

Qualité de l'eau requise pour l'élevage des salmonidés

Table des matières

mise à jour : octobre 2012

1. Introduction	1
2. Température	2
3. Acidité, alcalinité et pH	4
4. Oxygène (O_2)	7
5. Azote gazeux (N_2)	9
6. Dioxyde de carbone (CO_2)	11
7. Ammoniac ($NH_3-NH_4^+$), Nitrites (NO_2^-), Nitrates (NO_3^-)	14
8. Solides en suspension (MES)	17
9. Fer ($Fe^{+2} - Fe^{+3}$)	18
10. Manganèse ($Mn^{+2} - Mn^{+4}$)	19
11. Sulfure d'hydrogène (H_2S)	20
12. Synthèse des paramètres de la qualité de l'eau pour l'élevage des salmonidés	22

1. Introduction



Les poissons sont des animaux aquatiques, l'eau est leur milieu de vie. Les familles et les espèces ont toutes des besoins spécifiques en termes de qualité physico-chimique de l'eau. Les salmonidés, tels que l'omble de fontaine, la truite arc-en-ciel et l'omble chevalier, sont des poissons d'eau douce et d'eau froide très exigeants en termes de qualité physico-chimique de l'eau. Ces exigences élevées proviennent des caractéristiques du milieu naturel d'où ces espèces sont originaires. En effet, les salmonidés habitent des lacs et des cours d'eau froide et bien oxygénée situés dans des milieux naturels peu productifs (oligotrophes) et non pollués. Il faut donc fournir à ces poissons, pour leur élevage, une qualité d'eau qui leur convient.

Cependant, la qualité physico-chimique de l'eau est modifiée sous l'influence de l'élevage intensif des poissons en pisciculture, elle se détériore. Le rejet des produits d'excrétion dans l'eau est le principal agent responsable de cette détérioration de la qualité de l'eau dans les bassins d'élevage. Bien que les poissons d'élevage, du fait de leur domestication, soient plus tolérants que les poissons sauvages aux conditions d'eau, des

limites extrêmes ne doivent cependant pas être dépassées, au-delà desquelles l'eau devient impropre à l'élevage.

La connaissance de la biologie des salmonidés et la pisciculture intensive de ces poissons ont permis de déterminer les qualités physico-chimiques de l'eau à respecter pour obtenir de bonnes performances d'élevage. Par ailleurs, l'élevage intensif a aussi permis d'établir assez précisément la production des résidus d'excrétion qui s'accumulent dans l'eau et la rendent inévitablement impropre après une certaine utilisation. Sommairement, les modifications de la qualité de l'eau résultant de l'élevage intensif sont les suivantes :

- ↑ de la température en été et ↓ de la température en hiver;
- ↓ de la concentration en O_2 ;
- ↑ de la concentration des solides en suspension (MES);
- ↑ de la concentration de l'ammoniac ($NH_3 - NH_4^+$);
- ↑ de la concentration de CO_2 ;
- ↓ du pH;
- ↑ de la concentration des bactéries et des champignons.

L'objet du présent document est d'étudier ces paramètres en donnant leur nature et leur provenance, leur toxicité et les limites de tolérance des salmonidés à chacun d'eux, les méthodes de leur dosage dans l'eau et les moyens de les

contrôler. D'autres paramètres comme les métaux et l'azote gazeux sont également étudiés en considération de leur importance sur la qualité de l'eau pour l'élevage des salmonidés. Le document se termine par un tableau synthèse des paramètres de qualité de l'eau requis pour l'élevage des salmonidés.

2. Température

2.1 Nature et provenance

La température de l'eau est très dépendante de son contact avec l'air ambiant. Pour les eaux de surface, soit les cours d'eau et les lacs, ce contact est direct. Les eaux souterraines, emmagasinées dans la nappe phréatique émergeant naturellement par les sources ou pompées dans des puits, sont moins en contact direct avec la température de l'air.

Les eaux de cours d'eau, de lacs et de la nappe phréatique sont utilisées pour l'élevage. De façon générale, les températures des cours d'eau présentent les plus grandes variations et sont souvent plus froides ou plus chaudes que l'optimum recommandé pour l'élevage des salmonidés. En hiver, elles sont trop froides et atteignent des minimums 0,5 °C à 1,0 °C de décembre à mars. Elles dépassent l'optimum en été, où elles atteignent des maximums de 18 °C à 24 °C, en juillet et août. Les eaux de lacs profonds, dû à l'importance de la masse d'eau qui régularise les variations de la température, présentent des écarts moins importants de température en profondeur qu'en surface. Ces lacs ont des températures en profondeur qui se situent entre 2 °C et 4 °C au minimum, pendant les mois d'hiver et un maximum de 15 °C à 16 °C, pendant l'été. L'eau de source ou de puits est la plus constante au point de vue des températures et varie entre 3 °C et 8 °C en hiver et entre 8 °C et 12 °C en été. Le Tableau 1 donne trois profils de températures caractéristiques des eaux utilisées au Québec pour l'élevage des salmonidés. L'utilisation d'eau de puits pendant l'hiver et d'un mélange d'eau de puits et de surface pendant les mois plus chauds offre le meilleur profil de températures pour la croissance de la truite tout au long de l'année.

Tableau 1 Températures caractéristiques de trois types d'approvisionnement en eau utilisés pour l'élevage des salmonidés au Québec

Mois	Températures (°C)		
	Puits + surface	Source	Surface
Janvier	6,5	4	1
Février	6,5	4	1
Mars	8	4	1
Avril	10	4	3
Mai	12	6	12
Juin	14	10	17
Juillet	14	14	18
Août	14	14	18
Septembre	13	12	13
Octobre	10	10	8
Novembre	8	5,5	1
Décembre	8	5,5	1

2.2 Effets sur les poissons

La température de l'eau joue un rôle prédominant sur le métabolisme des poissons et ainsi sur la croissance. Tandis que les animaux supérieurs, tels que les mammifères et les oiseaux, peuvent maintenir leur température corporelle constante (homéothermie), peu importe la température de l'environnement, les poissons sont poïkilothermes, c'est-à-dire que leur température corporelle varie en fonction de celle de l'eau. Les températures chaudes accélèrent le métabolisme et stimulent la croissance des poissons. À l'inverse, les températures froides ralentissent le métabolisme et la croissance. Il en résulte que la température de l'eau est le facteur déterminant de la croissance des poissons en présence d'une alimentation abondante. Cette particularité a une grande importance en pisciculture, où l'on recherche la croissance la plus rapide possible de manière à augmenter le rendement de la production et la rentabilité.

La Figure 1 illustre la croissance de la truite arc-en-ciel depuis un poids de 10 g jusqu'à 1 000 g aux températures : de l'eau de surface ; de source ; et de puits et de surface mélangée. La croissance la plus lente est obtenue avec l'eau de surface, où la truite atteint presque 1 000 g après 26 mois. L'eau de source permet une croissance plus rapide, la truite atteint 1 000 g à 22 mois.

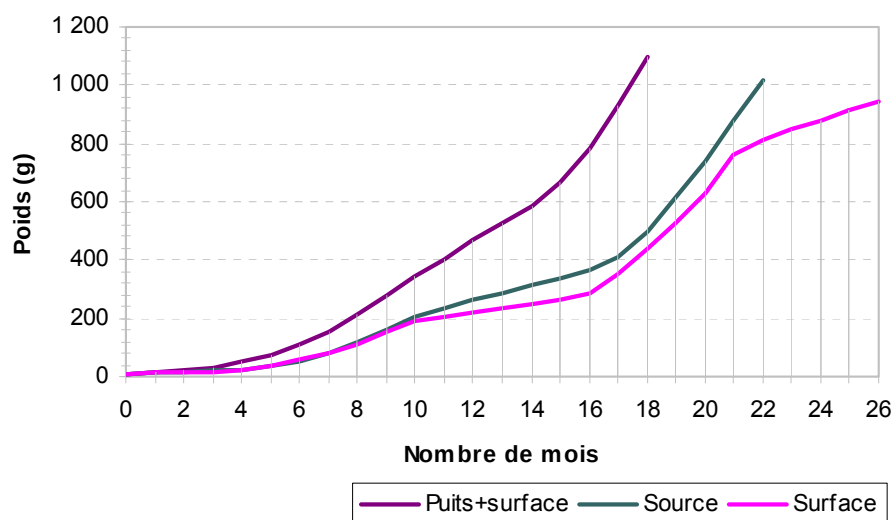


Figure 1 Croissance de la truite arc-en-ciel selon le type d'approvisionnement en eau utilisé

Le mélange d'eau souterraine et de surface permet d'obtenir la meilleure croissance, où la truite dépasse 1 000 g à 18 mois.

La température a aussi un effet sur d'autres paramètres physico-chimiques de l'eau ayant un effet sur le poisson. Les changements de température modifient la solubilité et les équilibres chimiques. Lorsque la température de l'eau augmente, la solubilité des gaz (N_2 , O_2 et CO_2) diminue. Par exemple, la concentration en oxygène de l'eau à la saturation est inférieure de 30 % à la température de 18 °C (9,5 mg/L) par rapport à celle observée à 3 °C (13,5 mg/L).

L'élévation de la température de l'eau rend le poisson plus actif, entraînant une augmentation de sa consommation d'aliments et ainsi d'oxygène. En même temps que la demande en oxygène du poisson augmente, l'élévation de la température diminue la solubilité de l'oxygène dans l'eau. L'effet combiné de ces deux facteurs peut entraîner un stress au poisson en présence d'un apport en oxygène insuffisant.

L'élévation de la température de l'eau fait augmenter le pourcentage de l'ammoniac (NH_3 + NH_4^+) sous la forme toxique (NH_3).

2.3 Limites de tolérance des salmonidés

La zone optimale de température pour la croissance des salmonidés varie quelque peu selon les espèces (Tableau 2), elle se situe entre 7 °C et 17 °C pour les espèces élevées au Québec. Pour cette raison, les salmonidés en général (truites, ombles et saumons) sont des

espèces d'eau froide. D'autres poissons comme le doré, la perchaude et l'achigan carpe sont des espèces d'eau tiède, leurs températures optimales de croissance étant plus élevées, soit supérieures à 20 °C.

Tableau 2 Températures optimales pour la croissance de certains salmonidés

Espèces	Températures (°C)
Ombre de fontaine	7 - 13
Ombre chevalier	8 - 10
Truite arc-en-ciel	10 - 15,5
Truite brune	9 - 15,5
Saumon atlantique	10 - 17

Tiré de Piper et al. (1982)

2.4 Moyens de contrôle

Les entreprises piscicoles productrices de salmonidés doivent essayer, dans la mesure du possible, de maintenir la température de l'eau d'élevage dans les limites thermiques optimales requises pour l'espèce élevée. Le chauffage ou le refroidissement de l'eau au moyen de sources énergétiques pour l'engraissement des poissons est trop onéreux pour être rentable, compte tenu des débits importants requis. Les pisciculteurs doivent faire au mieux avec les températures naturelles des différentes sources d'approvisionnement dont ils disposent. Comme nous l'avons montré précédemment, les profils de températures sont différents dans l'année selon le type d'approvisionnement en eau disponible : soit souterraine, d'un cours d'eau, ou d'un lac. Les pisciculteurs choisissent donc selon la disponibilité la source d'approvisionnement la plus adéquate ou un mélange de deux.

2.5 Références

PIPER, R.G., I.B. McElwain, L.E. Orme, J.P. McCraren, L.G. Fowler, J.R. Leonard (1982). Fish hatchery management, U.S. Fish and Wildlife Service, Department of the Interior, p. 134.

3. Acidité, alcalinité et pH

3.1 Nature et provenance

Un élément acide est capable de libérer des ions hydrogène (H^+) et un élément alcalin est capable de libérer des ions hydroxyde (OH^-). Ces ions sont les principales variables des systèmes aqueux, car ils influent considérablement sur les processus physiques, chimiques et biologiques qui se déroulent dans l'environnement (CCME, 1987). L'eau présente une forte aptitude à solubiliser un grand nombre de substances, elle est qualifiée de solvant universel. L'eau dissout les substances grâce à sa forte constante diélectrique qui lui permet d'ioniser et de dissocier même des substances non ioniques à l'état pur. Elle favorise donc la dissociation des éléments en ions acides (H^+) et basiques (OH^-).

L'acidité est la mesure de la capacité de l'eau à neutraliser une base, donc de la concentration des composés qui peuvent se dissocier dans l'eau en libérant des ions H^+ . Les acides minéraux en solution dans l'eau et l'acide carbonique (H_2CO_3), formé dans l'eau par le CO_2 produit par la respiration des organismes vivants, sont les principaux éléments responsables de l'acidité de l'eau.

L'alcalinité est la mesure de la capacité de l'eau à neutraliser un acide, donc de la concentration des composés qui peuvent se dissocier dans l'eau en libérant des ions OH^- . Les bicarbonates (HCO_3^-), les carbonates (CO_3^{2-}) et les hydroxydes (OH^-) sont les principaux éléments responsables de l'alcalinité de l'eau.

Ces éléments acides et basiques peuvent être en partie dissociés dans l'eau, alors que l'autre partie ne l'est pas et constitue une réserve. Ces molécules de réserve, additionnées à celles dissociées, représentent l'acidité et l'alcalinité totale que l'on mesure dans l'eau.

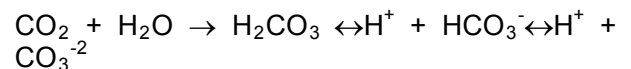
Le pH est la résultante de l'interaction de nombreuses substances en solution dans l'eau et aussi de nombreux phénomènes biologiques qui s'y déroulent. Le pH indique l'état d'équilibre entre

les acides et les bases et est une mesure de la concentration des ions H^+ libres en solution dans l'eau. Les ions H^+ libres sont responsables de l'état acide de l'eau et les ions OH^- libres de l'état alcalin. Un pH de 7 est neutre, c'est-à-dire ni acide ni alcalin, il y a alors autant d'ions H^+ que d'ions OH^- libres en solution dans l'eau. Au fur et à mesure que le pH diminue en bas de 7, la concentration des ions H^+ libres en solution dans l'eau augmente de plus en plus et le pH devient de plus en plus acide. Au fur et à mesure que le pH augmente en haut de 7, la concentration des ions H^+ libres diminue de plus en plus et le pH devient de plus en plus alcalin. Les réserves alcalines (alcalinité) et acides (acidité) de l'eau, constituent le pouvoir tampon de l'eau, c'est-à-dire la sensibilité plus ou moins prononcée de son pH à varier si l'on ajoute un acide ou une base à l'eau.

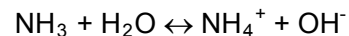
L'échelle de pH est logarithmique, c'est-à-dire qu'il y a un facteur 10 entre deux unités de pH. À titre d'exemple, une eau à pH de 6 est 10 fois plus acide qu'une eau à pH de 7 et contient ainsi 10 fois plus d'ions H^+ . Cela a une grande importance parce qu'une faible variation du pH de l'eau peut causer un stress important au poisson.

Les principaux éléments pouvant influencer le pH de l'eau piscicole sont :

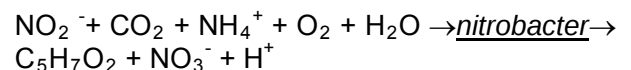
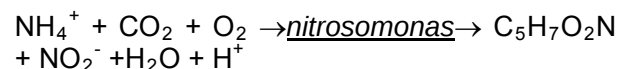
- 1- La libération de CO_2 par la respiration des poissons, elle favorise une baisse du pH par la libération d'ions H^+ :



- 2- La libération de l'ammoniac suite à la digestion des protéines par les poissons, laquelle favorise une augmentation du pH par la libération d'ions OH^- :



- 3- La nitrification de l'ammoniac favorise une baisse du pH par la libération d'ions H^+ :



Les pluies acides, la fonte de la neige au printemps et les cours d'eau qui drainent un milieu boisé en conifères favorisent la présence d'une eau plus acide. Les eaux de marais et de tourbières, à réserves alcalines faibles, ont un pH acide.

3.2 Effets sur les poissons

La stabilité du pH compte beaucoup en pisciculture. Les poissons d'élevage sont adaptés à une valeur moyenne de pH et supportent mal de fortes et brusques variations de celui-ci (Huet, 1970). Les conditions biologiques sont bien meilleures dans une eau à pH sensiblement constant que dans une eau subissant des variations importantes.

L'effet toxique du pH de l'eau peut se manifester à deux niveaux chez les poissons, d'une part, par un effet direct sur le pH du sang du poisson et, d'autre part, en augmentant la toxicité de certaines substances présentes dans l'eau d'élevage. Le poisson serait plus sensible à une baisse brutale du pH qu'à une hausse (SIGMA, 1983). Une baisse brutale du pH de l'eau peut entraîner une baisse du pH du sang, qualifiée d'acidose. La baisse du pH dans le sang du poisson diminue la capacité de l'hémoglobine à transporter l'oxygène (SIGMA, 1983). Les symptômes caractéristiques sont l'excitabilité, le halètement et la production excessive de mucus par les branchies irritées (Chemillier, 1997).

Par ailleurs, le pH a un effet sur la toxicité de plusieurs éléments dissociés différemment dans l'eau selon son pH. Certains sont des résidus métaboliques rejetés par les poissons comme le CO_2 et l'ammoniac; il y a des métaux dissous dans l'eau comme le fer et le manganèse; et certains produits d'usage prophylactique (iodophores pour la désinfection des œufs) ou curatifs (sulfate de cuivre). Un pH acide a un effet sur davantage d'éléments, en effet, il augmente la toxicité du CO_2 , des iodophores et du sulfate de cuivre. Un pH alcalin, par contre, augmente la toxicité de l'ammoniac et du fer.

Au chapitre de la toxicité des éléments affectés par un pH acide, la réserve alcaline de l'eau (alcalinité) revêt toute son importance pour tamponner le pH et empêcher les variations brusques de ce dernier. Quand le pH de l'eau est à la limite inférieure de 6,5, l'alcalinité doit être au moins de 15 à 20 mg/L pour être acceptable pour la production piscicole (SIGMA, 1983). Par contre, une étendue désirable d'alcalinité pour l'élevage des poissons se situe entre 75 et 200 mg/L (Wurts et Durborow, 1982).

3.3 Limites de tolérance des salmonidés

Les poissons et les autres vertébrés ont un pH moyen du sang de 7,4 (Wurts et Durborow, 1982). Le sang des poissons est en contact étroit avec l'eau en passant dans les vaisseaux sanguins des

branchies et de la peau, où une à deux épaisseurs de cellules les séparent. Un pH désirable devrait être voisin de celui du sang des poissons. La meilleure eau piscicole possède une réaction neutre à légèrement alcaline : pH compris entre 7,0 et 8,0. Donc, une eau contenant une réserve alcaline a un bon pouvoir tampon et est ainsi moins sujette aux variations de pH (Huet, 1970).

La Figure 2 illustre les limites de tolérance des salmonidés au pH de l'eau. Les pH recommandés doivent se situer entre les limites de 6,5 et 8,5 (SIGMA, 1983a). Les pH inférieurs ou supérieurs à ces limites sont débilitants pour les salmonidés, graduellement plus affectés à mesure que l'on s'en éloigne. Il a été démontré que les pH inférieurs à 5,5 diminuent la croissance, la production d'œufs et retardent l'ovulation chez l'omble de fontaine (Tam et Payson, 1986; Tam *et al.*, 1986). Le pH acide critique est voisin de 4,5 pour la plupart des poissons (Huet, 1970). La limite supérieure de pH serait de 9,2 pour les truites (Huet, 1970).

L'alcalinité de l'eau doit être au minimum de 20 mg/L pour assurer une bonne protection contre l'acidification de l'eau suite à l'accumulation du CO_2 rejeté par les poissons.

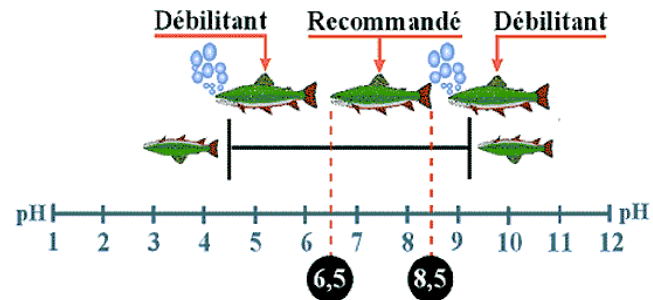


Figure 2 Limites de tolérance des truites au pH de l'eau

3.4 Dosage

L'alcalinité : Le dosage de l'alcalinité s'effectue par une analyse chimique, la titration.

Principes de la titration : Deux produits principaux sont utilisés dans une titration : un indicateur couleur et un titrant. L'indicateur couleur est ajouté à une quantité connue d'eau à analyser. Cet indicateur va changer de couleur à un pH connu, par exemple à 4,5 (bromocrésol vert-méthyl rouge) ou 8,3 (phénolphthaléine). Le changement de couleur est appelé point de virage.

Le titrant, un acide ou une base, est ensuite ajouté goutte à goutte dans l'échantillon d'eau coloré. Le titrant réagit chimiquement avec les composés présents dans l'eau à analyser. Quand tous les composés de l'eau sont neutralisés par le titrant, l'échantillon d'eau change de pH, et par conséquent, de couleur. Pour connaître la quantité de composés chimiques présents dans l'eau, déterminant par exemple son alcalinité ou sa dureté, il suffit de mesurer la quantité de titrant qui a été nécessaire pour effectuer le changement de couleur. Il faut ensuite appliquer une formule mathématique qui tient compte de la concentration du titrant et du volume d'eau qui a été analysé.

Titration de l'alcalinité : Les eaux naturelles ont le plus souvent un pH supérieur à 4,5. Elles sont donc alcalines par rapport à ce pH, et, par convention, l'alcalinité totale d'une eau est mesurée par la quantité d'acide nécessaire pour abaisser son pH à 4,5. Lorsque le pH est situé entre 4,5 et 8,3, l'indicateur couleur utilisé est le bromocrésol vert-méthyl rouge, et l'alcalinité est attribuable aux bicarbonates (HCO_3^-). À un pH supérieur à 8,3, la phénolphthaléine est utilisée comme indicateur, et l'alcalinité est attribuable aux carbonates (CO_3^{2-}) et aux hydroxydes (OH^-).

Particularités : Les délais d'expiration indiqués sur les sachets et contenants de réactifs fournis dans les trousse d'analyses de terrain doivent être respectés. Les trousse doivent par ailleurs être entreposées au sec entre 10 °C et 25 °C, pour maximiser la conservation des produits chimiques.

pH : Le pH de l'eau peut être déterminé par une méthode électrochimique (pH-mètre) et une méthode chimique (colorimétrie). La méthode colorimétrique est peu coûteuse et fréquemment utilisée sur le terrain. Elle se fait en choisissant des indicateurs dont les couleurs sont très dépendantes du pH. Les indicateurs colorés utilisés réagissent avec les ions H^+ disponibles pour atteindre un équilibre. Cet équilibre correspond à une certaine couleur dépendant du pH. Par exemple, le bleu de bromothymol présente une coloration jaune à pH 6,0 et une coloration bleue à pH 7,6. Une charte de couleur correspondant à l'échelle de pH se présente sous la forme d'un disque coloré utilisé comme comparateur. Il est important de noter que le disque comparateur est spécifique à une trousse de terrain et ne doit pas être utilisé dans une autre trousse.

Particularités : L'appréciation visuelle peut être difficile. L'éclairage doit être adéquat. Une surface

de fond blanche (feuille de papier, neige) facilite la lecture. Il est important d'effectuer l'analyse de l'échantillon d'eau dans les plus brefs délais, car les échanges gazeux impliquant la présence du gaz carbonique modifient le pH.

3.5 Moyens de contrôle

Plusieurs endroits au Québec recèlent la présence d'eau à tendance acide. Ce problème se manifeste principalement en association avec la fonte de la neige au printemps et lors de dégels subits en hiver. Les eaux ne disposant pas d'un pouvoir tampon élevé, soit une alcalinité $< 20 \text{ mg/l}$, sont fortement affectées par les pics d'acidité. On peut y observer une baisse du pH importante qui risque d'affecter les poissons.

Il existe la possibilité d'ajouter un produit alcalin dans l'eau pour remonter le pH. Cela se pratique principalement pour l'eau des écloseries et dans les étangs. Le carbonate de calcium (CaCO_3), appelé aussi la chaux agricole, est un excellent produit pour neutraliser le pH de l'eau. La chaux agricole est composée à 90 % de CaCO_3 et est vendue en poudre très fine qui se dissout lentement dans l'eau. Son usage est sécuritaire parce qu'elle ne permet pas d'élever le pH à plus de 7 ou 8. Il est aussi possible d'abaisser un pH trop élevé par l'ajout d'acide chlorhydrique (HCl) dans l'eau au moyen d'une pompe doseuse. Cette pratique est réalisable pour les petits débits d'une écloserie.

Le contrôle du pH est nécessaire dans les unités de production en circuit fermé, où le taux de renouvellement de l'eau est insuffisant pour maintenir sa stabilité. En effet, on y observe des baisses de pH consécutives à la production de CO_2 , résultant de la nitrification bactérienne de l'ammoniac à l'intérieur du filtre biologique et de la respiration des poissons. Il est donc nécessaire de remonter le pH au moyen de produits alcalins, tels que l'injection de lait de chaux par pompe doseuse par exemple.

3.6 Références

CCME (1987). Recommandations pour la qualité des eaux au Canada, Conseil canadien des ministres de l'Environnement, Documents du CCME, a/s Publications officielles du Manitoba, 200, rue Vaughan, Winnipeg (Man.) R3C 1T5 Canada, p. 6-1 et 6-2.

CHEMILLIER J. (1997). Des techniques simples pour équilibrer le pH des étangs, Aqua Revue (69) : 20-21.

HUET M. (1970). Traité de pisciculture, Éditions Ch de Wyngaert, Avenue Georges Henri, 296, 1 200 Bruxelles, p. 519-521.

TAM W.H., P.D. Payson (1986). Effects of chronic exposure to sublethal pH on growth, egg production, and ovulation in Brook Trout, *Salvelinus fontinalis*, Can. J. Fish Aquat. Sci., 43 : 275-280.

TAM W.H., P.D. Payson, R.J.J. Roy (1986). Retardation and recovery of growth in Brook Trout fry (*Salvelinus fontinalis*) exposed for various durations to acidified water, Can. J. Fish Aquat. Sci., 43 : 2 048-2 050.

SIGMA Environmental Consultants Ltd (1983). Summary of water quality criteria for salmonids fishes, Department of Fisheries and Oceans, SECL 8067, p. 49-58.

WURTS W.A., R.M. Durborow (1982). Interactions of pH, carbon dioxide, alkalinity and hardness in fish ponds, Southern Regional Aquaculture Center, U.S., Publication No. 464, 4 p.

4. Oxygène (O₂)

4.1 Nature et provenance

L'Oxygène (O₂) est un gaz. Il est présent dans l'eau et provient de deux sources :

- 1- la dissolution de l'O₂ provenant de l'air;
- 2- l'activité photosynthétique des algues et des plantes vertes.

1- Dissolution de l'O₂ de l'air

L'oxygène que les poissons respirent dans l'eau est l'oxygène gazeux (O₂), le même que tous les animaux terrestres respirent dans l'air. Ce gaz est en solution dans le liquide sous l'effet de la pression atmosphérique. La concentration de l'oxygène dans une eau, qui ne contient pas d'algues ou de plantes aquatiques, provient essentiellement d'une diffusion de l'oxygène de l'air dans l'eau. Cette diffusion est passive, obéit à la loi des gaz et résulte de la pression atmosphérique. Par rapport à l'air, l'eau est pauvre en oxygène. Un litre d'air contient 260 mg d'oxygène à la pression atmosphérique de 760 mm Hg, alors qu'un litre d'eau à 10 °C en contient 11,3 mg à la saturation, soit 23 fois moins (Figure 3).

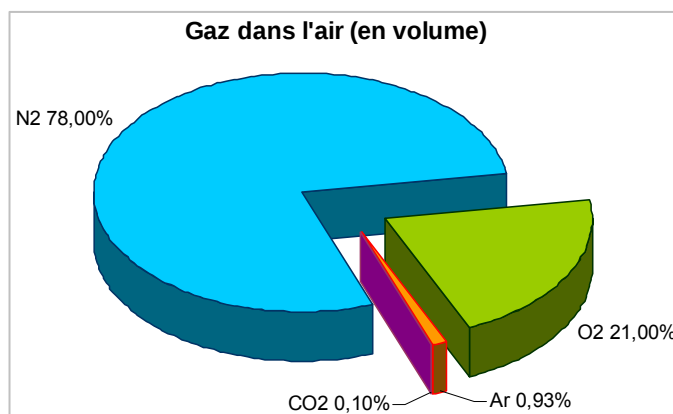
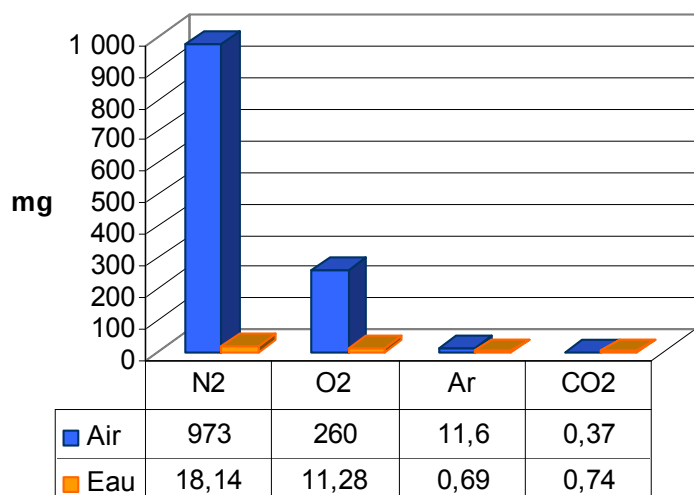


Figure 3 Concentration des gaz dans l'air et dans l'eau (mg/L) à la température de 10 °C et répartition volumétrique (%) des gaz dans l'air

Les facteurs qui influencent la dissolution de l'oxygène atmosphérique dans l'eau sont la température de l'eau, la pression barométrique et l'agitation de l'eau. La concentration d'oxygène à la saturation dans l'eau est inversement proportionnelle à la température de l'eau (Tableau 3). L'eau froide contient plus d'oxygène que l'eau chaude. La pression barométrique a aussi une influence, mais peu marquée par rapport

à la température de l'eau. Plus la pression barométrique est faible et moins elle peut faire diffuser d'oxygène dans l'eau. Cela se manifeste en altitude où la pression barométrique est plus faible qu'au niveau de la mer. La pression barométrique a peu d'influence au Québec parce que les entreprises piscicoles sont situées à des altitudes faibles par rapport au niveau de la mer. Il semble qu'une chute brutale de la pression

barométrique, avant un orage par exemple, entraînerait une diminution de la concentration en oxygène dans l'eau. L'agitation et le fractionnement de l'eau ont un effet marqué sur la diffusion de l'oxygène dans l'eau en favorisant les échanges gazeux entre l'eau et l'air. D'ailleurs, cela est mis à profit par plusieurs systèmes d'oxygénation tels que les aérateurs de surface, les cascades et les colonnes d'aération et dégazage.

2- L'activité photosynthétique

L'oxygène dissous dans l'eau peut aussi provenir de l'activité photosynthétique des algues et des plantes aquatiques. Cependant, l'effet des plantes sur la concentration d'oxygène dans l'eau n'est à considérer que pendant la saison de végétation et dans les étangs à faible taux de renouvellement de l'eau, où la prolifération des algues est importante. En général, le taux élevé de renouvellement de l'eau dans les unités intensives de production, qu'elles soient des bassins ou des étangs, ne permet pas une prolifération importante des algues et leur effet marqué sur la concentration de l'oxygène.

Tableau 3 Concentrations d'oxygène (mg/L) à la saturation dans l'eau distillée à la pression atmosphérique normale (760 mm Hg) selon la température de l'eau

Températures										
(°C)	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	14,64	14,61	14,57	14,53	14,49	14,45	14,41	14,37	14,33	14,29
1	14,25	14,21	14,17	14,13	14,09	14,05	14,03	13,98	13,94	13,90
2	13,86	13,82	13,79	13,75	13,71	13,68	13,64	13,60	13,56	13,53
3	13,49	13,46	13,42	13,38	13,35	13,31	13,28	13,24	13,20	13,17
4	13,13	13,10	13,06	13,03	13,00	12,96	12,93	12,89	12,86	12,82
5	12,79	12,76	12,72	12,69	12,66	12,62	12,59	12,56	12,53	12,49
6	12,46	12,43	12,40	12,36	12,33	12,30	12,27	12,24	12,21	12,18
7	12,12	12,11	12,08	12,05	12,02	11,99	11,96	11,93	11,90	11,87
8	11,84	11,81	11,78	11,75	11,72	11,70	11,67	11,64	11,61	11,58
9	11,55	11,52	11,49	11,47	11,44	11,41	11,38	11,35	11,33	11,30
10	11,27	11,24	11,22	11,19	11,16	11,14	11,11	11,08	11,06	11,03
11	11,00	10,98	10,95	10,93	10,90	10,87	10,85	10,82	10,80	10,77
12	10,75	10,72	10,70	10,67	10,65	10,62	10,60	10,57	10,55	10,52
13	10,50	10,48	10,45	10,43	10,40	10,38	10,36	10,33	10,31	10,28
14	10,26	10,24	10,22	10,19	10,17	10,15	10,12	10,10	10,08	10,06
15	10,03	10,01	9,99	9,97	9,95	9,92	9,90	9,88	9,86	9,84
16	9,82	9,79	9,77	9,75	9,73	9,71	9,69	9,67	9,65	9,63
17	9,61	9,58	9,56	9,54	9,52	9,50	9,48	9,46	9,44	9,42
18	9,40	9,38	9,36	9,34	9,32	9,30	9,29	9,27	9,25	9,23
19	9,21	9,19	9,17	9,15	9,13	9,12	9,10	9,08	9,06	9,04
20	9,02	9,00	8,98	8,97	8,95	8,93	8,91	8,90	8,88	8,86

4.2 Effets sur les poissons

L'oxygène ne présente aucune toxicité pour les poissons même à de très fortes concentrations. Il a été démontré en faisant des expériences avec l'O₂ pur que des concentrations aussi élevées que 40 mg/L ne présentaient aucun inconvénient pour les salmonidés. À l'inverse, une concentration insuffisante en oxygène dans l'eau affecte le poisson qui a de la difficulté à respirer. Il a été démontré qu'une concentration inférieure à 2 - 3 mg/L (20 - 30 % de la saturation) entraîne la mort des truites. Par ailleurs, bien avant d'atteindre la concentration létale, une concentration en oxygène insuffisante dans l'eau présente un problème pour la truite qui doit faire un effort pour

respirer. Il a été démontré par l'expérimentation que la concentration en oxygène dans l'eau doit être au moins de 65 % de la concentration à la saturation pour que la truite soit dans une bonne condition d'élevage. C'est une question de pression partielle du gaz dans l'eau, laquelle doit toujours être supérieure à 100 mm Hg pour que les échanges gazeux se fassent sans effort au niveau des branchies, la pression partielle de l'oxygène dans le sang du poisson étant d'environ 80 mm Hg.

4.3 Limites de tolérance des salmonidés

Il est recommandé que la concentration en oxygène de l'eau à la sortie des bassins et étangs

d'élevage soit toujours supérieure à 65 % de la concentration à la saturation.

4.4 Dosage

La concentration en oxygène peut être mesurée par une méthode chimique ou plus facilement à l'aide d'un appareil électronique (oxymètre). Plusieurs appareils étant disponibles sur le marché, il est important de suivre les instructions du fabricant pour le fonctionnement et la calibration de ces appareils.

4.5 Moyens de contrôle

On doit assurer la présence en permanence d'une concentration d'oxygène supérieure à 65 % de la saturation à la sortie des bassins d'élevage. Il est nécessaire d'oxygéner l'eau en pisciculture intensive afin de satisfaire à la consommation des poissons. Il existe une panoplie de moyens pour oxygéner l'eau, soit par aération ou introduction d'oxygène pur. La description de ces moyens est l'objet du document d'information : DADD-09 - Systèmes d'oxygénation en pisciculture.

Certaines pratiques piscicoles contribuent également à maintenir la concentration en oxygène suffisante dans les bassins. Le savoir-faire et l'expérience du pisciculteur à observer le comportement du poisson aident grandement à régulariser la consommation d'oxygène des poissons. La digestion des aliments et le stress sont deux facteurs qui font augmenter considérablement la consommation d'oxygène. Le pisciculteur doit adapter l'alimentation des poissons en prévision d'éviter de créer des pointes de consommation d'oxygène. Par exemple, il est préférable de distribuer les aliments en plusieurs petites rations plutôt que de donner de grosses portions, lesquelles entraînent une surconsommation d'oxygène. De même, le choix des moments de la journée a de l'importance pour distribuer les aliments. Il est préférable de nourrir tôt le matin et en fin de journée pendant les périodes chaudes de l'été. Le pisciculteur doit également observer le comportement du poisson pendant l'alimentation parce que l'apparition d'un problème de santé ou de détérioration de la qualité du milieu se traduit souvent par une baisse de l'appétit. L'alimentation doit alors être réduite aussitôt afin de préserver plus d'oxygène au poisson en difficulté.

5. Azote gazeux (N₂)

5.1 Nature et provenance

L'azote (N₂) est un gaz inerte, il n'intervient pas dans les processus biologiques. Cependant, il est le plus abondant de tous les autres gaz qui composent l'air, où il occupe 78 % du volume (Tableau 4). Il est soumis, comme les autres gaz de l'air que sont l'oxygène (O₂) et le dioxyde de carbone (CO₂), à une pression partielle qui le fait diffuser dans l'eau. Sa concentration est d'environ 18 mg/l dans l'eau à une température de 10 °C (Tableau 5). L'azote gazeux est présent dans n'importe laquelle eau. Il se retrouve dans l'eau de surface en situation d'équilibre, selon sa pression partielle dans l'air, comme les autres gaz. Cependant, il n'en va pas de même dans les eaux souterraines, où l'azote gazeux se retrouve le plus souvent en surconcentration par rapport aux eaux de surface. Cela est dû à la respiration des bactéries présentes dans le sol, lesquelles consomment l'oxygène de l'eau tout au long de son infiltration dans le sol. Or, cet oxygène consommé est remplacé en volume par de l'azote, qui lui n'est pas utilisé, et l'azote se retrouve ainsi en plus forte concentration dans l'eau souterraine.

L'utilisation de l'eau souterraine, de plus en plus abondante chez les pisciculteurs, est une source de surconcentration en azote gazeux dans les eaux d'élevage. Par ailleurs, certaines pratiques courantes en pisciculture, comme le pompage, le chauffage et l'aération sous pression de l'eau, entraînent un déséquilibre des gaz dissous, ce qui peut résulter également en une sursaturation des gaz totaux dissous, dont une sursaturation en azote. Les mécanismes principaux ont été décrits en détail par un auteur américain nommé Colt (Hussenot et Leclercq, 1987) :

- **l'entraînement des bulles** par tout procédé naturel ou technologique, comme les chutes, les cascades, les aérateurs, les conduites forcées, les tubes en U ou comme un incident de pompage par prise d'air à l'aspiration;
- **le chauffage de l'eau**, souvent utilisé à l'alevinage, provoque systématiquement une sursaturation de tous les gaz par la diminution de leur solubilité à température croissante. Ex. : une élévation de la température de l'eau de 5 °C à 12 °C crée une sursaturation totale des gaz de 118 %;
- **le mélange des eaux** de températures différentes, même si les deux eaux sont initialement à l'équilibre. Pour la même raison

que le chauffage direct de l'eau, le réchauffement d'une eau froide par une eau plus chaude entraîne la diminution de la solubilité des gaz dissous et ainsi une sursaturation;

- **la photosynthèse** qui se manifeste dans les étangs chargés d'algues vertes, en période de forte intensité lumineuse, entraîne de fortes productions d'oxygène dissous. Cela crée une sursaturation des gaz totaux dissous dû au surplus d'oxygène, lequel ne crée pas de problème pour le poisson. Cependant, la respiration des algues pendant la nuit créera un déficit important en oxygène, lequel peut être assez important pour affecter la respiration des poissons;
- **l'action des bactéries** peut modifier la concentration des gaz dissous. C'est le cas des eaux souterraines où la respiration des bactéries dans les couches supérieures du sol a diminué le niveau d'oxygène et augmenté celui de l'azote et du gaz carbonique.

5.2 Effets sur les poissons

Dans l'air comme dans l'eau, l'azote est respiré par les animaux et les poissons, c'est-à-dire qu'il diffuse dans le sang par le processus respiratoire. Cependant, il n'est pas utilisé dans leur métabolisme, à l'inverse de l'oxygène qui lui est consommé par l'activité métabolique. Les animaux et les poissons absorbent l'azote parce qu'ils respirent tous les gaz présents, le processus respiratoire n'étant pas sélectif au niveau des gaz absorbés. Les gaz pénètrent tous dans le sang des poissons par les branchies, par simple diffusion passive reliée à la différence de pression partielle de chacun de ces gaz entre l'eau et le sang.

L'azote se retrouve donc inévitablement dans le sang des poissons en concentration proportionnelle à sa pression partielle dans l'eau. Si l'azote est en sursaturation dans l'eau, il se retrouvera nécessairement en surconcentration dans le sang du poisson. Cela produit des mortalités chroniques légères et des signes cliniques variés : comportement anormal, présence de bulles visibles entre les rayons épineux des nageoires et yeux exorbités chez certains poissons. Des mortalités aiguës apparaissent dans des cas d'aggravation du phénomène : embolie gazeuse ou maladie de la bulle.

La concentration d'un gaz peut être exprimée par sa pression partielle et la sursaturation d'un seul gaz peut ne pas entraîner la maladie de la bulle si la somme des pressions partielles de tous les gaz

dans l'eau est inférieure ou égale à la pression barométrique – la somme des pressions partielles de tous les gaz dans l'air. La sursaturation gazeuse apparaît seulement lorsque la pression partielle de tous les gaz est supérieure à la pression barométrique (Hussenot et Leclercq, 1987).

5.3 Limites de tolérance des salmonidés

Idéalement, il est préférable que l'eau d'élevage ne recèle aucune sursaturation en azote gazeux. Cependant en pratique, il est difficile d'atteindre ce niveau de saturation exactement à 100 %. Les petits poissons, dont l'activité respiratoire est plus grande et les vaisseaux sanguins plus petits que les gros poissons, sont plus sensibles à la sursaturation en gaz. On recommande donc les niveaux maximums suivants en fonction de la taille des poissons :

- alevinage : 102 % $\Delta P = 15$ mm Hg;
- grossissement : 105 % $\Delta P = 38$ mm Hg.

5.4 Dosage

L'azote (N_2) est associé aux autres gaz présents dans l'air pour constituer la pression atmosphérique, laquelle varie selon l'altitude. Au niveau de la mer, elle est de 760 mm Hg (14,52 lbs/po²). Dans l'eau, on retrouve ces mêmes gaz, dont la pression totale est identique à celle de l'air à la saturation, soit 760 mm Hg. Dans l'air et dans l'eau, les pressions partielles de l'oxygène et de l'azote totalisent 743 mm Hg, soit près de 98 % de la pression atmosphérique. Lorsqu'il y a une sous-saturation ou une sursaturation de ces gaz dans l'eau, la pression totale dans l'eau est respectivement inférieure ou supérieure à 760 mm Hg. Comme l'eau n'est pas totalement imperméable à la diffusion des gaz, il y a un rétablissement de l'équilibre des pressions partielles entre les deux milieux avec le temps.

Une sursaturation en azote gazeux est déterminée en utilisant un manomètre à pression de grande précision (± 1 mm Hg), appelé tensionomètre, il mesure la pression totale des gaz dans l'eau. Cet appareil est constitué d'une sonde dans laquelle est enroulé un micro-tube très long, lequel est perméable aux gaz et imperméable à l'eau. La sonde est reliée à un boîtier électronique contenant un amplificateur de pression et un afficheur de la pression mesurée par la sonde. Le tensionomètre mesure la différence de pression de tous les gaz de l'eau ensemble par rapport à la pression atmosphérique du moment. Afin de déterminer la part de cette pression attribuable à l'azote gazeux

exclusivement, il faut connaître la pression atmosphérique du moment, la concentration en oxygène et la température de l'eau. Un calcul mathématique, réalisé à partir des données

recueillies et de tables de constantes, nous permet de déterminer le niveau de saturation en azote. Ce calcul se présente ainsi :

$$\text{Sursaturation en azote } N_2 (\%) = 100 \times \frac{Pa \pm \Delta P - ([O_2] \times (0,5318 / KBu)) - P_{vap}}{0,7902 (Pa - P_{vap})}$$

Pa : pression atmosphérique du moment, mesurée avec le tensionomètre (ex. = 750 mm Hg).

ΔP : différentiel de pression entre l'air et l'eau, lecture de l'appareil (ex. = + 25 mm Hg).

[O₂] : concentration d'oxygène de l'eau, mesurée avec un oxymètre (ex. = 9 mg/l, température = 10 °C).

KBu : coefficient de Bunsen, table de référence (ex. = 0,03816 à 10 °C).

Pvap : pression de vapeur d'eau, table de référence (ex. = 9,21 mm Hg à 10 °C).

$$\text{Sursaturation en azote } N_2 (\%) = 100 \times \frac{750 \pm 25 - (9 \times (0,5318 / 0,03816)) - 9,21}{0,7902 (750 - 9,21)}$$

$$\text{Sursaturation en azote } N_2 (\%) = 100 \times \frac{640,37}{585,37} = 109,4 \%$$

5.5 Moyens de contrôle

Les entreprises utilisant de l'eau souterraine, le plus souvent sursaturée en azote gazeux à la sortie du puits, ou qui chauffent l'eau, ce qui entraîne nécessairement une sursaturation gazeuse, doivent obligatoirement effectuer un dégazage préalablement à son utilisation. Une colonne d'aération-dégazage est tout indiquée pour effectuer ce travail. Il s'agit tout simplement d'un tuyau placé verticalement et ouvert à l'air libre aux deux extrémités. L'intérieur de la colonne doit être rempli sur une hauteur de 1,5 mètre d'un garnissage de matériaux poreux ayant pour fonction de fractionner l'eau et de la mettre en contact étroit avec l'air. Différents matériaux, offrant beaucoup d'espace libre par unité de volume, peuvent être utilisés comme garnissage : modules spécifiques (ex. : Telpac), des bouts de tuyau de plastique, du filet de plastique enroulé, ou autres. L'eau est amenée à l'extrémité supérieure de la colonne d'où elle s'écoule en chute libre. L'air s'introduit à l'extrémité inférieure de la colonne par un effet de cheminée. La colonne doit être dimensionnée selon le débit d'eau à traiter, à raison de 200-250 m³-h/m² de section d'écoulement.

Les techniques les plus couramment utilisées pour éliminer les sursaturations gazeuses en cours d'élevage, sont les cascades, les aérateurs de surface et le bullage produit par les diffuseurs.

5.6 Références

HUSSENOT J., D. Leclercq (1987). La sursaturation des gaz dissous, un phénomène souvent mal connu en aquaculture, Aqua Revue (11) : 27-31.

6. Dioxyde de carbone (CO₂)

6.1 Nature et provenance

Le dioxyde de carbone (CO₂) est un gaz. Il est présent dans l'eau et provient de deux sources :

- 1- la dissolution du CO₂ de l'air;
- 2- la respiration des poissons et des autres organismes vivants.

1- La dissolution du CO₂ de l'air

Le CO₂ de l'air diffuse dans l'eau sous l'influence de sa pression partielle dans l'air selon la loi des gaz. Les proportions en volume et les pressions partielles de chacun des gaz qui composent l'air sont données au Tableau 4. Le CO₂ est en très faible concentration dans l'air, c'est d'ailleurs le gaz le moins abondant. Il occupe 0,03 % seulement du volume de l'air et sa pression partielle n'y est que de 0,2 mm Hg sur les 760 mm Hg de pression totale.

La quantité de CO₂ que peut contenir l'eau est limitée par l'état de saturation. C'est la concentration maximale du gaz que peut contenir l'eau dans un état d'équilibre avec l'air, dépendant de la pression atmosphérique, de la température et de la salinité de l'eau (Tableau 5).

Tableau 4 Composition de l'air et pressions individuelles des gaz à la pression atmosphérique de 760 mm Hg et à la température de 10 °C

Gaz	Volumes (% dans air sec)	Pressions partielles (mm Hg)	Concentrations (mg/L)
Azote (N ₂)	78,1	586	973
Oxygène (O ₂)	21	157	260
Vapeur d'eau	NA	9	NA
Argon (Ar)	0,93	7	11,6
Dioxyde de carbone (CO ₂)	0,03	0,2	0,37
Total	100	760	1 245

Tableau 5 Concentrations à la saturation des gaz atmosphériques dissous dans l'eau douce à une température de 10 °C

Gaz	Pressions partielles (mm Hg)	Concentrations (mg/L)
Azote (N ₂)	586	18,14
Oxygène (O ₂)	157	11,28
Argon (Ar)	7	0,69
Dioxyde de carbone (CO ₂)	0,2	0,74
Total	750,2	30,85

La concentration de CO₂ dans l'eau en provenance de l'air est faible, elle n'est que de 0,74 mg/l à la saturation. La respiration des organismes vivants est une source beaucoup plus importante de CO₂ dans l'eau d'élevage.

2- Respiration des organismes vivants

La respiration des poissons et des autres organismes vivants, tels que les bactéries, en font des producteurs importants de CO₂ dans l'eau d'élevage. La production de CO₂ peut être calculée exactement par la consommation d'oxygène, sachant que 32 g d'oxygène consommé entraîne l'apparition de 44 g de CO₂ (Barnabé, 1986). Le CO₂ est 25 fois plus soluble que l'oxygène (O₂) dans l'eau parce qu'il s'y dissocie chimiquement, ce que ne font pas l'oxygène ni l'azote (N₂).

6.2 Effets sur les poissons

L'effet adverse du CO₂ sur les poissons se manifeste par une interférence dans le processus respiratoire lorsque sa concentration est trop élevée dans l'eau. L'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'eau entraîne son augmentation également dans le sang du poisson, ce qui en fait diminuer le pH. Cette acidification du sang fait diminuer la capacité de l'hémoglobine à transporter l'O₂ (SIGMA, 1983). La toxicité du CO₂ provient donc principalement de son influence sur le pH de l'eau et du sang. Le CO₂ est moins problématique pour l'élevage en présence d'une concentration élevée en O₂ et d'un bon pouvoir tampon de l'eau, soit une alcalinité >20 mg/L. Sa concentration peut augmenter jusqu'à 20 mg/L sans affecter les poissons si l'O₂ est abondant.

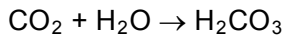
6.3 Limites de tolérance des salmonidés

La limite de tolérance des salmonidés se situe environ à 10 mg/L de CO₂ pour maintenir de bonnes conditions d'élevage (Belaud, 1996). Une concentration maximale de 20 mg/L de CO₂ devrait fournir une bonne protection pour les poissons tant que les concentrations en oxygène dissous sont élevées (SIGMA, 1983).

Nous avons réalisé des essais sur le transport de salmonidés en sacs remplis d'oxygène pur au Québec. Les résultats ont montré une augmentation graduelle du CO₂ jusqu'à des concentrations de 30 à 40 mg/L après 1 à 3 heures de rétention (Morin et Hansen, 1997). Malgré des concentrations aussi élevées, les ouananiches et les ombles de fontaine présents dans les sacs maintenus en mouvement par un brassage n'étaient pas affectés après une durée de 3 heures – le brassage des sacs favorise les échanges gazeux entre l'eau et l'atmosphère d'oxygène pur. Par contre, dans un des sacs maintenus immobiles, les ouananiches ont montré des signes évidents d'inconfort après que la concentration de CO₂ eut atteint 30 mg/L, en même temps que l'O₂ avait considérablement diminué dans l'eau de ce sac par rapport à ceux maintenus en mouvement. Il est bien évident que des concentrations aussi élevées, inévitables pendant le transport, ne sont pas acceptables dans les bassins d'élevage, et ne peuvent être supportées temporairement par les poissons qu'en présence d'une concentration élevée en oxygène.

6.4 Effets du CO₂ sur le pH de l'eau

Le CO₂ dissous dans l'eau se dissocie facilement et a un effet sur le pH. Cette transformation chimique du CO₂ s'appelle le système acide carbonique (H₂CO₃) - bicarbonate (HCO₃⁻) - carbonate (CO₃⁻²), lequel joue un rôle tampon qui contribue à stabiliser le pH de l'eau. Le CO₂ s'associe en premier avec la molécule d'eau pour former un acide faible appelé acide carbonique, selon la réaction suivante :



Ensuite, l'acide carbonique (H₂CO₃) se dissocie en bicarbonate (HCO₃⁻) et en carbonate (CO₃⁻²) en fonction du pH de l'eau, selon la réaction suivante :



Les proportions de chacune des formes : acide carbonique, bicarbonate et carbonate, en fonction du pH sont données au Tableau 6.

Tableau 6 Concentrations molaires en % de l'acide carbonique et des ions bicarbonate et carbonate selon le pH de l'eau

pH	H ₂ CO ₃ ↔ H ⁺ + HCO ₃ ⁻ ↔ H ⁺ + CO ₃ ⁻²		
	acide carbonique	bicarbonate	carbonate
6,0	75,8	24,2	0
6,5	49,7	50,3	0
7,0	23,6	76,4	0
7,5	8,8	91,2	0
8,0	3,0	96,7	0,3
8,5	1,0	98,1	0,9

L'acide carbonique (H₂CO₃) contribue à abaisser le pH de l'eau et à augmenter l'acidité. Le CO₂ se présente sous cette forme dans une proportion de 75,8 % à un pH de 6. Les proportions de l'acide carbonique (H₂CO₃) et de l'ion bicarbonate (HCO₃⁻) sont à peu près égales à 50 % à pH de 6,5. La forme bicarbonate (HCO₃⁻) prédomine dans une proportion de 76,4 % à pH=7. La forme carbonate (CO₃⁻²) n'est présente qu'à un pH très élevé, supérieur à 9.

6.5 Dosage

Le dosage du gaz carbonique peut s'effectuer par deux méthodes : une analyse chimique nécessitant une titration et l'utilisation d'un appareil électronique muni d'une sonde sensible à ce gaz uniquement. Sa concentration peut aussi être estimée au moyen d'un calcul nécessitant de

connaître les valeurs précises de l'alcalinité, du pH et de la température de l'eau.

Dosage chimique par titration : Les principes de la titration sont présentés dans la section du document portant sur le dosage de l'alcalinité. Puisque le gaz carbonique est volatil, il est important d'effectuer l'analyse de l'échantillon d'eau dans les plus brefs délais. Le point de virage auquel s'effectue le changement de couleur est difficile à déterminer.

Appareil électronique : Un appareil électronique portable (OxyGuard) a été conçu pour mesurer le CO₂ libre dissous dans l'eau. La sonde détecte précisément la pression partielle de ce gaz dans l'eau permettant d'en établir la concentration.

Méthode de calcul : Le CO₂ est à l'origine de l'équilibre acide carbonique (H₂CO₃) – bicarbonates (HCO₃⁻) – carbonates (CO₃⁻²) dans l'eau, dont la proportion de chacune des trois formes est en fonction du pH et de la température de l'eau. L'alcalinité est attribuable principalement aux bicarbonates (HCO₃⁻) dans les eaux d'élevage, le pH y étant toujours inférieur à 8,5 (Tableau 6). Son dosage permet d'établir la quantité de CO₂ présent sous cette forme dans l'eau et de calculer la quantité de CO₂ présent à l'état libre selon le pH et la température de l'eau.

6.6 Moyens de contrôle

Selon Belaud (1996) l'excrétion du CO₂ dans l'eau est rendue aisée par :

- une meilleure diffusion du CO₂ à travers les branchies et au sein de l'eau par rapport à l'oxygène (O₂);
- une meilleure solubilité du CO₂ dans l'eau, soit environ 25 fois plus soluble que l'oxygène;
- la conversion d'une partie du CO₂ excrété en bicarbonate et carbonate.

En pisciculture en circuit ouvert, on ne rencontre guère de problème avec le CO₂ produit par les poissons, si ce n'est dans les cas d'eaux acides, où les bicarbonates, quasiment inexistantes, ne peuvent jouer le rôle d'absorber l'acidité produite par ce gaz d'excrétion (Belaud, 1996). Par contre, les concentrations de CO₂ doivent être contrôlées dans les unités de production très intensives où l'oxygène pur est utilisé et dans les unités de recirculation et de filtration biologique (REFB) où l'eau est fortement réutilisée.

Les colonnes d'aération et de dégazage et les équipements d'aération et d'agitation mécanique sont efficaces à éliminer le CO₂.

6.7 Références

- BARNABÉ G. (1986). Aquaculture, Volume 1, Technique et Documentation - Lavoisier, 11 rue Lavoisier 75384, Paris, Cedex 08, ISBN 2-85206-302-6, 521 p.
- BELAUD A. (1996). Oxygénation de l'eau en aquaculture intensive, Cépaduès-Éditions, 111, rue Nicolas-Vauquelin, F31100 Toulouse, France. 207 p.
- MORIN R., L. Hansen (1997). Transport des poissons en sacs, Expérience réalisée au Centre écologique du Lac Saint-Jean le 19 février 1997. MAPAQ, 200, chemin Sainte-Foy, 12^e, Québec, G1R 4X6. 10 p.
- SIGMA Environmental Consultants Ltd (1983). Summary of water quality criteria for salmonids fishes, Department of Fisheries and Oceans, SECL 8067, p. 53-58.

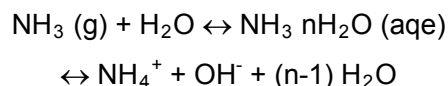
7. Ammoniac (NH₃-NH₄⁺), Nitrites (NO₂⁻), Nitrates (NO₃⁻)

7.1 Nature et provenance

L'ammoniac se présente sous deux formes dans l'eau, soit l'ammoniac gazeux non ionisé (NH₃) et l'ion ammonium (NH₄⁺). La forme NH₃ est un gaz incolore qui possède une odeur piquante bien distincte (CCME, 1987). La digestion des protéines, qui constituent 40 % à 50 % de l'aliment à salmonidés, produit ce résidu. La production d'ammoniac est donc directement dépendante de la quantité d'aliments servie aux poissons. Elle est d'environ 25 à 38 g/kg d'aliment (Speece, 1973 et Ontario Environment, 1990). Des données récoltées lors d'un échantillonnage réalisé pour caractériser les rejets piscicoles au Québec confirment ces valeurs, soit une concentration moyenne de 23,7 (8,3-33,3) g/kg d'aliments servis (Ouellet G., 1998). Il est à remarquer que la totalité

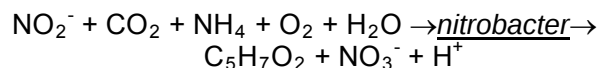
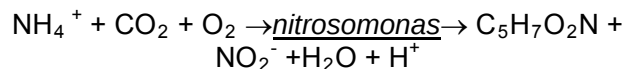
de l'ammoniac produit par les poissons se retrouve dans l'effluent piscicole. En effet, le renouvellement rapide de l'eau dans les structures de contention en production intensive ne permet pas la nitrification bactérienne de l'ammoniac.

Le gaz ammoniac est éliminé à 90 % par simple diffusion au niveau de l'épithélium branchial. L'ammoniac est très soluble dans l'eau, où la forme non ionisée (NH₃) est en équilibre avec l'ion ammonium (NH₄⁺) suivant l'équation :



Le terme « ammoniac total » désigne la somme des espèces ionisées et non ionisées. Les proportions de ces deux formes de l'ammoniac dans l'eau sont fonction du pH et de la température de l'eau (Tableau 7).

Les nitrites (NO₂⁻) et les nitrates (NO₃⁻) sont des formes oxydées de l'azote ammoniacal. Des bactéries aérobies oxydent l'ammoniac dissous dans l'eau pour les produire. Les bactéries du genre *nitrosomonas* transforment en premier l'ion ammonium (NH₄⁺) en nitrites (NO₂⁻) et ensuite les bactéries *nitrobacter* transforment à leur tour les nitrites (NO₂⁻) en nitrates (NO₃⁻). Le nitrate est la forme la plus stable de l'azote. Les équations suivantes montrent ces réactions de nitrification :



Le pH optimum pour la nitrification est d'environ 8,0 et l'activité diminue rapidement en dessous de pH 7,0 (CCME, 1987). La vitesse de nitrification est directement proportionnelle à la température de l'eau, les bactéries responsables préfèrent une température optimum de 30 °C.

Tableau 7 Proportion de NH_3 (%) dans une solution aqueuse d'ammoniac ($\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$) pour des températures de 0 °C à 20 °C et des pH entre 6,0 et 8,5

Température (°C)	pH					
	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5
0	,00827	,0261	,0826	,261	,820	2,55
1	,00899	,0284	,0898	,284	,891	2,77
2	,00977	,0309	,0977	,308	,968	3,00
3	,0106	,0336	,106	,335	1,05	3,25
4	,0115	,0364	,115	,363	1,14	3,52
5	,0125	,0395	,125	,394	1,23	3,80
6	,0136	,0429	,135	,427	1,34	4,11
7	,0147	,0464	,147	,462	1,45	4,44
8	,0159	,0503	,159	,501	1,57	4,79
9	,0172	,0544	,172	,542	1,69	5,16
10	,0186	,0589	,186	,586	1,83	5,56
11	,0201	,0637	,201	,633	1,97	5,99
12	,0218	,0688	,217	,684	2,13	6,44
13	,0235	,0743	,235	,738	2,30	6,92
14	,0254	,0802	,253	,796	2,48	7,43
15	,0274	,0865	,273	,859	2,67	7,97
16	,0295	,0933	,294	,925	2,87	8,54
17	,0318	,101	,317	,996	3,08	9,14
18	,0343	,108	,342	1,07	3,31	9,78
19	,0369	,117	,368	1,15	3,56	10,5
20	,0397	,125	,396	1,24	3,82	11,2

7.2 Effets sur les poissons

La toxicité de l'ammoniac provient de la partie non ionisée du produit qui est sous la forme NH_3 , l'ion ammonium (NH_4^+) n'étant pas toxique pour les poissons. Le poisson est d'autant plus sensible qu'il a des besoins respiratoires élevés. Les alevins sont ainsi plus sensibles que les gros poissons. Les conditions du milieu ont une grande influence, les températures élevées et les concentrations en oxygène faibles augmentent la sensibilité des poissons (Fauré, 1976).

L'ammoniac provoque l'irritation et la solidification des lamelles branchiales (Fauré, 1976). Cela emmène une diminution de la surface d'absorption des branchies, ce qui crée des problèmes respiratoires aux poissons. Le milieu ammoniacal est favorable au développement des myxobactéries, responsables de la maladie des branchies, et l'irritation des branchies crée un terrain favorable à l'implantation de ces bactéries. La présence d'un gel blanc à la surface des branchies dû à un apport supplémentaire de mucus au niveau des lamelles branchiales, l'écartement des ouïes et l'attrouplement des poissons à l'entrée d'eau sont caractéristiques de la maladie des branchies. De fortes concentrations en ammoniac entraînent la mort, alors que des concentrations sous-létales

entraînent des dommages aux branchies et une diminution de la croissance (SIGMA, 1983). Une réduction de la concentration en oxygène, de plus de 30 % en dessous du niveau de la saturation, augmente la toxicité aiguë et chronique de l'ammoniac.

La toxicité des nitrites est en fonction de la durée d'exposition des poissons et de leur taille (Fauré, 1996). À l'inverse de l'ammoniac, les alevins semblent plus résistants que les plus gros poissons aux nitrites. Les nitrites agissent en oxydant l'hémoglobine en méthémoglobine qui ne peut transporter l'oxygène. Le poisson a des troubles respiratoires qui entraînent la mort. Lors de cette oxydation, le sang vire à la couleur brun chocolat, ce qui rend aisé le diagnostic de cette toxicité.

7.3 Limites de tolérance des salmonidés

Les seuils de toxicité de l'ammoniac varient quelque peu selon les sources d'information. D'ailleurs, certains travaux ont démontré que la tolérance des poissons à l'ammoniac peut être augmentée avec une période d'habituation et une concentration élevée en oxygène. Il est recommandé que les concentrations d'ammoniac sous la forme toxique (NH_3) ne dépassent pas 0,003 mg/L pour les alevins et de 0,006 à

0,010 mg/L pour les plus gros poissons. Le Tableau 8 donne les concentrations maximales en ammoniac total ($\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$) que peut contenir

l'eau d'élevage pour différentes températures et pH, afin de ne pas dépasser le seuil toxique de 0,010 mg/L en ammoniac toxique (NH_3) :

Tableau 8 Concentrations maximales en ammoniac total ($\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$), selon les températures et pH de l'eau, pour ne pas dépasser le seuil toxique de 0,010 mg/L en ammoniac toxique (NH_3)

Température °C	pH				
	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5
0	38,3	12,1	3,8	1,22	0,39
5	25,3	8,0	2,5	0,81	0,26
10	17,0	5,4	1,7	0,55	0,18
15	11,6	3,7	1,2	0,38	0,13
20	8,0	2,5	0,8	0,26	0,09

(adapté de SIGMA, 1983)

Le seuil de toxicité pour les nitrites (NO_2^-) se situe à 0,1 mg/L. Les nitrates (NO_3^-) sont peu toxiques avec un seuil évalué à > 1 000 mg/L.

7.4 Dosage

L'azote ammoniacal (ammoniac) est dosé avec une précision acceptable par colorimétrie. La méthode colorimétrique au réactif de Nessler permet de mesurer des concentrations moyennes, comprises entre 0 et 5 mg/L environ. Le réactif de Nessler est un mélange, en milieu alcalin, d'iodure de potassium (KI) et d'iodure mercurique (HgI_2). En présence d'ammoniac, on obtient un composé jaune orangé.

Particularité : On recommande de maintenir la température de l'échantillon d'eau à 20 °C et d'allouer 15 minutes au développement de la couleur pour obtenir plus de précision du dosage. Les délais d'expiration indiqués sur les sachets et contenants de réactifs fournis dans les trousse d'analyses de terrain Hach doivent être observés autant que possible. Les trousse doivent par ailleurs être entreposées au sec entre 10 et 25 °C, pour maximiser la conservation des produits chimiques.

7.5 Moyens de contrôle

L'accumulation de l'azote ammoniacal est la contrainte la plus importante en pisciculture et plus particulièrement dans les eaux à pH élevé. Le procédé d'épuration par la nitrification bactérienne dans un filtre biologique n'est pas utilisable à grande échelle pour la production des salmonidés. C'est le problème de l'ammoniac qui impose de forts taux de renouvellement de l'eau en pisciculture (Belaud, 1996).

L'influence du rythme et de la fréquence des repas est capitale, l'idéal étant des nourrissages

fréquents afin d'éviter des pics d'excrétions importants d'ammoniac (Marie, 1983).

Un bon taux de renouvellement de l'eau et la propreté dans les bassins contribuent à diminuer les risques associés à l'ammoniac. La recirculation de l'eau oblige d'être particulièrement vigilant en regard de ce contaminant.

Une bonne oxygénation assure que les nitrites (NO_2^-) se transforment rapidement en nitrates non toxiques (NO_3^-).

7.6 Références

- BELAUD A. (1996). Oxygénation de l'eau en aquaculture intensive, Cepaduès-Éditions, 111, rue Nicolas-Vauquelin, F31100 Toulouse, France. 207 p.
- CCME (1987). Recommandations pour la qualité des eaux au Canada. Conseil canadien des ministres de l'Environnement, Documents du CCME, a/s Publications officielles du Manitoba, 200, rue Vaughan, Winnipeg (Man.) R3C 1T5 Canada, p. 6-12 et 6-18.
- FAURÉ A. (1976). Bases de la gestion de l'eau en salmoniculture intensive, La Pisciculture Française (46) :11-54.
- MARIE D. (1983). Toxicité des composés azotés en salmoniculture, La Pisciculture Française (72) :43-48.
- Ontario Environment (1990). Aquaculture wastewater treatment : Wastewater characterization and development of appropriate treatment technologies for the Ontario trout production industry, 110 p.
- OUELLET G. (1998). Caractérisation des eaux usées de stations piscicoles québécoises,

MAPAQ, Direction de l'innovation et des technologies. 35 p.

SPEECE R.E. (1973). Trout metabolism characteristics and the rational design of nitrification facilities for water reuse in hatcheries, Trans. Amer. Fisher. Soc. (2) : 323-334.

SIGMA Environmental Consultants Ltd (1983). Summary of water quality criteria for salmonids fishes, Department of Fisheries and Oceans, SECL 8067, p. 36-48.

8. Solides en suspension (MES)

8.1 Nature et provenance

Les solides en suspension (MES) proviennent de deux sources, ils peuvent être déjà présents dans l'eau d'approvisionnement de la station piscicole et sont inévitablement produits par l'élevage. Les eaux de surface et principalement les cours d'eau, encore plus que les lacs, sont susceptibles de transporter des MES. Les périodes de dégel s'accompagnent de crues et entraînent un transport considérable de particules en suspension dans la plupart des cours d'eau. Les eaux souterraines sont filtrées par le sol et sont ainsi généralement exemptes de MES.

Dans l'élevage, l'excrétion des fèces par les poissons et les restes d'aliments non consommés (10 % à 15 %) constituent une source constante de MES. Une partie des solides peut se solubiliser en proportion variable dépendant principalement du temps de séjour dans l'eau. La masse produite des MES représente environ 200 à 400 g/kg de nourriture fournie (Ontario Environment, 1990). Les échantillonnages réalisés au Québec pour caractériser les rejets piscicoles ont permis de déterminer que les MES représentaient 170 (70-300) g/kg de nourriture fournie dans les effluents en amont de l'étang de sédimentation (Ouellet, 1998). Comparativement à l'ammoniac qui se retrouve en totalité dans l'effluent piscicole, une partie des MES est sédimentée tout au long de son parcours dans les bassins d'élevage et ne se retrouve plus dans ce dernier.

8.2 Effets sur les poissons

Les œufs en incubation dépendent des échanges gazeux au niveau de la coquille pour leur approvisionnement en O₂ et l'élimination du CO₂ et de l'ammoniac, ils ont besoin d'une eau limpide qui ne laisse pas de dépôts à la surface de l'œuf (SIGMA, 1983). Autrement, l'accumulation impor-

tante de particules solides sur les œufs peut entraîner leur suffocation. Par ailleurs, le dépôt de MES sur les œufs dans les équipements d'incubation affecte la circulation homogène de l'eau à travers les œufs en créant des zones de courants préférentielles. Ces particules diminuent aussi l'efficacité des traitements contre les champignons, le produit ne pouvant pas atteindre la surface de l'œuf. Les MES peuvent également servir de substrat pour la croissance d'organismes nuisibles dans l'incubateur.

Les structures fines des branchies de petits poissons sont plus sensibles à la contamination et au colmatage par les solides en suspension. Les gros poissons supportent mieux la présence de ces particules.

8.3 Limites de tolérance des salmonidés

On donne ainsi deux niveaux de tolérance aux MES pour les salmonidés, soit un seuil très bas pour les œufs et alevins et l'autre plus élevé pour les plus gros poissons. SIGMA (1993) a retenu les seuils suivants à la suite d'une revue de littérature :

- incubation et alevinage : 3 mg/L;
- grossissement : 25 mg/L.

Un seuil de 80 mg/L est aussi publié dans plusieurs tableaux se rapportant aux critères de qualité de l'eau pour l'élevage des salmonidés.

Les seuils létaux seraient très élevés pour les salmonidés, de l'ordre de 270 mg/L pendant 2 à 12 semaines et de quelque 2 000 mg/L pour une période de 4 jours (SIGMA, 1983). La nature des MES pourrait avoir une certaine importance dans le niveau de tolérance des poissons.

8.4 Dosage

Le dosage précis des MES est fait en laboratoire. Il consiste en une filtration à 1,2 µ (microns) suivie d'une dessiccation à 105 °C jusqu'à l'obtention d'un poids constant.

8.5 Moyens de contrôle

La sédimentation des MES, tout au long du processus d'élevage, contribue grandement à diminuer leur concentration. Les bassins rectangulaires, les auges d'alevinage et les étangs en terre favorisent la sédimentation. Les bassins autonettoyants de type circulaire pour le grossissement ou les petits bassins suédois pour l'alevinage sont autonettoyants et ne retiennent

pas les MES. Il faut donc prévoir des équipements pour la filtration des MES entre les paliers avec l'utilisation de ces bassins.

Les pratiques piscicoles relatives à la distribution des aliments et à l'entretien des bassins sont également d'une grande importance pour diminuer la présence des MES dans l'eau d'élevage. Les pertes d'aliments non consommés par les poissons et le manque d'entretien des bassins contribuent grandement à la détérioration de la qualité de l'eau.

8.6 Références

- Ontario Environment (1990). Aquaculture wastewater treatment : Wastewater characterization and development of appropriate treatment technologies for the Ontario trout production industry, 110 p.
- OUELLET G. (1998). Caractérisation des eaux usées de stations piscicoles québécoises, MAPAQ, Direction de l'innovation et des technologies. 35 p.
- SIGMA Environmental Consultants Ltd (1983). Summary of water quality criteria for salmonids fishes, Department of Fisheries and Oceans, SECL 8067, p. 59-64.

9. Fer (Fe^{+2} – Fe^{+3})

9.1 Nature et provenance

Le fer (Fe) est un métal. Il existe sous deux formes ioniques dans l'eau :

- 1- ferreux (réduit ou dissous) : Fe^{+2} ;
- 2- ferrique (oxydé ou précipité) : Fe^{+3} .

Dans l'eau de surface bien oxygénée, le fer se retrouve sous la forme précipitée (Fe^{+3}). Dans l'eau souterraine, la forme dissoute (Fe^{+2}) est la plus abondante. L'eau de surface contient généralement < 0,5 mg/l de fer, mais l'eau souterraine peut en contenir beaucoup plus. Plusieurs sortes de roches enfouies dans le sous-sol peuvent contenir du fer qui est libéré par le lessivage de l'eau souterraine. La résurgence ou le pompage de cette eau ramène le fer dissous en surface.

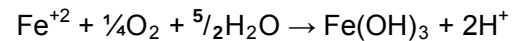
L'ion ferrique (Fe^{+3}) est moins soluble, il précipite et produit les taches rougeâtres que l'on observe à l'intérieur de la plomberie et sur les parois des bassins d'élevage. À de fortes concentrations, le fer peut provoquer une activité bactérienne dans les conduites et sur certains équipements tels que les colonnes d'aération-dégazage. En effet, des bactéries filamenteuses croissent sur le fer, elles

prennent la forme d'un amas gélatineux de couleur rouille.

La solubilité du fer dans l'eau augmente quand le pH diminue, les eaux acides sont donc plus susceptibles de contenir du fer.

9.2 Effets sur les poissons

Le fer à l'état ferreux (Fe^{+2}) soluble, se présente peu sous cette forme dans l'eau d'élevage piscicole parce que l'oxygénation intensive le transforme rapidement par oxydation sous la forme ferrique (Fe^{+3}) précipitée.



La forme précipitée du fer (Fe^{+3}) n'est pas toxique, mais elle affecte le métabolisme du poisson. Son effet adverse provient de l'interférence qu'il fait au niveau de la respiration (SIGMA, 1983). En effet, ce métal précipité se dépose sur les œufs et les branchies sous la forme de particules fines. Il colmate ainsi les pores de la membrane de l'œuf et l'épithélium des branchies, ce qui a pour effet de faire interférence aux échanges gazeux. Le fer détériore aussi les branchies par abrasion, lesquelles deviennent vulnérables à des infections secondaires par des bactéries et des champignons. Plus les structures des branchies sont fines et plus elles sont fragiles et faciles à colmater, or les petits poissons (alevins) sont plus sensibles à la présence des fines particules de fer dans l'eau et supportent des concentrations moins élevées que les gros poissons.

9.3 Limites de tolérance des salmonidés

La limite de tolérance des salmonidés au fer est de :

- 0,3 mg/L pour les alevins;
- 0,5 mg/L pour les gros poissons.

9.4 Dosage

La méthode de dosage la plus utilisée pour le fer est colorimétrique.

Principes de la méthode d'analyse colorimétrique :
Elle consiste à ajouter un produit réagissant chimiquement avec le fer présent dans l'eau à analyser pour former un complexe coloré. L'intensité de la coloration obtenue est directement proportionnelle à la quantité de fer présent dans l'eau dont on désire connaître la teneur. Plus la quantité de fer est importante et plus la coloration orangée est foncée.

Colorimétrie du fer : Le fer ferreux (Fe^{+2}) donne, avec le composé chimique orthophénanthroline, un complexe rouge orangé. Le fer ferrique (Fe^{+3}) est transformé en fer ferreux (Fe^{+2}) par l'ajout d'un agent réducteur, afin de permettre le dosage du fer total.

Particularité : Il est recommandé de laisser l'échantillon d'eau se réchauffer à 20 °C pour permettre le développement complet de la couleur. Les trousse d'analyse doivent être entreposées au sec entre 10 et 25 °C pour maximiser la conservation des produits chimiques.

9.5 Moyens de contrôle

Il n'y a pas de moyen de contrôle ou d'élimination du fer qui soit utilisable de façon rentable en pisciculture. Tout au plus de l'eau légèrement ferreuse peut être utilisée en conjonction avec d'autre eau qui ne l'est pas, ce qui diminue la concentration en fer. Le fer présent dans l'eau à l'entrée de la station piscicole va diminuer de concentration tout au long de son parcours dans les bassins d'élevage parce qu'il précipite graduellement sous l'effet de l'oxydation ($\text{Fe}^{+2} \rightarrow \text{Fe}^{+3}$). Cependant, il se dépose sur tout substrat baigné par l'eau incluant les bassins, la tuyauterie, les œufs et les branchies des poissons.

Les procédés qui existent dans l'industrie pour l'élimination du fer sont trop coûteux et trop contraignants pour utiliser en pisciculture. La méthode la plus simple consiste à faire précipiter le fer en milieu alcalin et à l'extraire ensuite de l'eau par décantation ou par filtration. Cette technique a déjà été expérimentée dans une station piscicole québécoise en 1988. Elle consiste à faire passer l'eau dans un récipient pour l'aérer de manière à transformer le fer ferreux (Fe^{+2}) en fer ferrique (Fe^{+3}), en présence d'une concentration de chaux hydratée ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) qui augmente le pH de l'eau à > 8,5. Les ions hydroxyde (OH^-) libérés par la chaux dissociée s'associent au Fe^{+3} pour former du $\text{Fe}(\text{OH})_3$ qui précipite fortement. La décantation et/ou la filtration enlèvent ensuite facilement le précipité. Le pH doit ensuite être ramené à un niveau acceptable pour l'élevage par l'addition d'un acide dans l'eau.

9.6 Références

SIGMA Environmental Consultants Ltd (1983). Summary of water quality criteria for salmonids fishes. Department of Fisheries and Oceans, SECL 8067, pp. 121-124.

10. Manganèse ($\text{Mn}^{+2} - \text{Mn}^{+4}$)

10.1 Nature et provenance

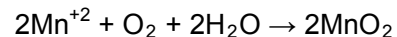
Le manganèse (Mn) est un métal dont le comportement chimique est semblable à celui du fer et il se trouve fréquemment avec celui-ci (McNeely *et al* 1980). Il peut exister à l'état :

- 1- manganoux (dissous): Mn^{+2} ;
- 2- manganique (précipité): Mn^{+4} .

Les concentrations de manganèse dans les eaux de surface naturelles atteignent rarement 1,0 mg/L; elles sont habituellement inférieures ou égales à 0,2 mg/L (CCME, 1987). Le manganèse est présent dans les eaux souterraines comme ion bivalent (Mn^{+2}) en raison de l'absence d'oxygène souterrain. Dans les eaux de surface, cette forme s'oxyde rapidement en dioxyde de manganèse (Mn^{+4}), qui a tendance à sédimenter, et forme des taches de couleur noire.

10.2 Effets sur les poissons

La toxicité du manganèse, à l'instar de celle du fer, est reliée à l'état dissous ou précipité du métal. La forme dissoute (Mn^{+2}) est beaucoup plus toxique, mais comme pour le fer l'oxydation rapide du manganèse dans une eau bien oxygénée favorise la forme précipitée (Mn^{+4}) moins toxique.



Il a été démontré par ailleurs que la forme dissoute du manganèse, à la différence du fer dissous, provoque une diminution du sodium sanguin chez le poisson (Gonzalez *et al.*, 1990). En effet, cela est provoqué par une compétition entre le manganèse et le calcium au niveau des sites d'absorption du calcium de l'épithélium branchial. Ce dérèglement du sodium suggère que ce puisse être le mode d'action principal entraînant la mort du poisson aux doses de toxicité aiguës du manganèse (Health, 1995).

10.3 Limites de tolérance des salmonidés

Bien que plusieurs tableaux de référence sur les qualités physico-chimiques de l'eau recommandées pour l'élevage des salmonidés fixent un seuil maximum de 0,01 mg/L pour ce métal, il n'est pas si toxique en pisciculture à cause de la prédominance de la forme oxydée (Mn^{+4}) dans l'eau d'élevage bien oxygénée.

Lewis (1976) a montré que des œufs de truite arc-en-ciel exposés à des concentrations de

manganèse de 1, 5 et 10 mg/L pendant toute la période d'incubation ont présenté des taux de mortalité respectifs de 12 %, 22 % et 30 %. Davies et Brickman (1994) ont déterminé à la suite d'expériences sur une période de 4 mois des seuils de toxicité chroniques de 0,8 et 2,7 mg/L de manganèse, respectivement pour la truite arc-en-ciel et la truite brune. Par ailleurs, nous connaissons des entreprises piscicoles qui fonctionnent sans trop de problèmes avec des concentrations de manganèse de 0,3 à 0,5 mg/L dans leur eau d'élevage.

10.4 Dosage

La méthode d'oxydation au périodate donne un dosage simple et rapide pour des concentrations élevées de manganèse, mais elle est également utilisée pour mesurer des concentrations extrêmement faibles (HACH, 1982). L'analyse est faite en oxydant le manganèse en ion permanganate violet foncé (MnO_4^-) et en mesurant l'intensité de cette coloration.

10.5 Moyens de contrôle

Il n'y a pas de moyen de contrôle ou d'élimination du manganèse qui soit utilisable de façon rentable en pisciculture. Le procédé de traitement est analogue à celui décrit pour le fer, lequel peut éliminer les deux métaux en même temps. Cependant, le manganèse est généralement plus difficile à éliminer que le fer parce qu'il est plus difficile à oxyder et des agents oxydants doivent être utilisés (CCME, 1987).

10.6 Références

- CCME (1987). Recommandations pour la qualité des eaux au Canada. Conseil canadien des ministres de l'Environnement, Documents du CCME, a/s Publications officielles du Manitoba, 200, rue Vaughan, Winnipeg (Man.) R3C 1T5 Canada, pp. 1-9 à 1-10 et 6-47 à 6-48.
- DAVIS P.H., S.F. Brinkman (1994). Acute and chronic toxicity of manganese to exposed and unexposed Rainbow trout and Brown trout, Water pollution studies, Colorado Division of Wildlife, Federal Aid Project #F-243R-1.
- GONZALES R.J., R.S. Grippo, W.A. Dunson (1990). The disruption of sodium balance in brook charr by manganese and iron, Journal of Fish Biology 37 : 765-774.
- HACH (1982). Manuel analyse de l'eau.

HEALTH A.G. (1995). Water pollution and fish physiology, Lewis Publishers, ISBN 0-87371-632-9, 359 pages, p. 157.

LEWIS M. (1976). Effects of low concentrations of manganese sulfate on eggs and fry of rainbow trout, The Progressive Fish Culturist 38(2) : 63-65.

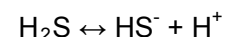
MCNEELY R.N., V.P. Neimanis, L. Dwyer (1980). Référence sur la qualité des eaux, Guide des paramètres de la qualité des eaux, Direction générale des eaux intérieures, Direction de la qualité des eaux, Ottawa. ISBN 0-662-91073-7.

11. Sulfure d'hydrogène (H_2S)

11.1 Nature et provenance

Le sulfure d'hydrogène (H_2S) est un composé gazeux soluble, très toxique, à odeur caractéristique d'œufs pourris (McNeely *et al.*, 1980). Il provient de la décomposition anaérobie – en l'absence d'oxygène – des matières organiques, des algues et des boues d'eaux usées. Il est rarement présent dans les eaux de surface parce qu'elles sont habituellement aérobiques et les sulfures présents y sont oxydés inévitablement en sulfates (Wedemeyer, 1996). Par contre, les eaux souterraines peuvent receler des concentrations naturelles jusqu'à 10 mg/L (Wedemeyer, 1996). La décomposition anaérobie de la matière organique par les bactéries du sol est la principale source du sulfure d'hydrogène dans les eaux naturelles (Wedemeyer, 1996).

Le sulfure d'hydrogène se dissocie dans l'eau en fonction du pH et de la température suivant l'équation suivante :



Il est ainsi présent sous les deux formes : moléculaire (H_2S) et ionisée (HS^-). La proportion du sulfure d'hydrogène sous chacune de ces deux formes est en fonction du pH de la température de l'eau. La proportion de H_2S toxique présente augmente plus l'eau froide et acide. À la température de 15 °C, 94 % du sulfure d'hydrogène est sous la forme H_2S à un pH de 6, alors que seulement 12 % est sous cette forme à un pH de 8. Au pH de 7,0, fréquemment rencontré dans les stations piscicoles au Québec, de 51 % à 65 % du sulfure d'hydrogène est sous la forme moléculaire toxique (H_2S).

Tableau 9 Proportion du sulfure d'hydrogène sous la forme moléculaire (H₂S) selon le pH et la température de l'eau

pH	Températures (°C)			
	10	15	20	25
5,0	> 99	99	99	99
6,0	97	94	92	91
7,0	65	59	55	51
8,0	14	12	11	9
9,0	< 1	1	1	1

Tiré de Wedemeyer (1996)

11.2 Effets sur les poissons

La toxicité du sulfure d'hydrogène est causée par la forme moléculaire (H₂S), et dépend du pH, de la température et de l'oxygène dissous. Le sulfure d'hydrogène pénètre rapidement l'épithélium des branchies et exerce ses effets toxiques en bloquant la capacité des cellules à utiliser l'oxygène (Wedemeyer, 1996). Le résultat net est une hypoxie semblable à l'effet d'une réduction importante de l'oxygène dissous. Les poissons exposés à des concentrations létales de sulfure d'hydrogène dissous montrent en premier une augmentation du taux de ventilation, pour ensuite cesser de ventiler, la mort suit en dedans de quelques minutes (Wedemeyer, 1996). La toxicité augmente quand les concentrations en oxygène dissous de l'eau diminuent. Cependant, même une eau saturée en oxygène ne prévient pas la mortalité et les concentrations en sulfure d'hydrogène supérieures à 0,5 mg/L sont fortement létales pour la plupart des poissons adultes sans égard à l'espèce (Wedemeyer, 1996).

11.3 Limites de tolérance des salmonidés

Le seuil de toxicité (CL-50 / 96 heures) pour la truite arc-en-ciel et l'omble de fontaine se situe à moins de 0,02 mg/L (Smith *et al.*, 1976). Le seuil à ne pas dépasser pour n'avoir aucun effet sur la croissance, la survie et la reproduction serait de moins de 0,006 mg/L pour les deux espèces (Smith *et al.*, 1976; Smith et Oseid, 1972). Par ailleurs, l'élévation de la température de l'eau diminue la résistance des poissons à la toxicité du H₂S (Smith *et al.*, 1976) et les faibles concentrations en oxygène dans l'eau augmentent les effets adverses du H₂S (Smith et Oseid, 1972).

Présentement, la limite maximale d'exposition sécuritaire recommandée par l'Environmental Protection Agency (EPA) est de 0,002 mg/L pour les poissons et les autres organismes aquatiques dans les eaux naturelles. Cependant, les poissons d'eau froide avec de forts taux de consommation

d'oxygène, et les œufs et les alevins de la plupart des espèces, sont particulièrement sensibles et peuvent être affectés par des concentrations de H₂S aussi faibles que 0,001 mg/L (Wedemeyer, 1996). Pour cette raison, un niveau d'exposition plus bas de 0,001 mg/L de H₂S est recommandé pour être plus prudent avec les poissons d'eau tiède et d'eau chaude dans des conditions de production intensive (Tucker, 1993). Afin d'éviter les coûts élevés de pertes de production, n'importe laquelle concentration mesurable de H₂S doit être considérée comme un problème potentiel et des mesures doivent être prises pour l'enlever (Wedemeyer, 1996).

Des essais expérimentaux réalisés au Québec dans le but d'évaluer l'efficacité de méthodes d'élimination du sulfure d'hydrogène dissous dans l'eau ont permis d'observer un taux de survie de 100 % des ombles de fontaine exposés pendant 66 jours à une concentration moyenne de 0,015 mg/L à la température moyenne de 8 °C (Chouinard, 2007).

11.4 Dosage

L'odorat peut détecter des concentrations de sulfure d'hydrogène aussi faibles que 0,000 01 à 0,000 1 mg/L (Rand *et al.*, 1976), soit bien inférieures aux limites toxiques. Il faut nécessairement procéder à des analyses chimiques pour déterminer si les concentrations de sulfure d'hydrogène dans l'eau dépassent les limites toxiques pour les poissons.

Le sulfure d'hydrogène est déterminé dans les sources d'approvisionnement en eau en mesurant la concentration des sulfures totaux par une analyse chimique et ensuite en calculant la concentration de H₂S en fonction du pH et de la température (Wedemeyer, 1996). La méthode colorimétrique au bleu de méthylène est la plus couramment utilisée.

11.5 Moyens de contrôle

Le sulfure d'hydrogène peut être enlevé de l'eau par l'aération qui le volatilise dans l'atmosphère, mais l'expulsion est relativement lente parce que le H₂S est très soluble (Wedemeyer, 1996). Les colonnes d'aération munies de soufflantes testées dans les piscicultures au Québec pour éliminer le sulfure d'hydrogène dans l'eau d'élevage n'en réduisent pas significativement la concentration. Deux autres méthodes ont été testées au Québec pour l'enlèvement du sulfure d'hydrogène dans l'eau destiné à l'élevage piscicole : une unité de

filtration à charbon activé et un biofiltre sur support inorganique (BPR, 2007). Les deux méthodes se sont avérées efficaces à réduire le sulfure d'hydrogène en deçà du seuil recommandé de 0,002 mg/L, mais leur coût d'implantation s'avère très élevé.

11.6 Références

BPR (2007). Démonstration technologique pour le traitement des sulfures dans l'eau d'alimentation d'un centre piscicole, Rapport d'essais pour le Centre de développement bioalimentaire du Québec inc., N/Réf. : M31-06-13, 22 pages.

CHOUINARD M. (2007). Incidence de la concentration en sulfures de l'eau d'alimentation de diverses origines sur le taux de mortalité et sur la croissance de l'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*), Centre de développement bioalimentaire du Québec (CDBQ). Rapport du bioessai, Février 2007, 25 pages + annexes.

MCNEELY R.N., V.P. Neimanis, L. Dwyer (1980). Référence sur la qualité des eaux, Guide des paramètres de la qualité des eaux, Direction générale des eaux intérieures, Direction de la qualité des eaux, Ottawa. ISBN 0-662-91073-7.

RAND M.C., A.E. Greenberg, M.J. Taras (1976). Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater, American Public Health Association, Washington DC, pp. 499, 506-507.

SIGMA Environmental Consultants Ltd (1983). Summary of water quality criteria for salmonids fishes, Department of Fisheries and Oceans, SECL 8067, pp. 65-68.

SMITH L.L., D.M. Oseid (1972). Effects of hydrogen sulfide on fish eggs and fry, Water Research Pergamon Press 6 : 711-720.

SMITH L.L. *et al.* (1976). Effect of hydrogen sulfide on fish and invertebrates, Part I : Acute and chronic toxicity studies, University of Minnesota, St-Paul, Minnesota, 283 pages.

TUCKER C.S. (1993). Water analysis, Pages 166-167 in M. Stoskopf (ed.), Fish Medicine, W.B. Saunders, Philadelphia, Pennsylvania.

WEDEMEYER G.A. (1996). Physiology of fish in intensive culture systems, Chapman & Hall, ISBN 0-412-07801-5.

12. Synthèse des paramètres de la qualité de l'eau pour l'élevage des salmonidés

Le Tableau 10 collige les limites de tolérance des salmonidés, dans des conditions d'élevage, aux différents paramètres physico-chimiques de l'eau. L'élevage des salmonidés est possible quand même en présence de certains paramètres physico-chimiques de l'eau légèrement au-delà de ces seuils, mais il faut considérer alors que les performances de la production en seront affectées.

Tableau 10 Critères de qualité de l'eau pour l'élevage des salmonidés

Groupes	Paramètres	Limites de tolérance
Acides et bases	Température (°C)	2 - 8 reproduction et incubation 6 - 13 alevinage 5 - 18 grossissement
	pH	6,5 - 8,5
	Alcalinité (mg/L de CaCO ₃)	≥ 20 - 400
	Dureté (mg/L de CaCO ₃)	10 - 500
Gaz	Oxygène (O ₂) (%)	65 - 100
	Azote gazeux (N ₂) (%)	< 102 alevinage < 105 grossissement
	Dioxyde de carbone (CO ₂) (mg/L)	< 12
	Sulfure d'hydrogène (H ₂ S) (mg/L)	< 0,002
Composés azotés	Ammoniac (NH ₃) (mg/L)	< 0,003 alevinage < 0,006 - 0,0125 grossissement
	Nitrites (NO ₂ ⁻) (mg/L)	< 0,1
	Nitrates (NO ₃ ⁻) (mg/L)	< 100 - 200
Métaux	Aluminium (Al) (mg/L)	< 0,1
	Cadmium (Cd) (mg/L)	< 0,004
	Cuivre (Cu) (mg/L)	< 0,006 si alcalinité < 100 mg/L < 0,03 si alcalinité > 100 mg/L
	Fer (Fe) (mg/L)	< 0,3 alevinage < 0,5 grossissement
	Manganèse (Mn) (mg/L)	< 0,5-0,8
	Mercure (Hg) (mg/L)	< 0,002 - 0,1
	Nickel (Ni) (mg/L)	< 0,01 - 0,02
	Plomb (Pb) (mg/L)	< 0,03
	Zinc (Zn) (mg/L)	< 0,005 - 0,03
Solides	Solides en suspension (MES) (mg/L)	< 80

Référence à citer : Morin, R. (2012). « Qualité de l'eau requise pour l'élevage des salmonidés ». Document d'information DADD-14. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. 25 p. <http://www.mapaq.gouv.qc.ca/Fr/Pêche>

Pour signaler des modifications, contactez : Nadia Tremblay, technicienne en administration
Direction de l'aquaculture et du développement durable
200, chemin Sainte-Foy, 11^e étage
Québec (Québec) G1R 4X6
nadia.tremblay@mapaq.gouv.qc.ca
Téléphone : 418 380-2100 poste 3868
Télécopieur : 418 380-2194