USA), McGinnis et Little (1997), ont révèlent une analyse technique et économique de ces trois systèmes d'aération 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 [11].

Variable et performances prévues	Valeurs
Débit d'air (Nm <sup>3</sup> /s)	0.120
Hauteur du tube élévateur (m)	12.2
Diamètre du tube élévateur (m)	3.1
Débit d'eau écoule (m <sup>3</sup> /s)	4.6
Augmentation dans la concentration d'oxygène (g/m <sup>3</sup> )	4.6
<b>Efficacité du transfert d'oxygène (%)</b>	<b>16</b>
Transfert d'oxygène par aérateur (kg/jour)	464
Transfert total d'oxygène (16 aérateurs) (kg/jour)	7400

**Tableau 2 :** Les bulles plumes [11].

Variable et performances prévues	Valeurs
Débit d'oxygène (Nm <sup>3</sup> /s)	0.069
Diamètre initial 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
<b>Efficacité du transfert d'oxygène (%)</b>	<b>93</b>
Transfert total d'oxygène (kg/jour)	7400

**Tableau 3 :** Le Speece Cône [11].

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

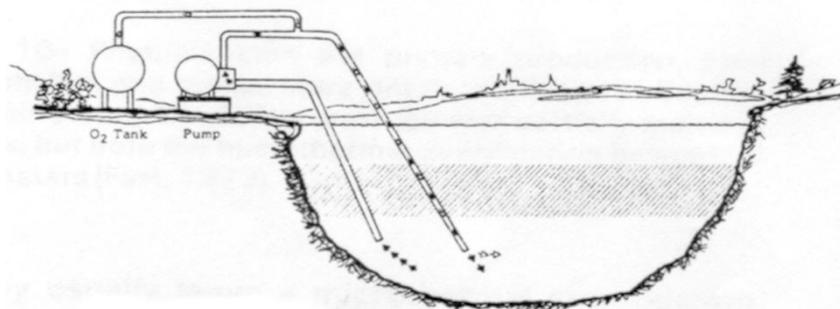
## Résultats

**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 :

- 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, 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.

De son côté, Fast A.W (1978), a proposé une étude comparative de trois systèmes d'aération hypolimnetiques, à savoir :

- **Side-Stream Pumping (S.S.P) (Figure N°5);**
- **Aérateur hypolimnetiques d'élévation d'air partiel ; Aérateur hypolimnetiques d'élévation d'air complet.** (Ce système est typiquement opéré à des pressions supérieures à 3 atm et des températures d'eau de 10°C ou moins. L'efficacité de ce système, est basée sur la grande solubilité de l'oxygène pure et son injection dans l'eau sous pression [3].



**Figure 5:** Side-Stream Pumping (S.S.P)» ([3], [5]).

Des auteurs ont comparé les coûts de trois types d'aérateurs de l'hypolimnion, et ils ont découvert que la conception remontant l'air complet avait un frais d'exploitation beaucoup plus faible et une grande efficacité que l'un des deux systèmes d'aérateurs, le **S.S.P** ou la conception remontant l'air partiel. Le S.S.P a un coût capital plus faible [5].

Ruane et ses collaborateurs (1977) ont comparés les deux méthodes d'aérations (déstratification et aération hypolimnétique) avec les conditions sous lesquelles elles être appliquées au barrage Patrick Henry [4]:

**Tableau N°4 :** Domaine d'application des différentes méthodes d'aération pour le barrage Patrick Henry[4].

Condition sous laquelle la technique d'aération doit être appliquée	Déstratification	Aération hypolimnétique avec diffusion :	
		Air	Oxygène
Eaux froides	Effets négatifs	Effets positifs	Effets positifs
Forte augmentation de DO	Effets négatifs	Effets inconnus	Effets inconnus
Effet minimal sur la production d'énergie	Effets positifs	Effets positifs	Effets positifs
Augmentation minimale dans l'azote dissous	Effets inconnus	Effets inconnus	Effets positifs
Faible coût	Effets positifs	Effets négatifs	Effets négatifs

### Constat

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

l'aération hypolimnétique avec l'air cause des super saturations de l'azote, et l'aération avec l'oxygène n'est pas attractive vu le coût élevé de l'oxygène.

En 2002, Marc Beutel, expose un travail où il a fait une comparaison sur les systèmes d'aération hypolimnetiques, en insistant sur les coûts associés avec ces systèmes, et leurs effets sur la qualité de l'eau.

Le tableau 5 montre les coûts aussi bien les avantages et les inconvénients des différents systèmes d'oxygénations

**Tableau 5** : Les systèmes d'oxygénations [14].

System (reference)	Capital Cost (\$)	Operating Cost (\$/d)	Advantages	Disadvantages
Pure oxygen submerged chamber	~\$1 million	~\$850	Very high oxygen transfer efficiency. Oxygen discharged horizontally over sediment-water interface. System efficiency independent of lake depth.	Need for a submerged pump and chamber.
Deep pure oxygen U-tube	Not reported	~\$1,000	Low operating cost compared to on shore chamber. System efficiency independent of lake depth.	Need to construct 175-foot deep u-tube. Pumping involved.
Diffuse deep-water oxygenation	~\$1 million	~\$1,000	No pumping. Good horizontal distribution of oxygen.	Oxygen released above and away from sediment-water interface. System efficiency decreases with lake depth. May impact thermal stratification.
Shallow pure oxygen U-tube	Not reported	~\$1,200	Tube only 20-30 feet deep. System efficiency independent of lake depth	Pumping involved. Compared to deep U-tube, less oxygen delivered per unit flow through the system.
Bubble plume oxygenation	Not reported	Not reported	By pumping air through the diffusers, it can also be used as destratification system.	System efficiency decreases with lake depth. Oxygen released above and away from sediment-water interface. System can impact thermal stratification.
Pure oxygen on shore pressurized chamber	Not reported	~\$3,000	Most facilities on shore. System efficiency independent of lake depth	High pumping cost.

Les effets de l'oxygénation hypolimnétiques sur le niveau du phosphore ont été plus variés. McQueen et ses collaborateurs attribuent ceci au niveau du PH et la disponibilité du fer pour la précipitation du phosphore. Plus après, Gâtcher et Wehri, concluent que le cycle interne du phosphore n'est pas affecté par l'augmentation de la concentration de l'oxygène dissous hypolimnétiques.

### 3. EFFETS COMPARES POSITIFS DE L'AERATION HYPOLIMNETIQUE ET L'AERATION PAR DESTRATIFICATION

#### 3.1. 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.

\*En se basant sur l'étude faite au lac **Casistac, Calif** (déstratification partielle), Fast A.W (1978), montre que les concentrations du phosphore sont basées à la surface et grandes au fond du l'eau. Aussi, l'auteur montre que, l'orthophosphore est de 23% du total à la surface, mais 87% du total au fond .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 [5].

\*En 1970, une étude faite par l'association américaine des travaux en eau sur 26 réserves qui utilisent le système de déstratification artificielle, et leurs résultats ont montré que 7% des algues fleurissant sont baissées par la déstratification, 12% des algues fleurissant sont

augmentées par la déstratification et 81% de ces algues sont restées inchangés par la déstratification [5].

\*Plusieurs études avaient montré une augmentation substantielle dans la distribution de la profondeur des poissons associées avec la déstratification [5].

\*Le système de déstratification peut empêcher en hiver les poissons d'être tués par oxygénation des glaces couvrant les lacs [5].

\*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  $\text{CaCO}_3$  [2].

### **3.2. 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 [15]. L'avantage de l'aération hypolimnétique est l'aptitude de réapprovisionner l'oxygène dissous tout en préservant la stratification thermique ([14], [16]).

\*McQueen et Lean, concluent que [15] :

- Un système d'oxygénation bien conçu, peut maintenir la stratification et ne peut augmenter significativement la température d'eau de l'hypolimnion ;
- Le niveau de l'oxygène de l'hypolimnion augmente ;
- Le fer, manganèse, sulfure d'hydrogène et la concentration du méthane décroissent ;
- La population du zooplancton n'est pas en général affectée ;
- Les concentrations en chlorophylle A sont habituellement non altérées ;
- La distribution de profondeur de la population des poissons des eaux froides est augmentée.

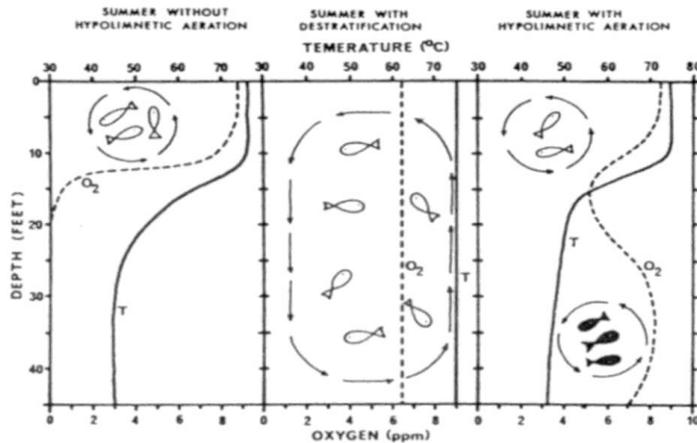
\*L'aération hypolimnétique n'avait pas un effet sur la distribution de la profondeur de la plupart des algues. Les moyens les plus probables par lesquels, elle pouvait affecter la densité algale sont [5] :

- Changement du cycle du taux des éléments nutritifs et leur chemin ;
- Création d'un changement dans la composition des espèces et la densité des zooplancton, faune benthique et autres niveaux trophiques.

\*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 » [5].

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 ([2], [5]).

**Fast** (1978), constate que l'aération hypolimnétique crée un habitat convenable pour les poissons des eaux froides dans différents lacs où aucune aération au préalable n'avait existée (Figure N°6) (5).



**Figure 6 :** Influence de l'aération artificielle sur les poissons d'un lac eutrophe durant les mois d'été [5].

**Bernhardt (1978)**, montre des résultats à partir d'une aération hypolimnétique de 15 années sur le barrage de **Wahnbach** ( $Vol_{epi}=20.10^6 \text{ m}^3$ ,  $Vol_{hyp}=16.10^6 \text{ m}^3$ , profondeur=45 m), utilisant un aérateur hypolimnétique développé par l'association du réservoir **Wahnbach**, leurs résultats montrent que [6]:

- Malgré un développement de masse d'algues occasionnelle, la consommation de l'oxygène à l'interface sédiment-eau est compensée durant la stratification. Aucune condition anaérobie ne s'est produite au fond du lac (supérieur ou égal à 4 mg/l  $O_2$ ).
- Les concentrations en trop du fer et du manganèse ne sont pas produites dans l'hypolimnion, et le traitement pour supprimer le **manganèse** n'est pas nécessaire.
- La libération de l'orthophosphate à partir des sédiments demeure faible (charge interne), laquelle empêche un renouvellement rapide de l'eutrophisation.
- Durant la stratification, l'hypolimnion conserve une température inférieure ou égale à 10°C pour le mois d'octobre, et obéit à la valeur de guide pour l'eau potable [6].

**Autres avantages de l'oxygénation hypolimnétique [13]:**

- Faibles taux de recirculation de l'eau, qui minimise la turbulence dans l'hypolimnion, ce qui engendre une faible demande d'oxygène et la chance d'avoir une déstratification accidentelle ;
- Maintient de grands niveaux d'oxygène dissous dans toute la période stratifiée ;
- Faible énergie ;
- Faible coût de commercialisation de l'oxygène.

#### 4. EFFETS COMPARES NEGATIVES DES SYSTEMES D'AERATION

\* Il a été reporté que l'aération avec la compression d'air élève la concentration de l'azote gazeux et qui par conséquent cause la mort des poissons ; alors que McQueen et Lean, ne découvrent aucun effet défavorable sur la population des poissons [15].

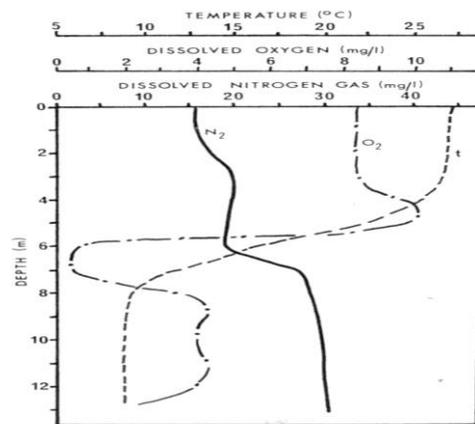
\*Les concentrations de l'azote hypolimnétique au lac **Waccabuc** augmentent à partir d'une saturation proche de 150% de la saturation dans 80 jours d'une aération hypolimnétique continue (Figure N°7) ([3], [5]). L'utilisation de l'injection de l'oxygène aide à éviter les problèmes liés avec la supersaturation de l'azote [13].

Aussi le système de destratification pouvait augmenter la température d'eau, et l'aération hypolimnétique avec l'air pouvait introduire un problème de supersaturation du gaz d'azote [4].

\* La destratification est moins effective dans la réduction de la densité algale et la production principale.

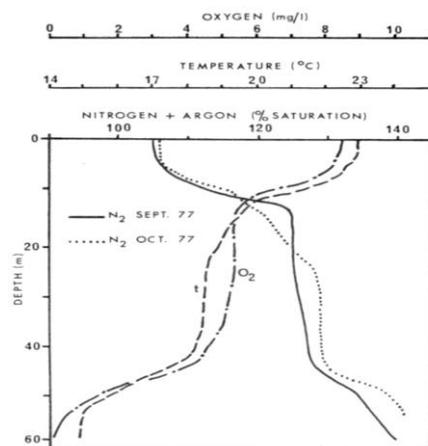
\*La destratification fait augmenter largement la température des sédiments et l'écoulement de l'eau sur les sédiments, ce qui pourrait augmenter le taux d'échange du phosphore avec les sédiments [5].

\*La destratification peut croître les éléments nutritifs dans la zone euphotique, et de ce fait, elle stimule la croissance algale.



**Figure 7 :** Valeurs de l'oxygène, l'azote et de la température durant l'aération hypolimnétique au lac Waccabuc [5].

La destratification artificielle au lac **Casistas, Calif**, cause des supersaturations en excès de l'azote de 140 % relative à la pression de surface (Figure 8) [5].



**Figure 8 :** Valeurs de l'oxygène, l'azote et la température durant la destratification artificielle au lac Casistas, Calif [5].

\***Fast** (1978), mentionne que tous les facteurs affectant les concentrations de l'azote durant la destratification avec compression d'air ne sont pas identifiés. L'auteur conclue que ces facteurs incluent probablement le degré de mélange, la densité des bulles d'air, les vitesses

verticales des plumes, la profondeur de l'injection de l'air, le rapport du volume total d'eau au volume total d'air injecté et le contenu d'oxygène dans l'eau [5].

\*L'aération par déstratification peut engendrer des impacts nuisibles au lac ; parmi lesquels [5]:

- Ces systèmes laissent certaines stratifications microthermiques près de la surface, ce qui peut résulter dans l'augmentation de la croissance des algues ;
- Ces systèmes provoquent une grande chaleur (température) dans le lac durant le mois été, ce qui peut éliminer les espèces des eaux froides telles que les « truites » et les « saumons » ([5], [14]);
- Plusieurs des propriétés chimiques devraient être plus uniformes et font obstacle à la distribution des poissons, zooplancton, faune benthique et d'autres biotes devraient être minimisés.

\*D'après Brian Kirke et Ahmed El Gezawy (1997), la méthode de déstratification englobe trois inconvénients [10]:

- Elle consomme une grande d'énergie. Les compresseurs utilisés sont dans le rang de puissance : de 37 à 100 kw, et même ils peuvent être insuffisant pour de grands réservoirs ;
- Une poussée de plume n'est pas capable de pénétrer une forte thermocline et la déstratification est accomplie seulement par un processus de frottement avec beaucoup de mélange non productif ;
- Introduction d'un jet de grande énergie du compresseur près du fond, qui peut augmenter la turbidité en troublant le fond des sédiments.

\*La déstratification par le système des bulles plumes peut avoir des effets sur la qualité de l'eau. Ces plumes peuvent occuper toute la colonne d'eau ou compartimenter cette colonne d'eau par une cascade de plume, ceci a une grande implication sur la qualité de l'eau. Par exemple, une grande concentration des éléments nutritifs à partir des sédiments des lacs, peut être rapidement transférée à la zone photic par une bulle plume qui occupe la colonne d'eau entière. Par contre, une cascade de plume devrait espérer d'avoir une capacité de transfert faible en éléments nutritifs. Ainsi, dans certaines circonstances, une cascade de plume peut être désirable, quoique l'efficacité du mélange est faible (Schladow, 1992).

## 5. BIBLIOGRAPHIE

[1] Donald C. Raney, and Terry G. Arnold. (1973). Dissolved Oxygen Improvement by Hydroelectric Turbine Aspiration. Journal of the Power Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol.99, N°.P01, May, 1973, 139-152.

[2] 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

[3] Fast, AW., William J. Overholtz, et Richard A. Tubb. (1975). Hypolimnetic Oxygenation Using Liquid Oxygen. Water Resources Research, II, 294-29.

[4] 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.

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

- [6] Bernhardt, H., and Clasen, J. (1985). Recent developments and perspectives of restoration for artificial basin used for water supply. Intern Congr on Lake Pollution and Recovery, 1985, 213-227.
- [7] Paterson, J.C., and Imberger, J. (1989). Simulation of bubble plume destratification systems in reservoirs. *Aquatic Sciences*. 51(1).3-18.
- [8] Wuest, A., Brooks, N.H. et Imboden, D.M. (1992). Bubble plume modelling for lake restoration. *Water Resources Research*, 28,12, 3235-3250.
- [9] Schladow, S.G. (1993). Lake Destratification by Bubble-Plume Systeme: Design Methodologie. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.119, N°3, March, 1993, 350-367.
- [10] Kirke, B., and El Gezawy, A. (1997). Design and Model Tests for an Efficient Mechanical Circulator/Aerator for lakes and Reservoirs. *Water Research*, Vol.31, N°6. pp.1283-1290, 1997.
- [11] McGinnis, D.F et Little, J.C. (1997). 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.*
- [12] 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*
- [13] 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](mailto:mbeutel@brwncald.com)
- [14] McGinnis, D.F et Little, J.C. (2002). 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.*
- [15] Vickie L. Burris, Daniel F. McGinnis and John C. Little. (2002). Predicting oxygen transfer and water flow rate in airlift aerators. *Water Research* 36, 4605-4615.