

TABLE DES MATIÈRES

| | Page |
|--|------|
| INTRODUCTION | 1 |
| CHAPITRE 1 ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE | 5 |
| 1.1 La pisciculture au Québec..... | 5 |
| 1.1.1 Généralités | 5 |
| 1.1.2 Les techniques d'élevage des salmonidés en eau douce..... | 6 |
| 1.1.3 Production piscicole au Québec..... | 7 |
| 1.1.4 Débit d'eau utilisé en pisciculture au Québec..... | 8 |
| 1.2 Les systèmes piscicoles en circuit recirculé d'eau..... | 9 |
| 1.2.1 Les types de piscicultures à système recirculé d'eau..... | 10 |
| 1.2.2 Avantages et désavantages des piscicultures à système recirculé d'eau... | 10 |
| 1.2.3 Paramètres de qualité de l'eau dans une pisciculture à système de recirculation d'eau | 12 |
| 1.3 Caractérisation des effluents piscicoles | 13 |
| 1.3.1 Les rejets liés au poissons | 13 |
| 1.3.2 Rejets liés au système d'élevage..... | 15 |
| 1.4 Traitement des effluents piscicoles..... | 16 |
| 1.4.1 Généralités | 16 |
| 1.4.2 Traitement des eaux piscicoles par filtration | 16 |
| 1.4.3 Traitement des eaux piscicoles par décantation..... | 17 |
| 1.4.4 Traitement des eaux piscicoles par ozonation | 17 |
| 1.5 Ozonation..... | 18 |
| 1.5.1 Propriétés et structure de l'ozone..... | 19 |
| 1.5.2 Toxicité de l'ozone | 20 |
| 1.5.3 Décomposition de l'ozone dans l'eau douce | 21 |
| 1.5.4 Mécanisme de réaction de l'ozone..... | 22 |
| 1.5.5 Génération de l'ozone | 23 |
| 1.5.6 Mécanisme de transfert de l'ozone | 24 |
| CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE..... | 25 |
| 2.1 Description de la pisciculture..... | 25 |
| 2.2 Échantillonnage des eaux piscicoles..... | 26 |
| 2.3 Essais Ozonation..... | 27 |
| 2.3.1 Configuration du pilote d'ozonation..... | 27 |
| 2.3.2 Expériences d'ozonation..... | 29 |
| 2.4 Détermination des paramètres d'ozone..... | 29 |
| 2.4.1 Concentration d'ozone dans l'eau..... | 30 |
| 2.4.2 Concentration d'ozone dans le gaz | 31 |
| 2.5 Détermination des paramètres physiques de l'eau..... | 33 |
| 2.5.1 Oxygène dissous OD..... | 33 |
| 2.5.2 Potentiel d'oxydoréduction POR | 33 |

| | | |
|---|--|----|
| 2.5.3 | Solides en suspension SES, solides en suspension volatils SESV, solides dissous SD et solides dissous volatils SDV | 34 |
| 2.5.4 | Turbidité..... | 35 |
| 2.6 | Détermination des paramètres chimiques de l'eau | 36 |
| 2.6.1 | pH..... | 36 |
| 2.6.2 | Ions bromures Br ⁻ | 36 |
| 2.6.3 | Carbone total CT, carbone organique total COT, carbone organique dissous COD et carbone inorganique total CIT | 37 |
| 2.6.4 | Demande chimique en oxygène DCO..... | 38 |
| 2.6.5 | Demande biochimique en oxygène DBO ₅ | 38 |
| 2.6.6 | Azote ammoniacal | 39 |
| 2.6.7 | Phosphore total et du phosphore total soluble | 39 |
| 2.6.8 | Nitrates..... | 40 |
| 2.6.9 | Alcalinité..... | 40 |
| CHAPITRE 3 RÉSULTATS..... | | 43 |
| 3.1 | Caractérisation des eaux piscicoles..... | 43 |
| 3.2 | Bilan d'ozone | 48 |
| 3.3 | Effet de l'ozonation sur les paramètres physiques des eaux piscicoles | 52 |
| 3.3.1 | Suivi du potentiel d'oxydoréduction POR..... | 52 |
| 3.3.2 | Effet de l'ozonation sur les solides et la turbidité..... | 53 |
| 3.4 | Effet de l'ozonation sur les paramètres chimiques des eaux piscicoles..... | 56 |
| 3.4.1 | Suivi de pH | 56 |
| 3.4.2 | Suivi de la demande chimique en oxygène DCO | 57 |
| 3.4.3 | Suivi de la demande biologique en oxygène DBO ₅ | 58 |
| 3.4.4 | Effet de l'ozonation sur le carbone total CT, le carbone inorganique total COT et le carbone inorganique total CIT | 60 |
| 3.4.5 | Effet de l'ozonation sur l'alcalinité..... | 62 |
| 3.4.6 | Suivi des nitrates..... | 63 |
| CHAPITRE 4 DISCUSSION..... | | 65 |
| 4.1 | Montage d'ozonation et dosage d'ozone | 65 |
| 4.2 | Ozonation et qualité de l'eau | 66 |
| 4.3 | Perspectives..... | 68 |
| CONCLUSION..... | | 71 |
| RECOMMANDATIONS | | 73 |
| LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... | | 75 |

LISTE DES TABLEAUX

| | Page |
|-------------|---|
| Tableau 1-1 | Les débits d'eau (m ³ /h) exploités en pisciculture9 |
| Tableau 1-2 | Avantages et inconvénients des piscicultures en circuit recirculé11 |
| Tableau 1-3 | Conditions de la qualité de l'eau requise pour l'élevage12 |
| Tableau 1-4 | Conditions de la qualité de l'eau requise pour l'élevage (Suite)12 |
| Tableau 1-5 | Caractéristiques physico-chimiques de l'ozone.....19 |
| Tableau 2-1 | Les paramètres physiques de l'eau étudiés et les matériels et méthodes d'analyses35 |
| Tableau 2-2 | Les paramètres chimiques de l'eau analysés et les méthodes d'analyse ..40 |
| Tableau 2-3 | Les paramètres chimiques de l'eau analysés (Suite).....41 |
| Tableau 3-1 | Résultats de l'analyse par chromatographie ionique des ions bromures dans les eaux piscicoles43 |
| Tableau 3-2 | Résultats de l'analyse par chromatographie ionique des ions bromures dans les eaux piscicoles (Suite)43 |
| Tableau 3-3 | Les caractéristiques chimiques des eaux piscicoles.....45 |
| Tableau 3-4 | Les caractéristiques physiques des eaux piscicoles46 |
| Tableau 3-5 | Les caractéristiques physiques des eaux piscicoles (Suite)47 |

LISTE DES FIGURES

| | Page |
|------------|--|
| Figure 1.1 | Production piscicole au Québec entre 1980 et 2011 (Morin, 2007)8 |
| Figure 1.2 | Les rejets piscicoles liés au poissons14 |
| Figure 1.3 | Structure de résonance de l'ozone (Peleg, 1976)20 |
| Figure 1.4 | Différentes modalités d'interaction de l'ozone dans une solution aqueuse.....21 |
| Figure 1.5 | Mécanisme de réaction de l'ozone.....22 |
| Figure 1.6 | Réactions de l'ozone en eau pure.....23 |
| Figure 1.7 | Réactions de l'ozone en eau avec la présence de solutés M.....23 |
| Figure 2.1 | Schéma représentatif de la circulation de l'eau dans la pisciculture Gilbert26 |
| Figure 2.2 | Schéma représentatif du pilote d'ozonation utilisé au laboratoire.....28 |
| Figure 2.3 | Schéma représentatif du réacteur d'ozone avec les flux associés.....30 |
| Figure 2.4 | Réaction du Carmin Indigo avec l'ozone.....30 |
| Figure 2.5 | Appareil de chromatographie ionique de marque Dionex36 |
| Figure 2.6 | Analyseur de marque TELEDYNE TEKMAR,.....38 |
| Figure 3.1 | Bilan de l'ozone au cours d'ozonation de l'eau d'alevinage48 |
| Figure 3.2 | Bilan de l'ozone au cours d'ozonation de l'eau d'élevage49 |
| Figure 3.3 | Ozone consommé au cours de l'ozonation des eaux d'alevinage.....50 |
| Figure 3.4 | Ozone consommé au cours d'ozonation des eaux d'élevage.....51 |
| Figure 3.5 | Évolution du POR au cours de l'ozonation des eaux piscicoles.....52 |
| Figure 3.6 | Évolution des solides au cours de l'ozonation des eaux d'alevinage53 |
| Figure 3.7 | Évolution des solides au cours de l'ozonation des eaux d'élevage54 |
| Figure 3.8 | Évolution de la turbidité au cours de l'ozonation des eaux piscicoles55 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Figure 3.9 | Évolution du pH au cours d'ozonation des eaux piscicoles..... | 56 |
| Figure 3.10 | Évolution de la DCO au cours de l'ozonation des eaux piscicoles | 58 |
| Figure 3.11 | Évolution de la DBO ₅ au cours d'ozonation des eaux piscicoles | 59 |
| Figure 3.12 | Évolution du CT, COT et CIT au cours de l'ozonation des eaux d'alevinage..... | 60 |
| Figure 3.13 | Évolution du CT, COT et CIT au cours de l'ozonation des eaux d'élevage..... | 61 |
| Figure 3.14 | Évolution de l'alcalinité au cours de l'ozonation des eaux piscicoles..... | 62 |
| Figure 3.15 | Évolution des nitrates au cours de l'ozonation des eaux piscicoles..... | 63 |

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

| | |
|---------------------------------|--|
| Ag ₂ SO ₄ | Sulfate d'argent |
| ACF | Action Contre la Faim |
| APHA | American public health association |
| AWWA | American water works association |
| Br ⁻ | Ions bromures |
| CEAEQ | Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec |
| C _{ge} | Concentration d'ozone dans l'air entrant |
| C _{gs} | Concentration d'ozone dans l'air sortant |
| CIT | Carbone inorganique total |
| CL ₀ | Concentration d'ozone dissous dans l'eau |
| CMA | Concentration maximale admissible |
| CO ₂ | Dioxyde de carbone |
| COD | Carbone organique dissous |
| --COOH | Groupement carboxyle |
| COT | Carbone organique total |
| CT | Carbone total |
| DBO ₅ | Demande biochimique en oxygène pendant 5 jours |
| DCO | Demande chimique en oxygène |
| D _m | Débit massique |
| D _v | Débit volumique |
| G | Débit gazeux |
| H ⁺ | Ion hydrogène |

XVIII

| | |
|---|---|
| HgSO ₄ | Sulfate de mercure |
| H ₂ O ₂ | Peroxyde d'hydrogène |
| H ₂ S | Sulfure d'hydrogène |
| H ₂ SO ₄ | Acide sulfurique |
| I ₂ | Molécule de diiode |
| K ₂ Cr ₂ O ₇ | Bichromate de potassium |
| KI | Iodure de potassium |
| L | Débit liquide |
| MAPAQ | Ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation |
| N ₂ | Azote gazeux |
| Na ⁺ | Ion sodium |
| NaOH | Hydroxyde de sodium |
| Na ₂ S ₂ O ₃ | Thiosulfate de sodium |
| NH ₃ | Ammoniac |
| NO ₂ ⁻ | Nitrites |
| NO ₃ ⁻ | Nitrates |
| O ₂ | Dioxygène |
| O ₃ | Ozone |
| [O ₃] | Concentration d'ozone |
| OD | Oxygène dissous |
| OH• | Radical hydroxyle |
| ONU | Organisation des nations unies |
| ONUAA | Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture |

| | |
|---|--|
| PAO | Procédé avancé d'oxydation |
| pH | Potentiel hydrogène |
| POC | Pêches et Océans Canada |
| POR | Potentiel d'oxydoréduction |
| P _T | Phosphore total |
| P _{TS} | Phosphore total soluble |
| SAF | Sulfate d'ammonium et de fer |
| SAR | Système d'aquaculture en recirculation |
| SES | Solides en suspension |
| SDT | Solides totaux dissous |
| SDV | Solides totaux dissous volatils |
| SMEWW | Standard methods for the examination of water and wastewater |
| S ₄ O ₆ ²⁻ | Ion tétrathionate |
| S ₂ O ₃ ²⁻ | Ion thiosulfate |
| SST | Solides totaux en suspension |
| SSV | Solides totaux en suspension volatils |
| STD | Standard |
| STEPPE | Station expérimentale des procédés pilotes en environnement |
| STRADDAQ | Stratégie de développement durable de l'aquaculture en eau douce au Québec |
| UV | Ultra-violet |
| WEF | Water Environment Federation |

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

| | |
|--------------------|------------------------------------|
| % | Pourcentage |
| °C | Degré celsius |
| d | Jour |
| g/L | Gramme par litre |
| kg/L | Kilogramme par litre |
| kJ | Kilojoule |
| M | Molarité |
| m ³ /kg | Mètre au cube par kilogramme |
| mg/L | Milligramme par litre |
| mg/min | Milligramme par minute |
| min | Minute |
| mL | Millilitre |
| mL/min | Millilitre par minute |
| mol/L | Mole par litre |
| mV | Millivolt |
| N | Normalité |
| nm | nanomètre |
| ppm | Partie par million |
| ppb | Partie par billion |
| V | Volt |
| UTN | Unité de turbidité néphelométrique |
| µg/L | Microgramme par litre |

INTRODUCTION

La démographie est assurément l'un des enjeux majeurs de notre siècle. Alors qu'un milliard d'êtres humains souffrent déjà de malnutrition, la population mondiale ne cesse de croître, pour atteindre environ 8,6 milliards d'ici 2030 et 9,8 milliards de personnes en 2050 (Organisation des Nations unies, 2017). Dans le même temps, l'agriculture, qui ne parvient plus à nourrir toute la population, contribue de façon importante aux problèmes environnementaux mondiaux comme les changements climatiques en rejetant 24 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GEIC, 2014 ; Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture, 2016), la dégradation des terres, la pollution de l'eau et la perte de biodiversité.

Plusieurs recherches et des rapports scientifiques tels que ceux d'ONUAA et de FAO ont été capables de créer de nouveaux modèles agricoles permettant de doubler la production alimentaire mondiale tout en s'adaptant à la raréfaction des ressources naturelles, en particulier la terre, l'eau et les nutriments et en réduisant les déchets et les émissions des gaz à effet de serre.

Dans le monde entier, la diminution des populations de poissons sauvages due à la surexploitation et à la pollution de l'eau, ainsi que la demande croissante du public pour des aliments sains, savoureux et abordables a favorisé l'élevage des poissons dans des fermes.

La pisciculture (élevage des poissons dans des conditions contrôlées) est devenue un secteur essentiel de la production des produits de la mer et des eaux douces. Cette industrie a deux branches : L'élevage des poissons destinés au marché de la table afin d'approvisionner les besoins de la population humaine et l'élevage de poissons destinés au marché de l'ensemencement afin de reconstituer les stocks déficients de certains plans d'eau et rivières (ONUAA, 2016). Selon le rapport d'ONUAA (2016), la pisciculture assurera près des deux tiers de la production mondiale de poisson destiné à l'alimentation d'ici 2030, compte tenu de la stabilisation des prises de poissons sauvages et de la demande croissante de la population en nourriture.

Malgré la contribution importante de l'aquaculture comme source importante d'approvisionnement en poissons pour la consommation humaine et l'ensemencement, de nombreuses contraintes environnementales limitent l'expansion de cette industrie. Des lignes directrices applicables aux piscicultures restreignent les débits d'eau pouvant être utilisés à partir des cours d'eau de surface, en plus d'imposer des concentrations maximales des rejets de certains polluants, comme le phosphore et les matières en suspension (MES), présents dans les effluents piscicoles (Morin, 2007).

L'avènement des nouvelles contraintes réglementaires, tel que la restriction des débits d'eau pouvant être utilisés à partir des cours d'eau par les pisciculteurs, visant la protection de l'environnement aquatique et de la ressource en eau oblige à repenser la production piscicole dans son ensemble et à l'adapter à ces nouvelles réalités. Les pays producteurs des poissons recourent de plus en plus à mettre en œuvre la pisciculture à système de recirculation d'eau. Cette technique d'aquaculture offre des avantages potentiels par rapport aux formes d'aquaculture traditionnelles. Ceux-ci comprennent, en plus d'un meilleur contrôle de l'environnement, la flexibilité dans la sélection du site, l'amélioration de la productivité des entreprises (Read, 2008 ; Pfeiffer et al., 2008) tout en réduisant la consommation d'eau et d'énergie (Bullock et al., 1997 ; Kim, 2000 ; Bai, 2007). Au Québec, ces techniques d'élevage sont utilisées par les entreprises piscicoles, mais à différents niveaux d'intensité de recirculation (ou de réutilisation) de l'eau (Morin, 2007).

La production des poissons dans les systèmes d'aquaculture en recirculation (SAR) peut accumuler des matières organiques particulières (aliments non consommés, fèces, micro-organismes (bactéries et algues), etc.) et de la matière organique dissoute. Ces particules en suspension irritent les branchies et le tissu externe des poissons ; se dégradent dans l'eau, contribuant aux déchets toxiques d'azote ; et peuvent héberger des bactéries pathogènes et des algues toxiques (Bullock et al., 1997). Pour ces raisons, les procédés de traitement (bassins de décantation, biofiltres) sont des composants essentiels des systèmes de pisciculture en recirculation afin d'éliminer les particules (Kuhn et al., 2017). Cependant, même avec la mise en œuvre de ces procédés de traitement, les solides en suspension ne sont pas complètement éliminés et s'accumuleront dans les systèmes aquacoles (King, 2001). De plus, le maintien des

poissons, tels que les salmonidés, en bonne santé dans un système de recirculation nécessite l'entretien des eaux d'élevage en bonne qualité tels que l'établissement de niveaux adéquats d'oxygène dissous, l'élimination des déchets solides et une nitrification suffisante de l'ammoniac (King, 2001 ; Ebeling & Timmons, 2009). Par contre, les procédés de traitement couramment utilisées en pisciculture peuvent ne pas suffire à entretenir les eaux d'élevage en conditions favorables pour l'élevage des poissons (King, 2001).

Le recours à des méthodes alternatives, afin de maintenir la qualité de l'eau d'élevage des poissons tout en protégeant l'environnement aquatique et les ressources en eau, s'avère donc nécessaire. Les méthodes alternatives consistent essentiellement à utiliser un agent oxydant, tel que l'ozone (Tango & Gagnon, 2003 ; Read, 2008). Cet oxydant a été largement utilisé en aquaculture car il a une vitesse de réaction rapide, il produit peu de sous-produits de réaction nocifs dans l'eau douce et il se transforme en oxygène comme produit final de réaction.

Dans ce contexte, cette étude vise essentiellement à évaluer l'efficacité de l'ozonation sur la qualité physicochimique de l'eau piscicole à système de recirculation d'eau.

Après l'introduction générale, le développement de ce rapport se divise en quatre chapitres. Le premier chapitre est une étude bibliographique. Il permet de mettre le projet de recherche dans son cadre théorique, et ainsi, de le situer par rapport aux connaissances dans le domaine. Le deuxième chapitre porte sur la méthodologie, l'ensemble du matériel, les outils et les méthodes expérimentales utilisés afin d'évaluer l'efficacité de l'ozonation sur la qualité physicochimique de l'eau piscicole à système de recirculation d'eau. Les résultats obtenus ainsi que les analyses et les interprétations de ces résultats sont ensuite présentés au troisième chapitre. Le quatrième chapitre est consacré à la discussion de l'étude. Finalement, les grandes lignes de cette étude sont présentées au niveau de la partie de la conclusion.

CHAPITRE 1

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Ce chapitre présente les principaux concepts nécessaires à la compréhension de l'étude. Les termes clés associés aux systèmes d'élevage en recirculation et à l'ozonation y sont exposés. Il permet de mettre le projet de recherche dans son cadre théorique, et ainsi, de le situer par rapport aux connaissances dans le domaine.

1.1 La pisciculture au Québec

1.1.1 Généralités

Face à la demande toujours croissante des produits de la mer, l'activité de la pêche est complétée par l'aquaculture ; technique d'élevage des êtres vivants aquatiques (des poissons, des crustacés, de coquillage, des algues, etc.) dans des bassins ou en mer qui offre des avantages tels que le suivi de certains paramètres et la sélection des espèces aquatiques (ONUAA, 1997). Spécialisée dans l'élevage de poissons en eaux douces, saumâtres ou salées, la pisciculture est une des branches de l'aquaculture. Les types de piscicultures dépendent généralement de l'espèce de poissons élevés, de la nature d'eau, de la quantité de poisson produit par unité de surface et de la destination des produits. Selon la quantité de poisson produit par unité de surface et les pratiques d'alimentation, il existe généralement trois types de pisciculture (Action Contre la Faim & Association de spécialistes œuvrant pour le développement et l'application des connaissances sur les poissons et les relations Homme-Nature, 2008) :

- Les piscicultures à systèmes de production piscicole extensifs : elles se reposent sur la productivité naturelle de l'environnement. Les poissons se nourrissent presque complètement à partir de la production biologique du milieu ;
- Les piscicultures à systèmes de production piscicole semi-intensifs : elles sont basées sur l'utilisation d'une fertilisation ou sur l'emploi d'une alimentation complémentaire, de plus

qu'une partie importante de l'alimentation du poisson est fournie in situ par le milieu naturel ;

- Les piscicultures à systèmes intensifs et super intensifs : dans ce type de pisciculture, tous les besoins alimentaires des poissons sont satisfaits par l'apport exogène d'aliments, avec pas ou très peu d'apports nutritionnels issus de la productivité naturelle du bassin ou du plan d'eau dans lequel le poisson est élevé.

Les poissons élevés au niveau des piscicultures sont destinés ; soit au marché de la table (la consommation humaine) ; soit à l'ensemencement dans les milieux aquatiques naturels.

1.1.2 Les techniques d'élevage des salmonidés en eau douce

L'élevage des poissons en eau douce se déroule généralement en 4 étapes de la manière suivante (MAPAQ, 2002) :

- Fécondation et incubation

La laitance des mâles et les œufs des femelles sont prélevés sur les poissons reproducteurs puis mélangés. Le développement embryonnaire des poissons se fait dans les incubateurs ;

- Éclosion

L'éclosion termine la période d'incubation et dure en moyenne entre 1 à 2 semaines selon la température de l'eau. Les œufs donnent naissance aux alevins que l'on commence à alimenter lorsque leur vésicule vitelline est presque résorbée ;

- Alevinage

L'alevinage commence généralement un mois et demi après l'éclosion. La phase d'alevinage et de pré-grossissement dure environ 9 mois. Les poissons passent progressivement du stade «alevin» (5-10 g) au stade «adulte» (170 g) ;

- Élevage

Au cours de cette phase, les poissons peuvent être placés dans des bassins extérieurs. Ils y poursuivent leur croissance jusqu'à leur taille de commercialisation :

- 200 à 250 g (pour 10 à 12 mois d'élevage) ;

- 1 kg (18 mois d'élevage);
- 2 kg (> à 2 ans d'élevage).

La densité de peuplement des bassins est déterminée en fonction de l'espèce, de la taille des poissons et de la qualité de l'eau : elle est adaptée à leurs besoins tout au long de leur cycle de vie.

1.1.3 Production piscicole au Québec

Caractérisé par sa richesse en eaux, le Québec présente de nombreux atouts pour l'élevage de poissons. En 1857, la pisciculture est née au Québec visant à produire des poissons afin de satisfaire les besoins grandissants de la pêche sportive (Morin, 2007). L'élevage des poissons destinés au marché de la table est plus récent et a commencé dans les années 1980 (Morin, 2012). Les salmonidés représentent les principales productions de la pisciculture québécoise dont l'omble de fontaine et la truite arc-en-ciel sont les deux plus importantes espèces élevées (Pêches et Océans Canada, 2012).

Une succession de programmes d'aide financière du MAPAQ en 1980, 1986 et 1992 ont contribué à l'expansion de la pisciculture. La production, qui était de 310 tonnes en 1980, a ainsi augmenté pour atteindre la barre des 2 000 tonnes pendant les années 1997 à 2000. La production a régressé par la suite jusqu'à 1 250 tonnes en 2011. L'évolution de la production piscicole au Québec depuis 1980 jusqu'à 2011 est présentée à la figure 1.1.

Le resserrement des contraintes environnementales envers l'industrie de la pisciculture, principalement dû aux rejets de phosphore dans les cours d'eau, a entraîné la fermeture de plusieurs entreprises de production importantes. Une entente – stratégie de développement durable de l'aquaculture en eau douce au Québec (STRADDAQ) - ratifiée par les pisciculteurs, le MAPAQ et le MDDEP, qui constitue un engagement des entreprises piscicoles à améliorer leurs performances environnementales sur un horizon de 10 ans, a permis de consolider les entreprises en place et de cesser la diminution de la production.

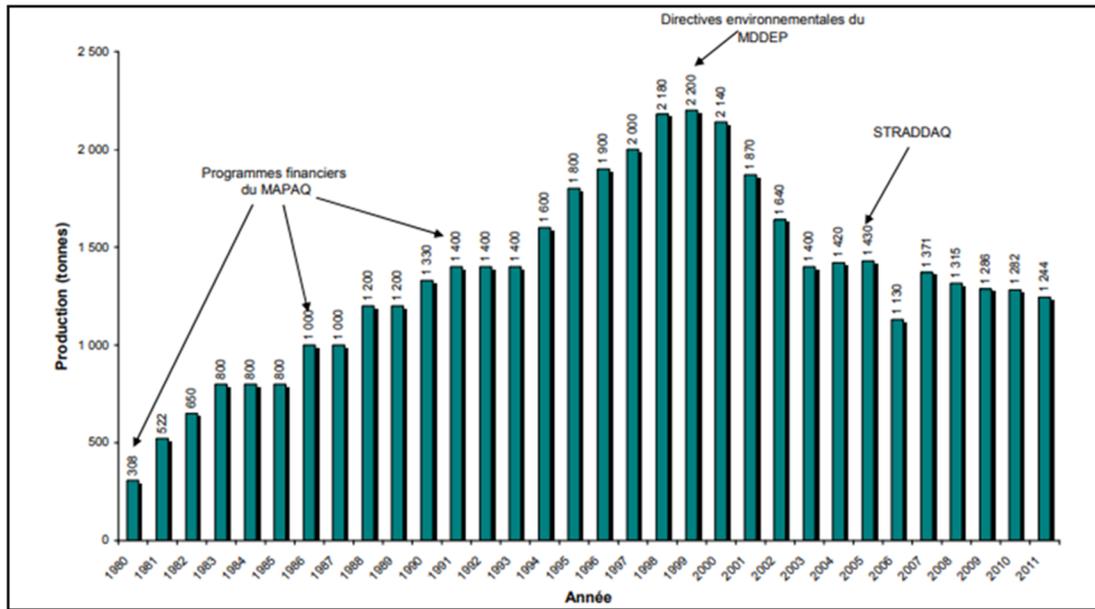


Figure 1.1 : Production piscicole au Québec entre 1980 et 2011 (Morin, 2007)

1.1.4 Débit d'eau utilisé en pisciculture au Québec

L'élevage des poissons, et plus particulièrement celle des salmonidés, nécessite une bonne qualité d'eau en quantité suffisante. Les affluents d'eau des piscicultures sont généralement les eaux de surfaces et ou les eaux souterraines. Au Québec, l'eau de surface est abondante, mais elle est caractérisée par des écarts de température importants selon les saisons. En périodes de crue, l'eau de surface peut être contaminée par les sédiments, ainsi par les polluants rejetés dans les cours d'eau. Par ailleurs, elle présente le risque de contaminer les poissons d'élevage avec des maladies et des parasites lorsqu'il y a la présence de poissons sauvages dans le bassin versant (Morin, 2007).

Le recours à l'utilisation de l'eau souterraine comme affluent de pisciculture évite les problèmes présentés par les écarts extrêmes de température rencontrés essentiellement en été et en hiver avec l'eau de surface. De plus, les eaux souterraines sont généralement dépourvues des organismes pathogènes couramment rencontrés dans l'eau de surface. Par ailleurs, les avantages thermiques et l'innocuité de cette eau la rendent très intéressante pour l'élevage des salmonidés (Morin, 2007).

Au Québec, La majorité des entreprises piscicoles (42 % à 46 %) utilise à la fois l'eau souterraine et l'eau de surface, 33 % à 35 % des entreprises ont exclusivement de l'eau souterraine et le reste (21 % à 24 %) ont exclusivement l'eau de surface (Morin, 2007).

L'activité piscicole nécessite une grande quantité d'eau. Au Québec, le débit d'eau utilisé par les stations piscicoles était de 20 200 m³/h en 2 000 (Morin, 2012). L'eau utilisée est ensuite rejetée en milieu naturel et constitue une source de pollution organique pour ce dernier d'où la nécessité de se conformer aux lois relatives à l'utilisation de l'eau et à la préservation de la qualité de l'environnement aquatique. Le resserrement des contraintes environnementales envers l'industrie de la pisciculture a entraîné la diminution du débit d'eau utilisé par les entreprises piscicoles dont le débit qui était de 20200 m³/h en 2000 a ainsi diminué pour atteindre 14000 m³/h en 2006 (tableau 1.1). La diminution des débits d'eau utilisés en pisciculture est corrélée par une diminution de la quantité de poissons élevés.

Tableau 1-1 :Les débits d'eau (m³/h) exploités en pisciculture et la production annuelle de poissons (t) entre 2000 et 2006 (Morin, 2007)

| Types d'eau | 2000 | 2002 | 2004 | 2006 |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Surface | 11 500 | 10 800 | 9 220 | 9 450 |
| Souterraine | 8 700 | 7 300 | 5 400 | 4 980 |
| Total | 20 200 | 18 100 | 14 620 | 14 430 |
| Production annuelle de poissons (tonnes) | 2140 | 1640 | 1400 | 1460 |

1.2 Les systèmes piscicoles en circuit recirculé d'eau

En circuit ouvert, l'eau n'est utilisée qu'une ou deux fois, avec des besoins en eau d'environ 100 m³/kg d'aliment (Jimenez del Rio et al., 1996). Les piscicultures sont de plus en plus confrontées au contexte général de la diminution des ressources en eau (Varadi, 2000 ;

Goldburg et al., 2001) et de la détérioration de la qualité des cours d'eau. Les systèmes d'élevage à système de recirculation d'eau permettent de réduire les consommations en eau (Pagand, 1999 ; Blancheton, 2000 ; Léonard, 2000 ; Goldburg et al., 2001 in Gutierrez-Wing, 2006) tout en contrôlant la qualité de l'eau d'élevage. Les besoins en eau de ces systèmes d'élevage peuvent être réduits d'un facteur 100 par rapport aux circuits ouverts en équipant les bassins d'un système de traitement de l'eau. Ces systèmes permettent également de diminuer par le même facteur les quantités d'eau rejetées facilitant ainsi leur traitement (Pagand, 1999 ; Blancheton, 2000 ; Léonard, 2000).

Les premières recherches scientifiques sur les piscicultures à système de recirculation d'eau ont été menées au Japon dans les années 50. Par définition, un système aquatique en recirculation est un système où l'eau circule en boucle fermée ou semi-fermée. Une conception de ce genre est utilisée généralement en aquaculture où il est question de Système d'aquaculture en recirculation (SAR). Les bassins d'élevage équipés d'une boucle de recyclage comprennent une filtration biologique afin de traiter l'eau soit avant réutilisation, soit avant rejet dans l'environnement : ce sont les systèmes d'élevage en circuit « recyclé » ou « recirculé » (FAO, 2015).

1.2.1 Les types de piscicultures à système recirculé d'eau

Selon le degré de réutilisation d'eau, il existe deux types d'aquaculture à système de recirculation d'eau : l'aquaculture à recirculation partielle et celle à recirculation complète (Timmons & Ebeling, 2007). Le degré de réutilisation d'eau dépend de la disponibilité de l'eau sur le site d'élevage, ainsi de l'espèce de poisson élevée et du mécanisme utilisé pour le traitement de l'eau (Blancheton et al., 2007).

1.2.2 Avantages et désavantages des piscicultures à système recirculé d'eau

Les piscicultures à système de recirculation d'eau, comme tout autre type de système d'aquaculture, ont des avantages et des inconvénients. Le plus important avantage est l'augmentation de la production piscicole avec une demande limitée en eau par rapport aux

systèmes ouverts d'élevage des poissons. Le réel inconvénient est que les poissons produits ne sont pas toujours de bonne qualité étant donné que certains pisciculteurs ne peuvent pas payer les traitements sanitaires dont les animaux ont besoin. Le tableau 1.2 résume les avantages et inconvénients des piscicultures à système recirculé d'eau tirés de différentes anciennes recherches.

Tableau 1-2 : Avantages et inconvénients des piscicultures en circuit recirculé adapté de Bullock et al (1997) ; King (2001) ; Bai (2007) et Pleifer et al (2008)

| Avantages | Inconvénients |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Augmentation de la production piscicole avec un approvisionnement limité en ressources naturelles (conservation à la fois de l'eau et de la terre). - Flexibilité de l'emplacement de la pisciculture (Les SAR fournissent des systèmes de production piscicole compétitifs et rentables toute l'année destinés producteurs géographiquement désavantagés en raison d'une saison de croissance relativement courte ou extrêmement sèches). - Flexibilité dans la sélection des espèces élevés (Les SAR offrent une grande flexibilité pour (1) faire croître une grande diversité d'espèces de poissons, et (2) différentes tailles d'une ou plusieurs espèces en fonction de la demande du marché et du prix. | <ul style="list-style-type: none"> - Ce sont des systèmes relativement coûteux à développer (bâtiments, réservoirs, plomberie, biofiltres) et à exploiter (pompage, ventilation, chauffage, éclairage). - Le contrôle des rejets piscicoles dans l'environnement est plus difficile. - Ce sont des systèmes complexes et nécessitent une assistance technique qualifiée pour réussir leur gestion. - Augmentation des risques de développement bactérien et algal. |

1.2.3 Paramètres de qualité de l'eau dans une pisciculture à système de recirculation d'eau

Les poissons élevés dans une aquaculture doivent être pourvus de toutes les conditions favorables pour rester en bonne santé et pour grandir.

Le tableau 1.3 synthétisé par (Morin, 2012), résume les différents paramètres physico-chimiques de la qualité de l'eau requise pour l'élevage des salmonidés.

Tableau 1-3 : Conditions de la qualité de l'eau requise pour l'élevage des salmonidés (Morin, 2012)

| Groupes | Paramètres | Limites de tolérance |
|-----------------|---|---|
| Thermométrie | - Température (°C) | 6 - 13 Alevinage 5 - 18 Grossissement |
| | - pH | 6,5 - 8,5 |
| Acides et bases | - Alcalinité (mg/L de CaCO ₃) | ≥ 20 - 400 |
| | - Dureté (mg/L de CaCO ₃) | 10 - 500 |
| | Oxygène (O ₂) (%) | 65 - 100 |
| Gaz | 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 |
| | Ammoniac (NH ₃) (mg/L) | < 0,003 alevinage < 0,006 - 0,0125 grossissement |
| Composés azotés | Nitrites (NO ₂ ⁻) (mg/L) | < 0,1 |
| | Nitrates (NO ₃ ⁻) (mg/L) | < 100 - 200 |
| | Aluminium (Al) (mg/L) | < 0,1 |
| Métaux | Cadmium (Cd) (mg/L) | < 0,004 |
| | Cuivre (Cu) (mg/L) | < 0,006 si alcalinité < 100 mg/L < 0,03 si alcalinité > 100 mg/L |

Tableau 1-4 (Suite) : Conditions de la qualité de l'eau requise pour l'élevage

des salmonidés (Morin, 2012)

| Groupes | Paramètres | Limites de tolérance |
|------------------|--|--|
| Métaux | 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 |
| Matières solides | matières en suspension (MES) (mg/L) | < 80 |

1.3 Caractérisation des effluents piscicoles

Les rejets des entreprises piscicoles ont plusieurs origines possibles : elles sont généralement liées aux poissons et ou au système d'élevage. La composition des aliments, leur digestibilité par les poissons et le taux de conversion alimentaire conditionnent en grande partie les rejets des activités piscicoles. Par ailleurs, en fonction de la composition de l'aliment et de sa digestibilité par les poissons, une partie sera non digérée, une partie sera excrétée sous forme solide et une autre partie sous forme dissoute liée au métabolisme du poisson (Ackefors & Enell, 1990). Le déversement de ces rejets peut amener des changements dans les écosystèmes naturels, particulièrement l'eutrophisation des milieux aquatiques.

1.3.1 Les rejets liés au poissons

Les rejets des poissons sont composés de la partie non ingérée de l'aliment (refus alimentaire), de la partie ingérée mais non ou mal digérée (fèces) et de la partie ingérée et assimilée (figure 1.2).

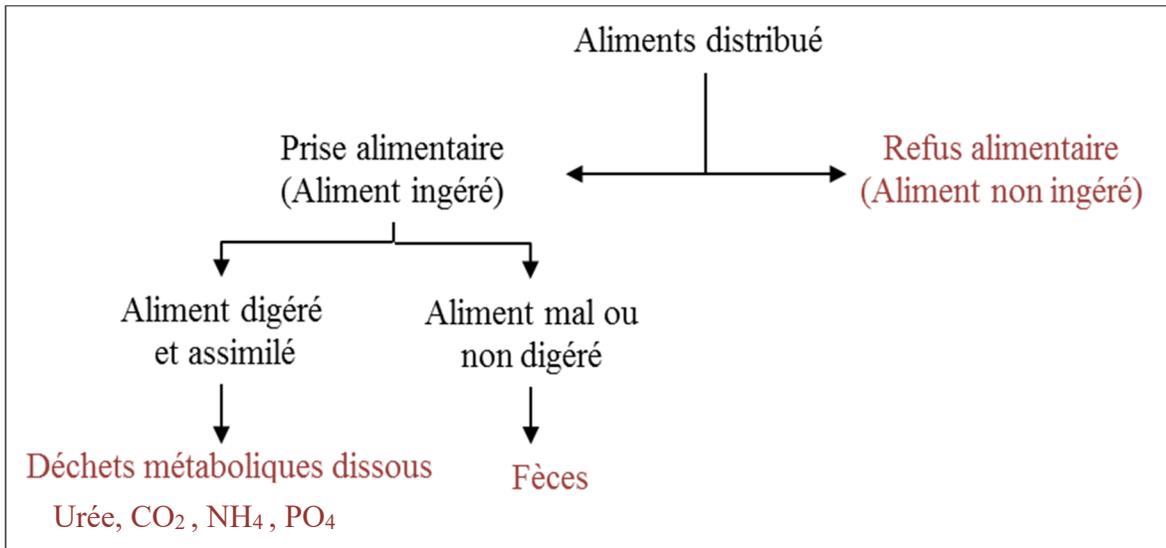


Figure 1.2 : Les rejets piscicoles liés au poissons

- Refus alimentaire

Le mode, la fréquence et l'heure de distribution de l'aliment, la durée de chaque repas et la quantité d'aliment délivrée (ration alimentaire) conditionnent la quantité d'aliments non ingéré par les poissons. Ces paramètres sont à contrôler afin d'éviter le gaspillage (Boujard, 2002 ; Breton, 2005) et de protéger l'environnement naturel récepteur des effluents piscicoles. La réduction des pertes alimentaires (aliment non ingéré) est un point essentiel de la gestion de la pisciculture tant au niveau environnemental (réduction des rejets) qu'au niveau économique dont l'aliment représente environ 60 % du coût total de production piscicole (MacMillan et al., 2003).

- Digestibilités et rejets solides

Les rejets solides des poissons se résument généralement aux fèces, aux bactéries qui les colonisent (Piedrahita et al., 1996) et aux fractions d'aliments non ingérées. Les fèces représentent la fraction d'aliments ingérée mais non ou pas digérée. Leurs compositions chimiques (en carbone C, en azote N et phosphore P), leurs caractéristiques physiques (taille, densité, teneur en eau ...) et leurs quantités émises dépendent de l'aliment (composition) et du

poisson (espèce, stade de développement, fonctionnement physiologique) (Emmanuelle, 2008).

- Métabolisme et rejets dissous

Suite au processus de métabolisme oxydatif des aliments en molécules complexes, les poissons tirent leurs énergies afin d'assurer leurs fonctions physiologiques (croissance, reproduction, etc.) (Breton, 2005). Le rendement des réactions de transfert d'aliments en énergie étant inférieur à 100 %, des sous-produits du métabolisme sont rejetés par l'animal sous forme dissoute. Les éléments de ces sous-produits, principalement l'azote, le phosphore, le carbone, les oligo-éléments et métaux traces, peuvent, selon leur flux et le milieu d'accueil, contribuer à la pollution du milieu naturel (Guillaume et al., 1999).

1.3.2 Rejets liés au système d'élevage

Les caractéristiques des rejets piscicoles dépendent du type de système d'élevage mis en jeu. Ainsi, pour une quantité de poissons produits, les concentrations en matières solides et dissoutes de l'effluent rejeté, de même que les débits à traiter sont très variables selon le type de système d'élevage utilisé (Lavenant et al., 1995).

Au niveau des systèmes d'élevage en circuit ouvert traditionnels, ces concentrations sont faibles et les débits de rejet sont importants (Lavenant et al., 1995).

Dans les systèmes d'élevage en circuit recirculé, la concentration en substances dissoutes est fonction d'un ratio R, qui représente le degré d'ouverture du système d'élevage et qui est exprimé en m³ d'eau neuve introduite par kg d'aliment. Plus le ratio R est faible, plus la concentration en matières dissoutes est élevée. Les débits de rejet sont faibles et les débits à traiter sont importants (Summerfelt et al, 1997).

1.4 Traitement des effluents piscicoles

1.4.1 Généralités

Au niveau des systèmes d'élevage des poissons, les matières solides sont plus faciles à traiter que les matières dissoutes. Afin de concentrer et éliminer les matières solides, la filtration est la méthode de traitement la plus utilisée vue des raisons économiques et techniques (Cripps & Bergheim, 2000 ; Bergheim & Brinker, 2001).

Dans les systèmes d'élevage en circuit recirculé, les eaux piscicoles peuvent être traitées à moindre coût par certaines techniques telles que le traitement par marais ou le lagunage, permettant le traitement des éléments dissous et solides. Par contre le rendement de ces techniques ne garantit pas une qualité d'eau favorable à l'élevage de certaines espèces de poissons. D'autres techniques ont été utilisées telles que l'ozonation et le traitement avec l'ultraviolet (UV) afin d'améliorer la qualité d'eau d'élevage recirculée.

Des autres systèmes de production aquicole peuvent également être intégrés ; les nutriments des effluents des systèmes d'élevage servent alors d'alimenter un second système de production, d'algues ou de mollusques le plus souvent (Troell et al., 2003).

1.4.2 Traitement des eaux piscicoles par filtration

La filtration est un procédé de séparation basé sur le passage d'un mélange diphasique solide-liquide à travers un milieu poreux ; le filtre. En pisciculture, il existe généralement deux méthodes de filtration : la filtration sur lit granulaire dont le filtre à sable étant le plus souvent utilisé et la filtration sur support ou tamisage, avec, selon la taille des ouvertures, le microtamisage ($< 150 \mu\text{m}$), le macrotamisage ($200\text{-}4000 \mu\text{m}$) et le dégrillage ($> 4 \text{ mm}$) (Bergheim & Brinker, 2003).

L'efficacité des filtres varie largement en fonction de leurs diamètres et des caractéristiques de l'effluent piscicole. Les faibles résultats peuvent être attribués à des diamètres trop grands ou des concentrations d'effluents à traiter trop faibles (Bergheim et al., 1993b). Le choix de

diamètre de filtre dépend donc des caractéristiques des effluents piscicoles à traiter dont la taille des matières solides dans les eaux d'élevage est un paramètre essentiel à connaître.

1.4.3 Traitement des eaux piscicoles par décantation

La décantation est un procédé de séparation solide-liquide, basé sur la séparation des particules en suspension en utilisant la force de gravité. Ce procédé est le plus fréquemment utilisé pour séparer les matières en suspension (sous forme de floc après une étape de coagulation/floculation). Cependant, cette technique ne permet généralement pas d'obtenir un sédiment très concentré.

Dans les entreprises piscicoles, les matières solides des eaux d'élevage et ou de lavage des filtres mécaniques sont généralement trop diluées. Ces matières nécessitent une concentration supplémentaire en fonction d'une éventuelle valorisation. Cette concentration est généralement faite par des procédés de décantation. La décantation se fait soit dans les bassins, soit après les bassins d'élevage.

Après les bassins, la décantation est associée à un traitement par filtration. Il existe les bassins de décantation plats, circulaires, côniques et lamellaires. Les bassins de décantation plats sont les systèmes de traitement les plus utilisés en aval des bassins (Chen et al., 1994).

1.4.4 Traitement des eaux piscicoles par ozonation

L'ozone a été largement utilisé en aquaculture car il a une vitesse de réaction rapide, il produit peu de sous-produits de réaction nocifs dans l'eau douce et il se transforme en oxygène comme produit final de réaction.

L'application de l'ozone dans les systèmes aquacoles dépend généralement de la génération d'ozone, le transfert d'ozone dans la solution, le temps de contact pour la réaction de l'ozone et éventuellement la destruction de l'ozone (Summerfelt & Hochheimer, 1997).

Selon plusieurs études, l'application de l'ozone à des doses favorables permet l'amélioration de la qualité de l'eau piscicole (Colberg & Lingg, 1978 ; Otte & Rosenthal, 1979 ; Rosenthal & Otte, 1980 ; Williams et al., 1982 ; Paller & Lewis, 1988 ; Rosenthal & Black, 1993 ; Brésil,

1996 ; Bullock et al., 1997 ; Summerfelt & Hochheimer, 1997 ; Summerfelt et al., 1997 ; Krumins et al., 2001a). En outre, l'ozonation des systèmes à recirculation peut réduire les maladies des poissons simplement en améliorant la qualité de l'eau, ce qui réduit ou élimine les sources de pollution de l'environnement (Brésil, 1996 ; Bullock et al., 1997). Le dosage d'ozone requis pour le traitement des eaux de pisciculture est généralement calculé en fonction du taux d'alimentation quotidien des poissons. Plusieurs doses d'O₃ par kilogramme d'alimentation ont été recommandées par différents chercheurs. Bullock et al. (1997) et Summerfelt et al. (1997) ont montré que pour un kilogramme d'aliments une dose de 25 g est recommandée alors que King (2001) a trouvé que le dosage requis d'O₃ est de 10 à 15 g d'O₃/ kg d'aliments. La qualité de l'eau (les bactéries, COT, DBO₅, pH, température, phosphore total, ST, nitrates...) contrôle aussi le dosage d'ozone requis puisque les réductions microbiennes sont limitées par la capacité de maintenir une concentration spécifique d'ozone (Kuhn et al., 2017) dans l'eau.

L'ozone dans le système d'élevage des poissons peut être appliqué en continu ou sous forme d'une série de traitements par jour (Hunter, 2000 ; Rakness, 2005). L'application de l'ozone est généralement liée à la stratégie d'alimentation utilisée dans le système d'aquaculture. Trois à quatre heures après l'alimentation du poisson, les concentrations d'ammoniac, de matières organiques dissoutes et d'autres déchets atteignent un maximum (Augusto Gonçalves & Gagnon, 2011). Dans le cas où les poissons sont nourris plusieurs fois pendant la journée, une série de traitements à l'ozone peut être introduite après 3 à 4 heures de chaque alimentation. Alors que si l'alimentation est introduite 24 heures par jour, la qualité de l'eau se dégrade continuellement et l'application d'ozone devrait donc être continue.

1.5 Ozonation

L'ozonation (également appelée ozonisation) est une technique de traitement chimique de l'eau basée sur l'injection d'ozone dans l'eau. Ce traitement est un type de processus d'oxydation avancée, impliquant la production d'espèce d'oxygène (Ozone O₃) très réactif capable d'attaquer un large éventail de composés organiques et de micro-organismes.

1.5.1 Propriétés et structure de l'ozone

L'ozone a été découvert en 1840 par le chimiste allemand Christian Friedrich Schöbein (Mordecai, 2001). Sa structure, O₃, n'a été déterminée qu'en 1865 par Jacques-Louis Soret puis confirmée en 1867 par Christian Friedrich Schönbein. L'ozone, ou trioxygène, est un allotrope triatomique d'oxygène de formule chimique O₃. Il est naturellement présent dans l'atmosphère terrestre, formant dans la stratosphère la couche d'ozone. À température ambiante, l'ozone est un gaz bleu pâle, voire incolore, qui se démarque par son odeur caractéristique qui rappelle l'eau de Javel. Son odeur est décelable dès la concentration de 0,01 ppm. Le trioxygène est moins stable que le dioxygène O₂, en lequel il tend naturellement à se décomposer. Les principales propriétés de l'ozone sont reprises dans le tableau 1.4.

Tableau 1-5 : Caractéristiques physico-chimiques de l'ozone

| Caractéristiques | Valeurs |
|---------------------------|--|
| Formule brute | O ₃ |
| Apparence | Gaz bleuté voire incolore, fluide bleu foncé |
| Masse molaire | 47,9982 ± 0,0009 g/mol |
| Masse volumique | 2,144 g/L (à 0 °C et 1atm) |
| Densité | 1.7 |
| Température de fusion | -192,5°C |
| Température d'ébullition | -111,9°C |
| Potentiel électrochimique | 2,076 V (à 25°C) |

Le potentiel d'oxydoréduction de 2,07 Volts prouve que l'ozone est un fort oxydant. En fait, l'ozone est l'un des oxydants les plus forts pour le traitement de l'eau.

La molécule d'ozone est une molécule courbée à symétrie moléculaire de type C_{2v} (semblable à la molécule d'eau). En phase aqueuse, cette molécule peut être décrite comme un hybride de résonance entre les formes limite présentées en figure 1.3.

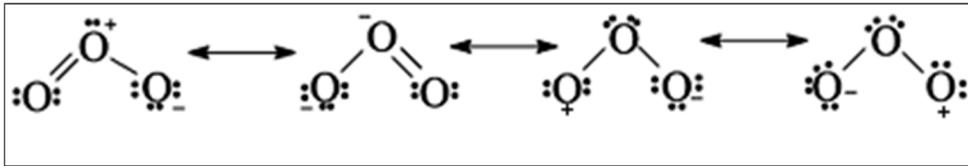


Figure 1.3 : Structure de résonance de l'ozone (Peleg, 1976)

1.5.2 Toxicité de l'ozone

Bien que l'ozone ait une vitesse de réaction rapide et peu de produits de réaction nocifs, il est toxique pour la vie aquatique même à de faibles concentrations (Langlais et al., 1991).

Le dosage d'ozone requis est un paramètre critique puisque les résidus d'ozone peuvent être mortels pour les poissons à des concentrations d'ozone aussi faibles que 0,01 mg/L (Gonçalves & Gagnon, 2011). Les concentrations réelles de l'ozone résiduel qui peuvent être létales dépendent généralement des espèces des poissons élevés et de leurs stades de vie.

L'ozone est également toxique pour l'homme. Cette toxicité est influencée par certains facteurs comme la concentration, la température, l'humidité ambiante, la durée d'exposition et le seuil de tolérance de chaque individu (Weschler, 2000). Lors de l'exposition à l'ozone, le système respiratoire est le plus affecté. Selon la concentration, les symptômes peuvent varier entre l'anesthésie olfactive transitoire, lors d'une exposition aiguë à des taux faibles d'ozone, la toux, l'hypersécrétion bronchique ou une réactivité augmentée de la voie aérienne aux allergènes et aux irritants, quand la concentration de l'ozone est plus élevée, allant jusqu'aux lésions pulmonaires sévères lors d'expositions à des concentrations de 9 000 ppb (Boeniger, 1995). Des concentrations plus élevées (> 50 ppm) et une exposition à long terme (> 30 min) peuvent être mortelles (Lauwerys, 1999 ; Bingham et al., 2001 ; Institut national de l'environnement industriel et des risques, 2011). Pour empêcher les risques sur la santé, une quantité maximale d'ozone a été établie pour les secteurs où l'ozone est utilisé. Ceci est appelé Concentration Maximale Admissible, ou valeur MAC. Cette valeur décrit la concentration maximale à laquelle un homme peut être exposé durant une période donnée. Pour une semaine normale de

cinq jours de travail, huit heures par jour, l'ozone a une valeur MAC de 0,1 ppm (parties par million, ou mg/L).

L'ozone a une odeur très spécifique permettant de s'apercevoir très rapidement que la valeur MAC a été dépassée. Le seuil de l'odeur d'ozone est d'environ 0,02 ppm (Lauwerys, 1999 ; Bingham et al., 2001 ; INERIS, 2011).

1.5.3 Décomposition de l'ozone dans l'eau douce

L'ozone est une molécule très instable et, après injection dans l'eau, il se décompose très rapidement. Le processus de réaction à l'ozone dépend des propriétés et des concentrations des autres composés, ainsi que de la qualité de l'eau, notamment du pH, du taux de bicarbonate, du niveau de carbone organique total et de la température. Ces facteurs affectent la décomposition de l'ozone et donc le pouvoir d'oxydation effectif et le taux d'oxydation de l'ozone (Summerfelt & Hochheimer, 1997 ; Rakness, 2005).

En solution aqueuse, l'ozone peut se décomposer avant de réagir avec le substrat et cette décomposition conduit à la formation d'espèces plus réactives (figure 1.4).

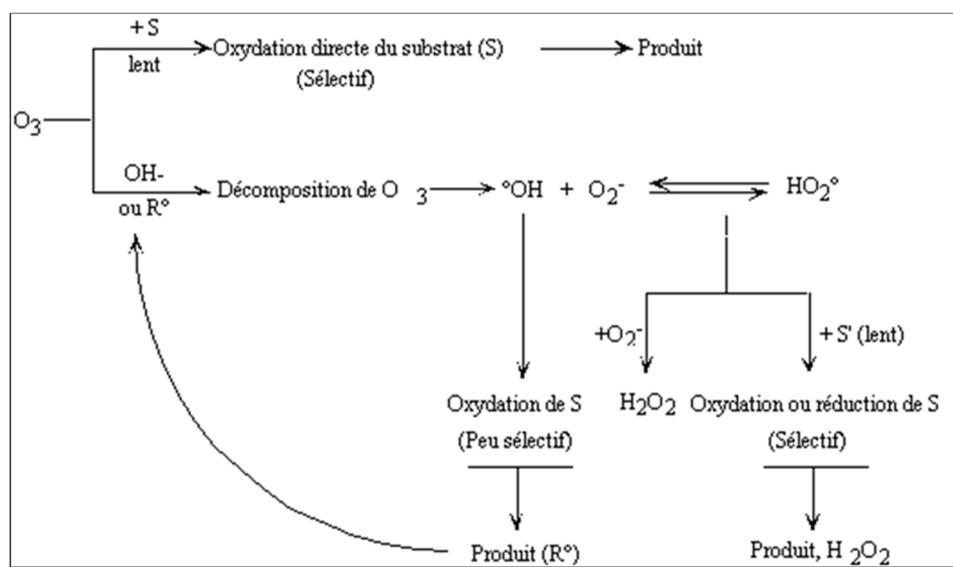


Figure 1.4 : Différentes modalités d'interaction de l'ozone dans une solution aqueuse (Hoigne & Bader, 1976 ; Hoigne & Bader, 1978)

L'ozone peut donc soit réagir directement avec un substrat (S) ou se décomposer (figure 1.4). Dans ce dernier cas les espèces issues de la décomposition de l'ozone dans l'eau telles que le radical hydroxyle ($^{\circ}\text{OH}$) peuvent devenir les agents oxydants les plus importants en solution. (Hoigne & Bader, 1976 ; Hoigne & Bader 1978). Lorsque ces radicaux OH^{\cdot} sont dans les particules dominantes de la solution, ceci s'appelle un procédé avancé d'oxydation (PAO). En fonction de la qualité de l'eau, la demi-vie de l'ozone est de quelques secondes à quelques heures.

1.5.4 Mécanisme de réaction de l'ozone

Le procédé d'ozonation est basé essentiellement sur deux types de réactions : directes, avec la molécule d' O_3 (très sélective) et indirectes du fait de l'action d'espèces secondaires comme les radicaux libres OH^{\cdot} conséquences de la décomposition de l'ozone au contact de l'eau. Ces radicaux sont des composés à très courte durée de vie qui ont même un mécanisme d'oxydation plus forte que l'ozone. Ceci est dû au fait que les radicaux ont un potentiel d'oxydation (2,86 Volts) plus élevé que celui de la molécule d' O_3 (2,07 Volts).

Lorsque le nombre de radicaux OH^{\cdot} en solution augmente, il s'agit de Procédé Avancé d'Oxydation (POA). Le mécanisme d'oxydation à l'ozone est illustré schématiquement en figure 1.5.

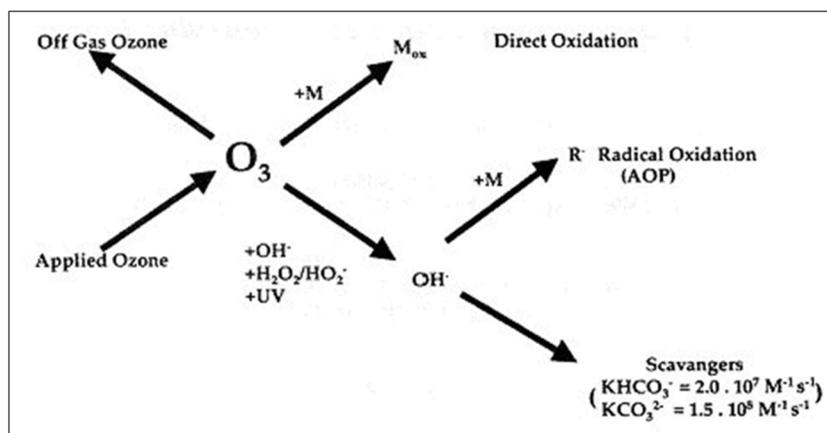


Figure 1.5 : Mécanisme de réaction de l'ozone

Le mécanisme de réaction de l'ozone a été formalisé par Staehelin et Hoigné (Staehelin & Hoigné, 1985). Ils ont proposé deux processus de réaction d'ozone ; en absence de substrat (figure 1.6) et en présence de substrat (figure 1.7).

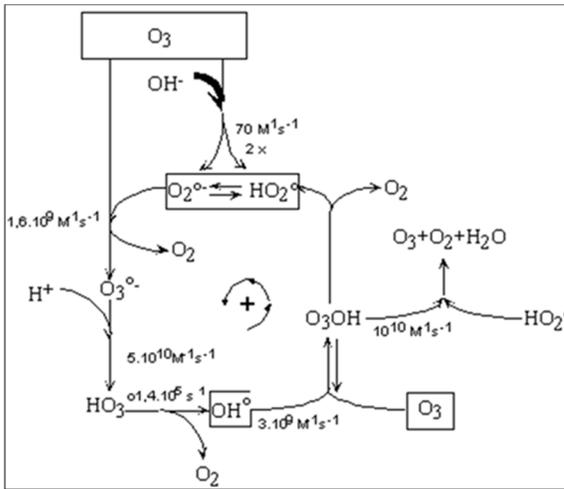


Figure 1.6 : Réactions de l'ozone en eau pure (Staehelin & Hoigné, 1985)

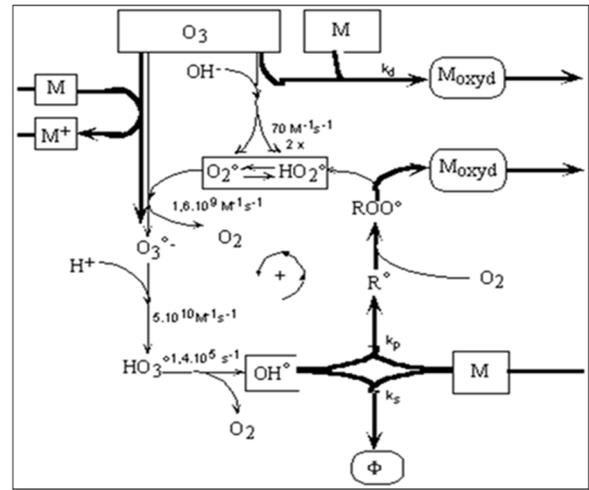


Figure 1.7 : Réactions de l'ozone en eau avec la présence de solutés M (Staehelin & Hoigné, 1985)

1.5.5 Génération de l'ozone

Caractérisé par une durée de vie relativement courte, l'ozone est toujours généré sur site grâce à un générateur d'ozone. Les deux principaux mécanismes de génération d'ozone sont les lumières UV et les décharges corona. La génération d'ozone par décharge corona est la plus utilisée et a plus d'avantages tels qu'une plus grande durabilité de l'unité, une meilleure production d'ozone et un meilleur rapport coût/efficacité (Bablon et al., 1991).

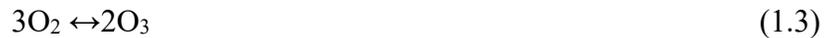
La décharge corona permet de rompre la molécule stable d'oxygène et former deux radicaux d'oxygène (Rosenthal, 1981).



Ces radicaux peuvent se combiner avec les molécules d'oxygène pour former l'ozone.



La réaction globale de formation de l'ozone est endothermique, dont l'équation de la réaction est la suivante :



La génération d'ozone dépend de plusieurs facteurs tels que : la concentration d'oxygène dans le gaz d'entrée, l'humidité et la pureté du gaz d'entrée, la température de l'eau de refroidissement et les paramètres électriques. Pour minimiser l'énergie qui est utilisée à un haut rendement d'ozone, il est important que ces facteurs soient optimaux.

Pour éliminer l'ozone restant après utilisation, des destructeurs d'ozone sont utilisés. Le mécanisme du destructeur d'ozone peut être basé sur différents principes. Généralement un catalyseur est utilisé, qui accélère la décomposition de l'ozone en oxygène.

1.5.6 Mécanisme de transfert de l'ozone

Afin d'effectuer une bonne désinfection et oxydation, la concentration d'ozone dans l'eau doit être aussi élevée que possible. La prévision de la solubilité de l'ozone est plus compliquée que pour les autres gaz, la solubilité de l'ozone est influencée par plusieurs facteurs, tels que la température, le pH et la matière dissoute.

L'ozone, produit in situ sous forme gazeuse, peut être injecté dans l'eau de plusieurs façons. Les techniques les plus couramment utilisées sont les diffuseurs et les venturis. Un diffuseur fonctionne sous pression et crée une colonne à bulles. Dans le cas d'un système venturi, l'ozone est dissous dans l'eau par pression. La pression crée une constriction dans le débit du fluide, entraînant le pompage de l'ozone.

L'efficacité d'ozone dans les processus d'oxydation et de désinfection dépend de la finesse des bulles de gaz injecté. La finesse de ces bulles dépend de la technique de diffusion du gaz dans l'eau (Bellamy et al., 1991).

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Afin d'évaluer l'effet d'ozonation sur la qualité physico-chimique des eaux piscicoles, un montage d'ozonation a été installé au laboratoire ; les paramètres physiques et chimiques des eaux ont été suivis sans ozonation et au cours d'ozonation. Le montage d'ozonation utilisé ainsi que les méthodes d'analyse des différents paramètres physicochimiques des eaux sont présentés dans ce chapitre.

La méthodologie utilisée au cours de cette étude se résume en quatre étapes à effectuer dans l'ordre. La première étape est l'échantillonnage des eaux piscicoles à partir de la pisciculture. La deuxième étape consiste à caractériser les différents types d'eaux piscicoles en analysant les paramètres physico-chimiques des eaux. Les essais d'ozonation des eaux piscicoles sont effectués au cours de l'étape 3. La dernière étape consiste à suivre l'évolution au cours du temps d'ozonation des paramètres physicochimiques des eaux afin d'évaluer l'effet de l'ozonation sur la qualité physico-chimique des eaux.

2.1 Description de la pisciculture

La pisciculture est une entreprise familiale située à Ste-Marguerite de Lingwick (Québec) qui œuvre dans le domaine depuis plus de 20 ans déjà. Elle est spécialisée dans l'élevage de truites mouchetées (omble de fontaine) et arc-en-ciel destinés pour l'ensemencement seulement.

La pisciculture est divisée principalement en deux zones de production. La première zone contient les bassins d'alevinage. La deuxième zone comporte les bassins d'élevage. Les bassins d'alevinage sont alimentés par deux puits artésiens. Une partie de l'eau d'alevinage est recirculée et l'autre partie est acheminée vers les bassins d'élevage. Le taux de recyclage de l'eau est d'environ 50 % /d. La quantité d'aliments donnés aux alevins est d'environ 100 g/d/bassin. Par contre, les bassins d'élevage sont alimentés par plusieurs sources d'eau dont une source d'eau de surface, un puits artésien et encore de l'eau d'alevinage. Environ 80 % des

eaux d'élevage sont recirculées, le reste est acheminé vers des lacs d'égalisation. La quantité d'aliments donnés aux poissons est d'environ 15 kg/d/bassin. Chaque bassin d'élevage mesure environ 250 m³ de volume, et contient d'environ 25 000 poissons dont la masse varie entre 25 et 40 g/poisson.

2.2 Échantillonnage des eaux piscicoles

Après l'analyse du circuit de circulation de l'eau au niveau de la pisciculture, cinq points de prélèvement ont été fixés afin de caractériser la qualité physico-chimique des affluents et des effluents piscicoles (figure 2.1).

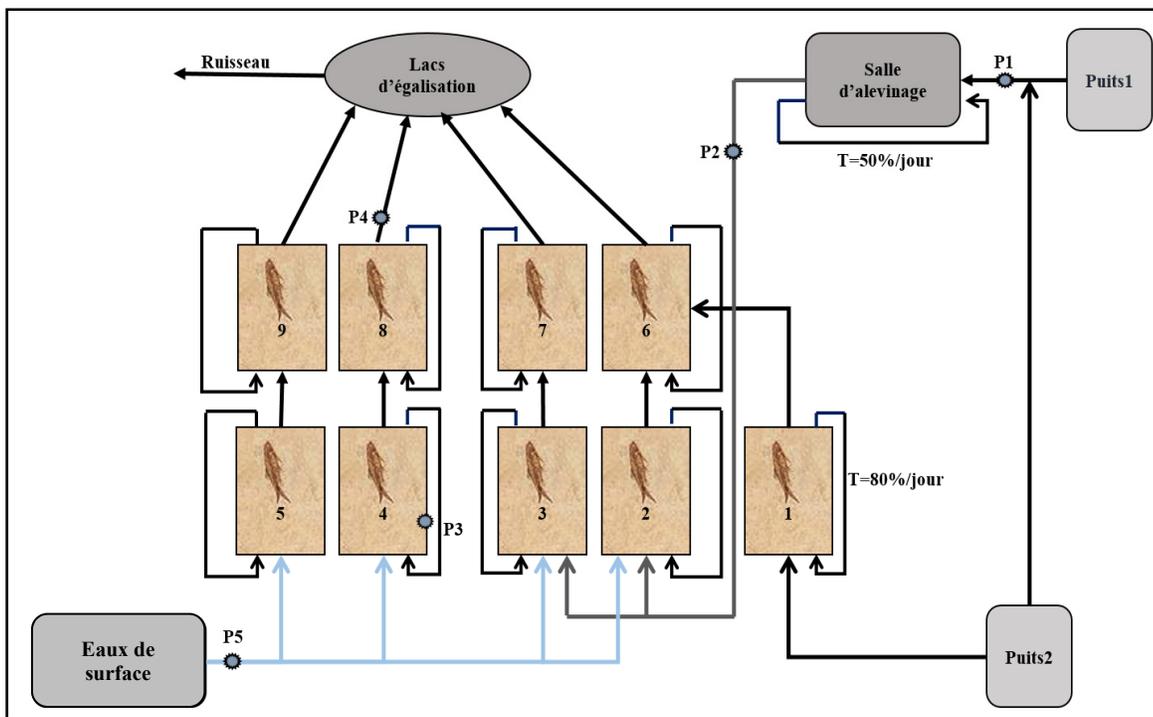


Figure 2.1 : Schéma représentatif de la circulation de l'eau dans la pisciculture Gilbert (la flèche indique le sens de circulation de l'eau; P : Point de prélèvement ; T : Taux de recyclage d'eau par jour; 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 : Bassins d'élevage

Les deux premiers points de prélèvement permettent de caractériser respectivement l'affluent des bassins d'alevinage (eaux des puits artésiens) et leurs effluent. Le troisième et le quatrième

point permettent d'analyser respectivement la qualité de l'eau entrante et sortante des bassins d'élevage. Le cinquième point d'échantillonnage permet de déterminer la qualité physicochimique des eaux souterraines. Les différents points, notés P1, P2, P3, P4 et P5 sont représentés sur le schéma de la pisciculture à la figure 2.1.

2.3 Essais Ozonation

L'application d'ozone dans les eaux nécessite la génération d'ozone, le transfert d'ozone dans la solution, le temps de contact pour la réaction de l'ozone et éventuellement la destruction de l'ozone. Ces exigences ont été prises en considération afin d'installer un pilote d'ozonation. Au cours de cette étude, les essais d'ozonation ont été effectués à travers un pilote d'ozonation, installé au niveau du laboratoire.

2.3.1 Configuration du pilote d'ozonation

Le pilote d'ozonation au laboratoire est basé essentiellement sur un générateur d'ozone type LAB2B (Ozonix Triogen) alimenté en air sec. Une partie de l'ozone généré est transféré vers un analyseur à haute concentration model H1 (AFX) afin de mesurer la concentration d'ozone dans la phase gazeuse. L'autre partie de l'ozone généré est transférée vers le réacteur cylindrique de volume 14 L à travers un tube de Venturi. L'équipement utilisé est schématisé à la figure 2.2.

Les essais d'ozonation de l'eau piscicole se déroule en quatre étapes : la stabilisation du débit de l'ozoneur, la mesure du concentration d'ozone généré, l'ozonation de l'eau piscicole pendant un temps t et finalement la mesure du concentration d'ozone généré.

- Étape 1 : Stabilisation du débit de l'ozoneur

Après la mise en marche, l'ozoneur a besoin d'un certain temps pour que son débit se stabilise. Pour cette raison, l'ozone généré est transféré vers le destructeur d'ozone pendant 60 minutes. Le destructeur d'ozone est constitué d'une bouteille de 8 litres remplie d'eau et contenant l'hydroxyde de sodium NaOH et de sulfite de sodium Na_2SO_3 .

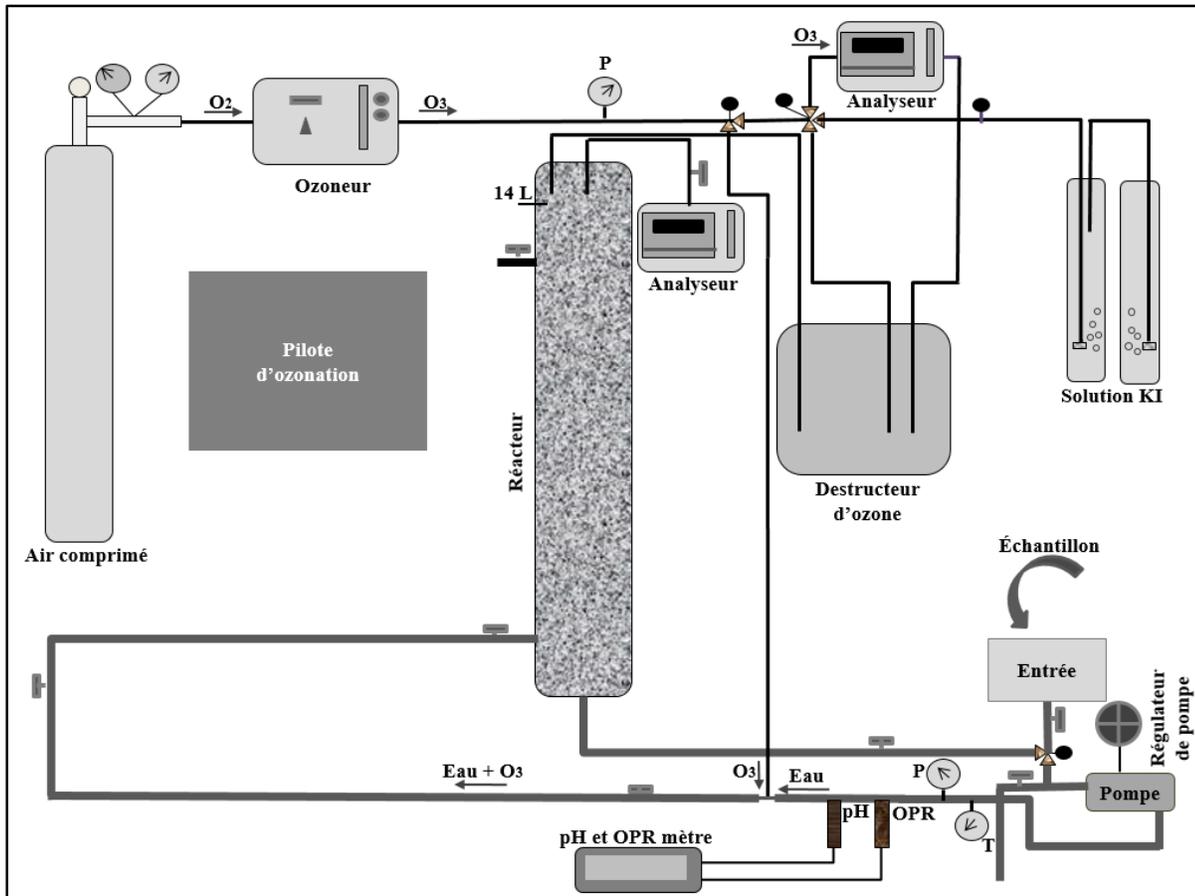


Figure 2.2 : Schéma représentatif du pilote d'ozonation utilisé au laboratoire

- Étape 2 : Mesure de débit de l'ozoneur

Après l'ajustement du débit de l'ozoneur, les quantités d'ozone produites ont été déterminées par deux méthodes : directement par l'analyseur à haute concentration model H1 (AFX) et indirectement par la méthode iodométrique.

- Étape 3 : L'ozonation de l'eau piscicole

Une fois le débit de l'ozoneur mesuré, l'ozone généré est transféré vers le réacteur contenant de l'échantillon à ozoner.

- Étape 4 : Mesure de sortie de l'ozoneur

Une fois l'essai d'ozonation est terminé, l'ozone généré est déterminé par deux méthodes : directement par l'analyseur et indirectement par la méthode iodométrique. Cette étape permet de vérifier si les quantités d'ozone générées par l'ozoneur sont stables ou non.

2.3.2 Expériences d'ozonation

Dans la présente étude, les échantillons ozonés sont les eaux d'alevinage et les eaux d'élevage de la pisciculture Gilbert. Les échantillons d'eau ont été prélevés de l'un des bassins d'alevinage ainsi que de l'un des bassins d'élevage les plus représentatifs de la pisciculture. Les échantillons sont transportés au laboratoire pour analyses ultérieures et conservés à une température inférieure à 8 ° C. Pendant chaque essai d'ozonation, le réacteur est rempli de 14 L d'échantillon. L'échantillon est mis en recirculation grâce à une pompe. L'ozone est généré par décharge corona à partir d'un ozoneur (modèle LAB2B), dont le débit est fixé à 4 L/min et l'intensité est fixée à 7, alimenté par de l'air sec dont la pression de la bouteille d'air est maintenue à 10 psi. Une Partie de l'ozone généré est transféré vers l'analyseur à haute concentration modèle H1 dont le débit est fixé à 1 L/min. L'autre partie de l'ozone généré est transférée vers le réacteur par l'intermédiaire du tube de Venturi. Une fois l'ozone est transféré vers le réacteur, les échantillons sont prélevés tous les 10 minutes pendant la première demi-heure d'ozonation. Après, les échantillons sont prélevés tous les 30 minutes.

2.4 Détermination des paramètres d'ozone

Le bilan d'ozone consiste à déterminer les concentrations d'ozone sur chacune des phases liquide et gazeuse dont les débits sont connus. Le schéma de la figure 2.3 présente les différentes grandeurs mesurées.

Le bilan d'ozone est représenté par l'équation suivante :

$$O_3 \text{ injecté} = O_3 \text{ résiduel} + O_3 \text{ consommé} + O_3 \text{ à l'évent}$$

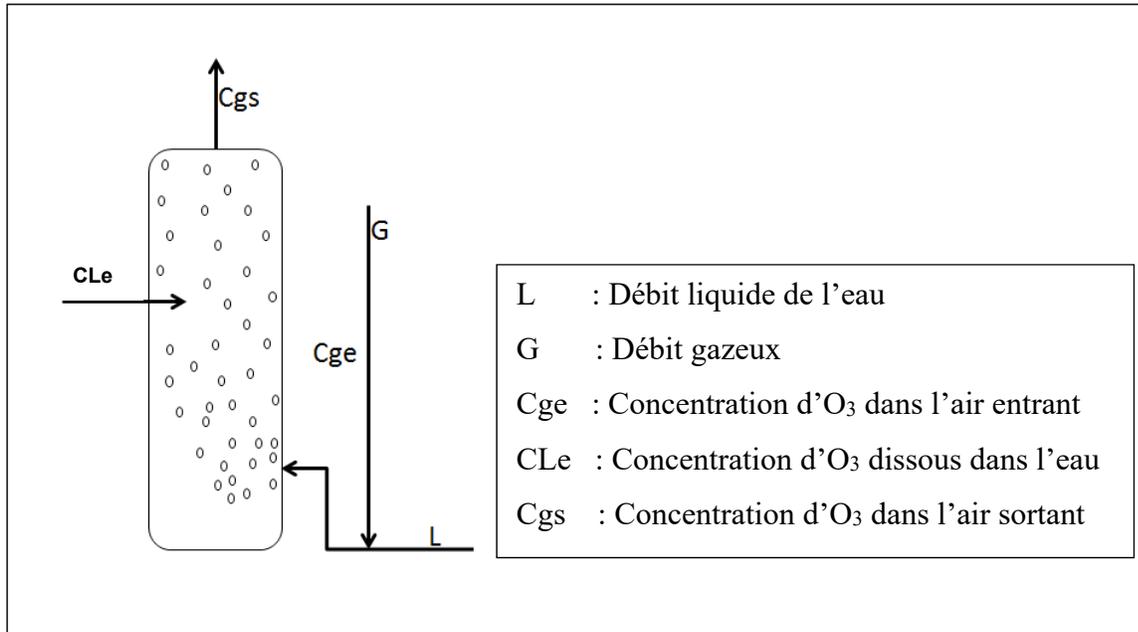


Figure 2.3 : Schéma représentatif du réacteur d'ozone avec les flux associés

2.4.1 Concentration d'ozone dans l'eau

La concentration en ozone dans l'eau a été déterminée, au cours de chaque prélèvement, selon la méthode spectrophotométrique au carmin indigo trisulfonate décrite par Bader et Hoigné (1981). L'absorbance de l'indigotrisulfonate n'ayant pas réagi a été mesurée à 600 nm avec un spectrophotomètre (Hach). Cette méthode repose sur la réaction rapide et sélective de la molécule d'ozone sur la double liaison C=C du carmin indigo (figure 2.4).

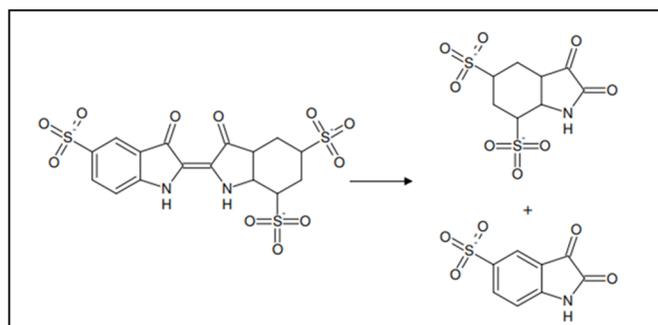


Figure 2.4 : Réaction du Carmin Indigo avec l'ozone

Le carmin indigo absorbe la lumière à 600 nm, ce qui n'est pas le cas pour les produits formés. Le protocole de mesure suivant a été utilisé : Un volume $V_e=10$ mL d'une solution de réactif d'Indigo I a tout d'abord été introduit dans une fiole jaugée de volume $V_T= 100$ mL (le réactif d'indigo I est obtenue par dilution d'une solution mère. Cette solution mère est obtenue par dissolution de 0,77 g de trisulfonate de potassium d'Indigo dans un litre d'eau distillée contenant 1 mL de H_3PO_4), - Un volume $V_e=90$ ml d'échantillon à doser a ensuite été ajouté, - après un temps de contact de 10 minutes à l'obscurité, l'absorbance de la solution a été mesurée à 600 nm avec une cellule de 10 cm à l'aide d'un spectrophotomètre UV-visible de marque Varian_Cary 300 Bio.

A partir de la différence d'absorbance $\Delta_{\text{absorbance}}$ entre la solution obtenue et un blanc préparé en remplaçant l'échantillon par de l'eau distillée, la concentration en ozone dissous de l'échantillon est déterminée à partir de la relation suivante :

$$[O_3] = \frac{V_T * \Delta_{\text{absorbance}}}{0,42 * V_e} \quad \text{en mg.L}^{-1} \quad (2.1)$$

2.4.2 Concentration d'ozone dans le gaz

La concentration en ozone dans le gaz a été déterminée au début et à la fin de l'essai de l'ozonation à l'aide de la méthode iodométrique (figure 2.5).

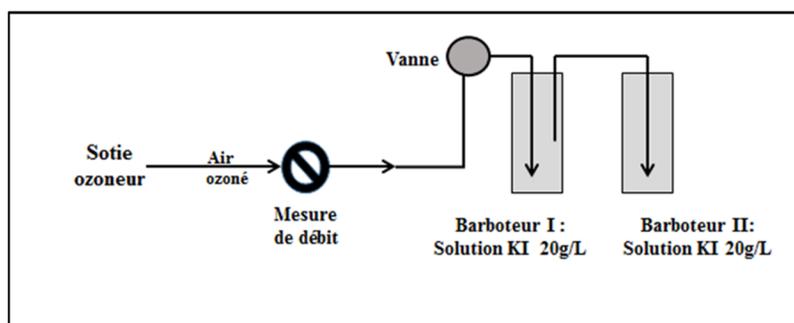
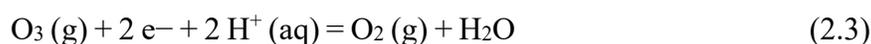


Figure 2-5 : Représentation schématique de la méthode iodométrique

Cette méthode consiste à injecter un flux d'air ozoné dans un barboteur contenant un volume V d'une solution d'iodure de potassium KI tamponnée à pH neutre par une solution phosphates de molarité 0,1 M (figure 2.5). L'ozone est ainsi piégé par la solution d'iodure de potassium. Le diiode formé est ensuite dosé par une solution de thiosulfate de sodium (0,1 N).

La méthode iodométrique est une méthode indirecte de dosage d'oxydoréduction. Les couples oxydant-réducteur mis en jeu sont $O_3(g)/O_2(g)$ et $I_2(aq)/I^-(aq)$. Les demi-équations associées aux deux couples sont les suivantes :



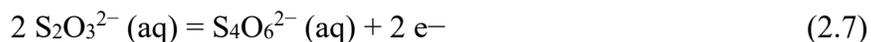
L'ozone oxyde les ions iodure en diiode $I_2(aq)$, selon l'équation de la réaction la suivante :



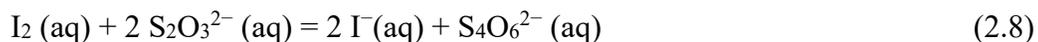
D'où

$$n(O_3) = n(I_2) \quad (2.5)$$

Le diiode est ensuite dosé par une solution de thiosulfate de sodium ($2 Na^+ + S_2O_3^{2-}$) de concentration 0,1 M en présence de quelques gouttes d'amidon. L'amidon est un indicateur qui donne une coloration bleue avec le diiode, il permet de mettre en évidence le point d'équivalence dont la couleur de la solution passe du bleue vers l'incolore. Les couples mis en réaction sont : I_2 / I^- et $S_4O_6^{2-} / S_2O_3^{2-}$.



L'équation de la réaction de dosage est donc :



D'où

$$n(I_2) = \frac{n(S_2O_3^{2-})}{2} \quad (2.9)$$

$$\text{Donc } n(\text{O}_3) = \frac{n(\text{S}_2\text{O}_3^{2-})}{2} \quad (2.10)$$

$$n(\text{O}_3) = \frac{[\text{S}_2\text{O}_3^{2-}] * V(\text{S}_2\text{O}_3^{2-})}{2} \quad (2.11)$$

La durée du piégeage étant Δt , le débit massique D_m d'ozone, exprimé en milligrammes par minute est déterminé par la formule suivante :

$$D_m = m(\text{O}_3) / \Delta t \quad (2.12)$$

Donc

$$D_m = n(\text{O}_3) * M(\text{O}_3) / \Delta t$$

Étant donné que

$$M(\text{O}_3) = 48 \text{ mol/L}$$

Donc

$$D_m = \frac{[\text{S}_2\text{O}_3^{2-}] * V(\text{S}_2\text{O}_3^{2-}) * 24}{\Delta t} \quad (2.13)$$

2.5 Détermination des paramètres physiques de l'eau

2.5.1 Oxygène dissous OD

L'oxygène dissous de l'eau a été déterminé à l'aide d'un oxymètre de marque YSI, ProODO initialement calibré.

2.5.2 Potentiel d'oxydoréduction POR

Le potentiel d'oxydoréduction de l'eau a été déterminé à l'aide d'une sonde de POR initialement étalonné.

2.5.3 Solides en suspension SES, solides en suspension volatils SESV, solides dissous SD et solides dissous volatils SDV

Pour la détermination de la concentration des solides totaux et des solides totaux volatils dans les échantillons, un volume V bien déterminé de l'échantillon est évaporé à 103-105 °C, pendant 1 heure et 30 minutes à 2 heures, dans une coupelle préalablement pesée. La quantité de solides totaux est obtenue par la différence entre le poids du résidu séché à 103-105 °C et le poids de la coupelle vide. Par la suite, pour l'analyse des solides totaux volatils, la coupelle est chauffée à 550 °C. La quantité de solides totaux volatils est obtenue par la différence entre le poids du résidu calciné à 550 °C et celui séché à 103-105 °C.

Pour la détermination de la concentration des solides totaux en suspension et des solides totaux volatils en suspension dans les échantillons, un volume V bien déterminé de l'échantillon est filtré à travers un papier filtre en fibres de verre. Ce filtre mis dans une petite coupelle initialement conditionnée dans un four à moufle à 550 °C est évaporé à 103-105 °C, pendant 1 heure et 30 minutes à 2 heures. La quantité de solides totaux en suspension est obtenue par la différence entre le poids du résidu séché à 103-105 °C et le poids de la coupelle vide. Par la suite, pour l'analyse des solides totaux volatils en suspension, la coupelle est chauffée à 550 °C. La quantité de solides totaux en suspension volatils est obtenue par la différence entre le poids du résidu calciné à 550 °C et celui séché à 103-105 °C.

Afin de déterminer la concentration des solides totaux dissous et des solides totaux volatils dissous dans les échantillons, un volume V bien déterminé de l'échantillon est filtré à travers un papier filtre en fibres de verre de diamètre 42 µm. Le filtrat est évaporé dans une coupelle préalablement pesée à 103-105 °C, pendant 1 heure et 30 minutes à 2 heures.

L'augmentation du poids de la coupelle représente le total des solides dissous. Pour obtenir les matières dissoutes volatiles, la coupelle est mise ensuite dans un four à moufle à 550°C pendant 15 à 20 minutes. La quantité de solides dissous volatils est obtenue par la différence entre le poids du résidu calciné à 550 °C et celui séché à 104 °C (American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), & Water Environment Federation (WEF), 2005).

2.5.4 Turbidité

La turbidité a été déterminée en utilisant un turbidimètre marque HACH modèle TL2350. Le turbidimètre doit être initialement étalonné par des étalons commerciaux de la compagnie Hach (formazine) dont les valeurs de turbidité sont respectivement < 0,1 UTN, 20 UTN, 200 UTN, 1 000 UTN, 4 000 UTN et 7 500 UTN. Les valeurs de turbidité ont été données directement par l'appareil en unité de turbidité néphelométrique UTN (APHA et al., 2005).

Les paramètres physiques de l'eau analysés au cours de cette étude, ainsi que les matériels et méthodes d'analyses, sont résumés au niveau du tableau 2.1.

Tableau 2-1 : Les paramètres physiques de l'eau étudiés et les matériels et méthodes d'analyses

| Paramètres analysés | Méthodes |
|--|--|
| Oxygène dissous OD | Méthode HACH : Sonde oxymètre de marque YSI, ProODO |
| Potentiel d'oxydoréduction POR | Méthode HACH : Sonde de POR |
| Solides en suspension SES, Solides en suspension volatils SESV, Solides dissous SD et les solides dissous volatils SDV | Méthode standard 2540D : solides totaux en suspension séchés à 103–105 °C et méthode standard 2540 E : solides totaux en suspension volatils séchés a 550 °C (APHA et al, 2005). |
| Turbidité | Méthode standard 2130 B : méthode néphelométrique (APHA et al, 2005). |

2.6 Détermination des paramètres chimiques de l'eau

2.6.1 pH

Le pH de l'eau a été déterminé à l'aide d'un pH mètre, pH/CON 510 Séries de marque OAKTON avec une électrode de référence, comprenant un indicateur de température en ° C. Les valeurs de pH des échantillons ont été lues directement de l'appareil initialement calibré avec les solutions standards de pH 4, 7 et 10.

2.6.2 Ions bromures Br⁻

Des analyses préliminaires ont été faites sur les différentes eaux piscicoles avant de commencer les expériences d'ozonation. Ces analyses consistent à déterminer la concentration des ions bromures dans les différents échantillons piscicoles.

Les concentrations des ions bromures Br⁻ dans les différents types d'eaux piscicoles ont été déterminé par la méthode de chromatographie ionique en utilisant un appareil de chromatographie ionique de marque Dionex (figure 2.5).



Figure 2.5 : Appareil de chromatographie ionique de marque Dionex

Cet appareil permet de doser simultanément plusieurs anions tels que les bromures, les chlorures, les nitrites, les nitrates et les sulfates dans les liquides. Pour les ions bromures, la limite de détection rapportée est de l'ordre de 0,1 mg/L et le domaine d'application est de 0,1 à 20 mg/L.

Les échantillons aqueux, qui contiennent des particules en suspension, sont filtrés sur une membrane 0,8 µm. Par la suite, Des étalons avec des concentrations connues en anions sont préparées et servent de vérifier l'étalonnage de l'appareil. Une fois l'appareil est étalonné, 5 ml de chacun des échantillons est mis dans une fiole. Les fioles bien fermés sont ensuite déposés dans les supports à fioles qui seront placés dans l'échantillonneur automatique. Ensuite, la séquence d'analyse à l'ordinateur a été démarrée. Les anions contenus dans l'échantillon sont séparés par une colonne échangeuse d'ions à l'aide d'un éluant approprié. Le temps de rétention diffère pour chacun des anions, ce qui permet de les identifier et de les doser. Ils sont dosés à l'aide d'un détecteur conductivimétrique et la conductivité mesurée est proportionnelle à la concentration de l'anion dans l'échantillon (Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ, 2014). Les conditions chromatographiques pour les analyses :

- Volume d'injection : 50 µl ;
- Précolonne : HPIC AG12A ;
- Colonne : HPIC AS12A ;
- Suppresseur : Dionex ASRS ;
- Éluant : Solution de carbonate de sodium 0,0027M et de bicarbonate de sodium 0,0003M ;
- Débit de l'éluant : 1,5 ml/minute ;
- Détecteur : Conductivité. Les résultats sont donnés directement en mg d'anions /L d'échantillon.

2.6.3 Carbone total CT, carbone organique total COT, carbone organique dissous COD et carbone inorganique total CIT

Un analyseur de marque TELEDYNE TEKMAR, modèle Apollo 9000 (figure 2.6) a quantifié le CT et le COT des échantillons bruts ; et le COD des échantillons filtrés (0,45 µm). Le volume

de l'échantillon injecté était de 40 mL et une courbe d'étalonnage avec des étalons de biphtalate de potassium de 100 à 500 mg-C/L a été déterminée ($R^2= 0,9994$). Le carbone inorganique totale est ensuite calculé par la relation : $CIT = CT - COT$ (APHA et al., 2005).



Figure 2.6 : Analyseur de marque TELEDYNE TEKMAR, modèle Apollo 9000

2.6.4 Demande chimique en oxygène DCO

Pour déterminer la demande chimique en oxygène des échantillons, un volume V d'échantillon est chauffé à $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant 1 heure et 30 minutes à 2 heures en milieu fortement acide avec une quantité connue de bichromate de potassium dans un tube à essai fermé. Le titrage de l'excès de dichromate de potassium par la solution d'ammonium ferreux SAF permet de déterminer la quantité de bichromate de potassium réduit et se mesure en équivalent d'oxygène (APHA et al., 2005).

2.6.5 Demande biochimique en oxygène DBO₅

La DBO₅ est la mesure de la consommation d'oxygène d'un échantillon après cinq jours d'incubations à $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ et à l'obscurité. Pour déterminer la DBO₅ des échantillons, un volume

approprié d'échantillon, déterminé à partir des valeurs de la demande chimique en oxygène, est placé dans une bouteille en verre de 300 ml en présence de bactéries, de substances nutritives et d'un inhibiteur de bactéries nitrifiantes. La concentration de l'oxygène dissous est mesurée par l'oxymètre au début et à la fin de la période d'incubation. La quantité d'oxygène consommée est proportionnelle à la concentration de matières oxydables (APHA et al., 2005).

2.6.6 Azote ammoniacal

L'azote ammoniacal dans les échantillons a été déterminé comme suit : Un volume V d'échantillon est distillé dans une solution d'acide borique. L'ammoniac dans le distillat est déterminé indirectement par la méthode titrimétrique en utilisant comme titrant l'acide sulfurique H_2SO_4 (APHA et al., 2005).

2.6.7 Phosphore total et du phosphore total soluble

La détermination du phosphore total dans les échantillons bruts et le phosphore total soluble dans les échantillons filtrés sur un papier filtre de $0.45\mu m$ s'effectue en deux étapes.

La première étape consiste à digérer et à oxyder toutes les formes de phosphore en présence du persulfate de potassium en milieu acide et à une température de $150^\circ C$. Au cours de cette étape, les polyphosphates sont transformés en orthophosphates par digestion à l'acide sulfurique, et le phosphore organique est converti en orthophosphate par une digestion au persulfate.

Au cours de la seconde étape, les ions orthophosphates réagissent avec les ions molybdate et les ions antimoine pour former un complexe phosphomolybdate. Ce complexe, en milieu acide, est réduit avec l'acide ascorbique pour former le bleu de molybdène qui absorbe la lumière à 880 nm . L'absorbance, donnée par le spectromètre UV-visible de marque Varian Cary 300 Bio, est proportionnelle à la concentration de l'ion orthophosphate présent dans l'échantillon. Cette concentration en orthophosphate est proportionnelle à la concentration de phosphore total dans l'échantillon (APHA et al., 2005).

2.6.8 Nitrates

Un spectrophotomètre marque HACH modèle DR-2700 a été utilisé pour déterminer directement les nitrates dans les échantillons selon la méthode HACH (réduction du cadmium).

2.6.9 Alcalinité

Un titrage, par l'acide sulfurique à 0,02 N en présence de l'indicateur mixte, d'un volume V d'échantillon a été effectué afin de déterminer l'alcalinité. Le titrage se termine une fois que la couleur bleue de l'indicateur mixte vire vers le rouge (APHA et al., 2005).

Le tableau 2.2 présente les différents paramètres chimiques de l'eau analysés au cours de cette étude ainsi que les méthodes utilisées au cours de leurs analyses.

Tableau 2-2 : Les paramètres chimiques de l'eau analysés et les méthodes d'analyse

| Paramètres analysés | Méthodes |
|---|---|
| pH | Méthode HACH : Sonde de pH mètre, pH/CON 510 de marque OAKTON |
| Ions bromures Br ⁻ | Méthode standard 4110 B : Méthode de chromatographie ionique (APHA et al, 2012) |
| Carbone total CT, Carbone organique total COT, Carbone organique dissous COD, Carbone inorganique total CIT | Méthode standard 5310 B : Méthode de combustion à haute température (APHA et al, 2005). |
| Demande chimique en oxygène DCO | Méthode standard 5220 C : Reflux fermé, méthode titrimétrique (APHA et al, 2005) |
| Demande biologique en oxygène DBO ₅ | Méthode standard 5210 A : Test DBO de 5 jours (APHA et al, 2005) |

Tableau 2-3 (Suite) : Les paramètres chimiques de l'eau analysés
et les méthodes d'analyse

| Paramètres analysés | Méthodes |
|---|--|
| Azote ammoniacal | Méthode standard 4500 NH ₃ - B : Étape de distillation préliminaire et 4500 NH ₃ -C : méthode titrimétrique (APHA et al, 2005) |
| Phosphore total, le phosphore total soluble | Méthode standard 4500-P B : Préparation des échantillons, méthode de digestion au persulfate (APHA et al, 2005) |
| Nitrates | Méthode Hach 8039 : Réduction du cadmium (HACH, 20112) |
| Alcalinité | Méthodes standard 2320 B : Titration à l'acide sulfurique (APHA et al, 2005) |

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

À partir de la méthodologie présentée précédemment, les résultats suivants viennent de l'exploitation de pilote d'ozonation installé au laboratoire et des analyses expérimentales effectuées sur les eaux piscicoles. Les résultats obtenus sont présentés dans les sous parties suivantes dédiées d'une part à la caractérisation des eaux piscicoles, d'autre part aux essais d'ozonation et enfin à l'influence de la dose d'ozone introduite sur la qualité physicochimique des eaux piscicoles.

3.1 Caractérisation des eaux piscicoles

Des analyses préliminaires sont faites sur les échantillons avant de commencer les expériences d'ozonation. Ces analyses consistent à déterminer la concentration des ions bromures dans les différents échantillons piscicoles. Au cours du processus d'ozonation, en cas de présence des ions bromures dans l'eau ozonée, le bromate et le bromoforme se forment. Ces deux produits sont considérés comme des composés potentiellement cancérigènes.

Des standards dont les concentrations en ions bromures sont connues (20 ppm) ont été utilisés afin de vérifier que l'appareil fonctionne bien tout au long des analyses.

Les résultats obtenus des analyses par chromatographie ionique des ions bromures dans les eaux piscicoles sont présentés dans le tableau 3.1.

Tableau 3-1 : Résultats de l'analyse par chromatographie ionique des ions bromures dans les eaux piscicoles

| Échantillons | [Br ⁻] en ppm |
|-------------------------------------|---------------------------|
| STD20 (Standard 20 ppm) | 19,7 |
| P1 A (Eaux des puits artésiens) | non détecté |
| P1 B (Eaux des puits artésiens) | non détecté |
| P2 A (Eaux des bassins d'alevinage) | non détecté |

Tableau 3-2 (Suite) : Résultats de l'analyse par chromatographie

ionique des ions bromures dans les eaux piscicoles

| Échantillons | [Br ⁻] en ppm |
|---------------------------------------|---------------------------|
| STD20 (Standard 20 ppm) | 19,9 |
| P2 B (Eaux des bassins d'alevinage) | non détecté |
| P3 B (Eaux des bassins d'élevage) | non détecté |
| P4 A (Effluent des bassins d'élevage) | non détecté |
| STD20 (Standard 20 ppm) | 20 |
| P4 B (Effluent des bassins d'élevage) | non détecté |
| P5 A (Eaux de surface) | non détecté |
| P5 B (Eaux de surface) | non détecté |
| STD20 (Standard 20 ppm) | 19,9 |

Les analyses par chromatographie ionique des ions Br⁻ dans les différents échantillons (tableau 3.1) montrent que les eaux des puits artésiens, les eaux souterraines, les eaux d'alevinage, les eaux d'élevage et les effluents des bassins d'élevage ne contiennent pas des ions bromures.

Les matrices des eaux piscicoles, en termes de caractéristiques physico-chimiques, des affluents des bassins d'alevinage et d'élevage et des eaux des bassins d'alevinage et d'élevage ont été analysées et sont présentées aux tableaux 3.2 et 3.3.

L'affluent des bassins d'alevinage est une eau dépourvue en ions bromures et issue d'un puits artésien. L'affluent des bassins d'élevage est un mélange constitué d'une eau souterraine, l'effluent des bassins d'alevinage et une partie de l'eau d'élevage préalablement filtrée par les biofiltres mis au niveau des bassins d'élevage.

Les résultats de la caractérisation chimique des eaux piscicoles montrent que les eaux d'alevinage sont généralement très peu chargées et elles conservent des caractéristiques chimiques proches des eaux des puits artésiens.

Tableau 3-3 : Les caractéristiques chimiques des eaux piscicoles

| | Eaux puits artésiens (P1) | Eaux alevinage (P2) | Eaux élevage (P3) | Effluent bassins d'élevage (P4) |
|--|---------------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| pH | 7,4 ± 0,1 | 7,5 ± 0,2 | 7,8 ± 0,2 | 7,8 ± 0,2 |
| Demande chimique en oxygène DCO (mgO ₂ /L) | 15 ± 2 | 83 ± 4 | 212 ± 5 | 286 ± 5 |
| Demande biologique en oxygène DBO ₅ (mgO ₂ /L) | Non mesurée | 43 ± 3 | 105 ± 8 | Non mesurée |
| Carbone total CT (mg C/L) | 63 ± 2 | 367 ± 4 | 398 ± 10 | 352 ± 9 |
| Carbone organique total COT (mg C/L) | 17 ± 2 | 41 ± 2 | 57 ± 8 | 48,5 ± 7 |
| Carbone organique dissous COD (mg C/L) | 5 ± 1 | 32 ± 3 | 43 ± 9 | 36 ± 8 |
| Carbone inorganique total CIT (mg C/L) | 46 ± 4 | 326 ± 4 | 342 ± 7 | 304 ± 12 |
| Alcalinité (mg CaCO ₃ /L) | 26 ± 2 | 290 ± 3 | 512 ± 8 | 486 ± 10 |
| Phosphore total Pt (mg P- PO ₄ ³⁻ /L) | Non détecté | Non détecté | 10 ± 2 | 9 ± 4 |
| Phosphore total dissous (mg P- PO ₄ ³⁻ /L) | Non détecté | Non détecté | 8 ± 4 | 6 ± 2 |
| Azote ammoniacal (mg NH ₃ -N/L) | Non détecté | Non détecté | 26 ± 3 | 13 ± 5 |
| Nitrates (mg NO ₃ ⁻ /L) | Non détecté | 3 ± 1 | 7 ± 2 | 5 ± 2 |

Les deux types d'eau (les eaux des puits artésiens et el les eaux d'alevinage) ne contiennent pas de phosphore total et d'azote ammoniacal. Concernant les autres paramètres chimiques de la qualité de l'eau, les résultats obtenus montrent que la DCO, la DBO₅, le CT, le COT, le CIT, le COD, l'alcalinité et les nitrates sont plus élevés dans les eaux d'alevinage que dans les eaux des puits artésiens.

Les eaux d'élevage et les effluents des bassins d'élevage sont plus chargées que les eaux d'alevinage. Les effluents des bassins d'élevage sont plus chargées que les eaux des bassins d'élevage.

Les concentrations en DCO, DBO₅, CT, CIT, COT, COD, alcalinité, Pt, azote ammoniacal et nitrates atteignent leurs maximums au niveau des effluents des bassins d'élevage et leurs minimums au niveau des eaux des puits artésiens. Par exemple les concentrations en DCO obtenues s'élèvent progressivement en passant de 15 mg-C/L au niveau des eaux des puits artésiens, 83,5 mg-C/L au niveau des eaux d'alevinage, 212 mg-C/L au niveau des eaux d'élevage pour atteindre finalement 286 mg-C/L au niveau des effluents des bassins d'élevage. La caractérisation des paramètres physiques des eaux piscicoles (tableau 3.3) révèle elle aussi que les eaux des bassins d'alevinage sont peu chargées par rapport aux eaux des bassins d'élevage. Les valeurs de pH, les teneurs en MDT, MVD, MES, MVES et la turbidité diminuent en passant des effluents des bassins d'élevage, des eaux d'élevage, des eaux d'alevinage pour atteindre un minimum au niveau des eaux des puits artésiens. Prenons comme exemple les SDT atteignent un maximum de 315 mg/L au niveau des effluents des bassins d'élevage, puis 207 mg/L au niveau des eaux d'élevage, 34 mg/L au niveau des eaux d'alevinage et finalement 15,6 mg/L au niveau des eaux des puits artésiens.

Tableau 3-4 : Les caractéristiques physiques des eaux piscicoles

| | Eaux puits artésiens (P1) | Eaux alevinage (P2) | Eaux élevage (P3) | Effluent bassins d'élevage (P4) |
|--|---------------------------|---------------------|-------------------|---------------------------------|
| Matières dissoutes totales MDT (mg/L) | 16 ± 3 | 34 ± 6 | 207 ± 8 | 315 ± 5 |

Tableau 3-5 (Suite): Les caractéristiques physiques des eaux piscicoles

| | Eaux puits artésiens (P1) | Eaux alevinage (P2) | Eaux élevage (P3) | Effluent bassins d'élevage (P4) |
|--|---------------------------|---------------------|-------------------|---------------------------------|
| Matières volatiles dissoutes MVD (mg/L) | 3 ± 2 | 23 ± 4 | 175 ± 6 | 210 ± 4 |
| Matières en suspension totales MES (mg/L) | Non détecté | 22 ± 5 | 96 ± 4 | 112 ± 7 |
| Matières volatiles en suspension MVES (mg/L) | Non détecté | 18 ± 3 | 73 ± 3 | 82 ± 6 |
| Turbidité (UTN) | 0,21 ± 0,03 | 0,49 ± 0,1 | 1,35 ± 0,2 | 2,2 ± 0,4 |

La caractérisation physico-chimique des eaux piscicoles montre que ces eaux ne contiennent pas des ions bromures. Les eaux d'alevinage sont très peu chargées en conservant des caractéristiques proches des eaux des puits ou de surface. Les eaux d'élevage sont plus chargées que les eaux d'alevinage.

Ces résultats sont logiques puisqu'au niveau des bassins d'alevinage, les alevins pèsent entre 5 et 10 grammes et le pisciculteur leurs donne d'environ 100 g d'aliments par jour. Leurs activités métaboliques sont très réduites, et la quantité d'aliments donnée par jour est faible ce qui explique la conservation des eaux d'alevinage des caractéristiques proches des eaux de source. Par contre, au niveau des bassins d'élevage, les poissons pèsent entre 25 et 45 grammes et la quantité d'aliments donnée par jour est d'environ 15 kg. Leurs activités métaboliques sont importantes. Cependant, la qualité physico-chimique de l'eau d'élevage est modifiée. Le rejet des produits d'excrétion dans l'eau est le principal agent responsable de cette détérioration de la qualité de l'eau. D'où les eaux d'élevage sont beaucoup plus chargées que les eaux d'alevinage.

3.2 Bilan d'ozone

Le bilan d'ozone consiste à déterminer les concentrations d'ozone sur chacune des phases liquide et gazeuse.

Les résultats expérimentaux obtenus des concentrations d'ozone injecté, d'ozone à l'évent et d'ozone résiduel sont présentés sur la figure 3.1 pour les eaux d'alevinage et sur la figure 3.2 pour les eaux d'élevage.

Au cours de l'ozonation de l'eau d'alevinage, la quantité d'ozone gazeux injectée dans le réacteur est fixée à $1,3 \pm 0,05$ mg/min/L.

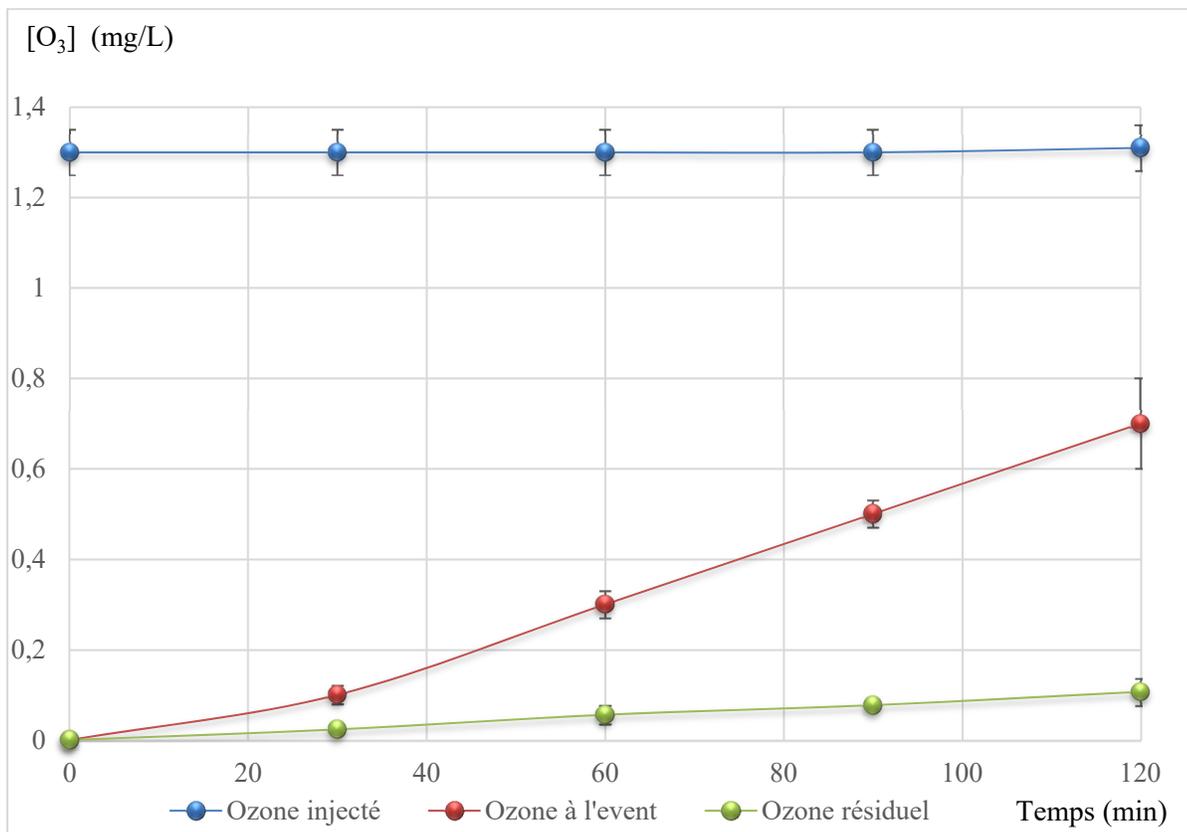


Figure 3.1 : Bilan de l'ozone au cours d'ozonation de l'eau d'alevinage

Au cours de l'ozonation de l'eau d'élevage, la quantité d'ozone gazeux injectée dans le réacteur est fixée à $1,35 \pm 0,03$ mg/min/L.

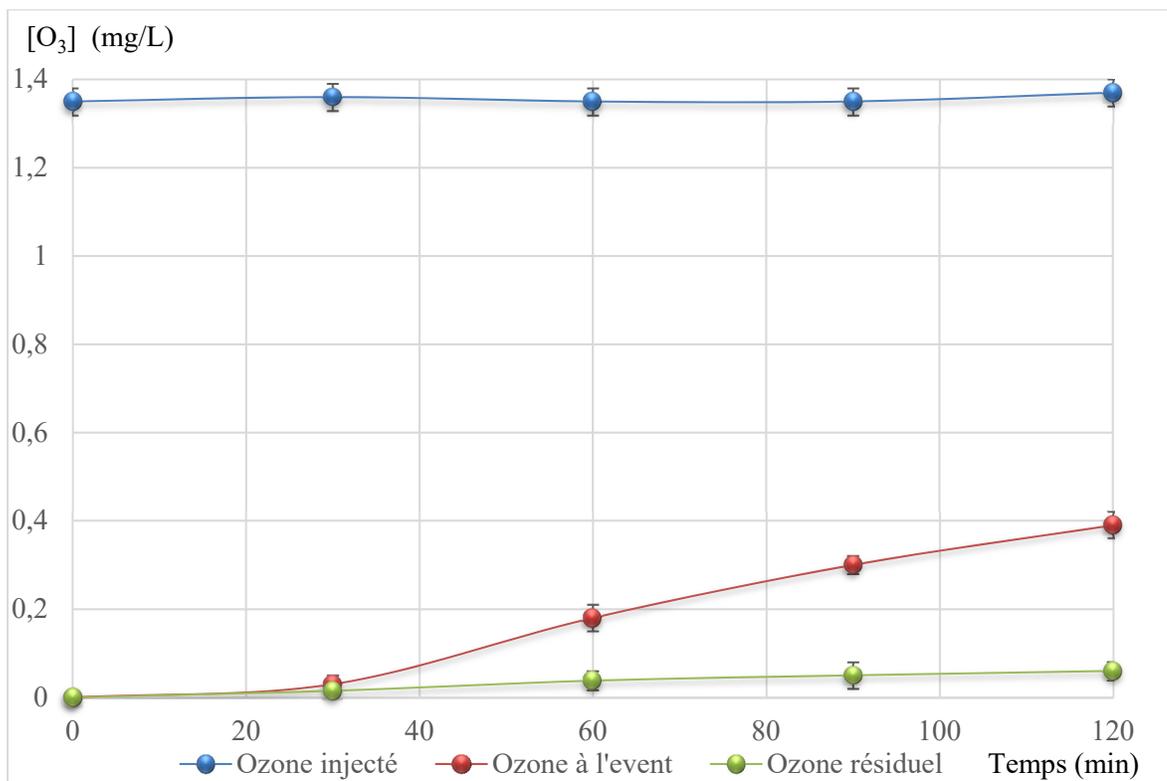


Figure 3.2 : Bilan de l'ozone au cours d'ozonation de l'eau d'élevage

Les concentrations d'ozone résiduel obtenues dans les eaux d'alevinage ainsi que dans les eaux d'élevage sont toujours en augmentation en fonction de temps (figure 3.1 et figure 3.2). Les valeurs des concentrations d'ozone résiduel enregistrées dans les eaux d'alevinage sont supérieures que celles trouvées dans l'eau d'élevage.

Selon la littérature, les seuils de concentration d'ozone résiduel conseillés pour ne pas nuire à la santé des poissons sont de l'ordre de 0,02 mg/L pour les alevins et de l'ordre de 0,05 mg/L pour les poissons (Bullock et al.,1997). Les résultats obtenus des concentrations d'ozone résiduel permettent donc de déterminer le temps de réaction sécuritaire au cours de l'ozonation des eaux d'alevinage ainsi qu'au cours d'ozonation des eaux d'élevage. Les courbes de l'évolution des concentrations d'ozone résiduel en fonction du temps au cours de l'ozonation des eaux d'alevinage (figure 3.1) et des eaux d'élevage (figure 3.2) montrent que le temps sécuritaire de réaction est d'environ 25 minutes dans le cas d'ozonation des eaux d'alevinage, et est d'environ 110 minutes dans le cas d'ozonation des eaux d'élevage.

Les concentrations d'ozone mesurées à la sortie de réacteur augmentent légèrement en fonction de temps au cours de l'ozonation des eaux d'alevinage ainsi qu'au cours d'ozonation des eaux d'élevage.

Le suivi des concentrations d'ozone injecté (entrée de réacteur), d'ozone à l'évent (sortie du réacteur) ainsi que l'ozone résiduel en solution permet de réaliser le bilan de masse sur la concentration d'ozone consommée. L'ozone consommé est donc calculé par la formule suivante :

$$\text{O}_3 \text{ consommé} = \text{O}_3 \text{ injecté} - \text{O}_3 \text{ résiduel} - \text{O}_3 \text{ à l'évent}$$

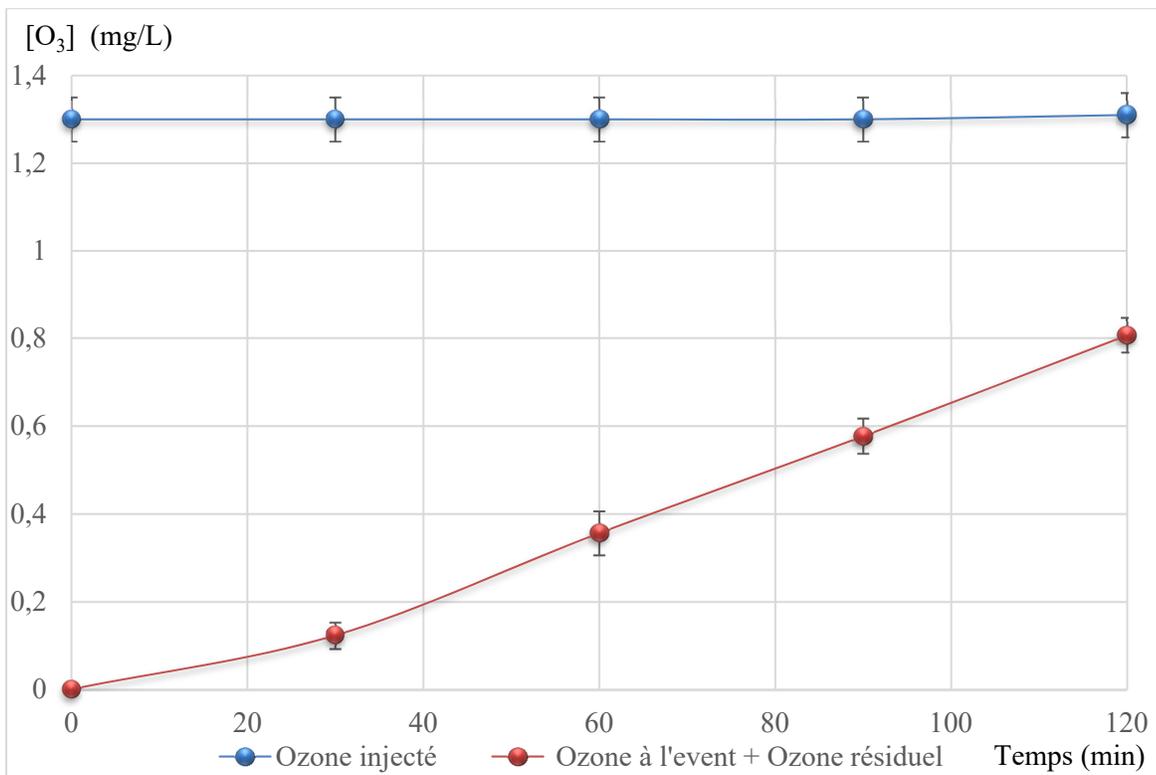


Figure 3.3 : Ozone consommé au cours de l'ozonation des eaux d'alevinage

Le suivi de la concentration d'ozone consommé au cours de l'ozonation des eaux d'alevinage et des eaux d'élevage pendant 2 heures montre que cette concentration est toujours en diminution en fonction du temps (figure 3.3 et figure 3.4).

Au début de l'ozonation des deux types d'eau, la concentration de l'ozone consommé est maximale, ensuite et en fonction du temps, cette concentration diminue graduellement. La cinétique de cette diminution dépend essentiellement de la qualité de l'eau à ozoner et des conditions générales de l'expérience.

Les valeurs enregistrées des concentrations d'ozone consommé au cours d'ozonation des eaux d'alevinage sont inférieures que celles trouvées au cours d'ozonation des eaux d'élevage.

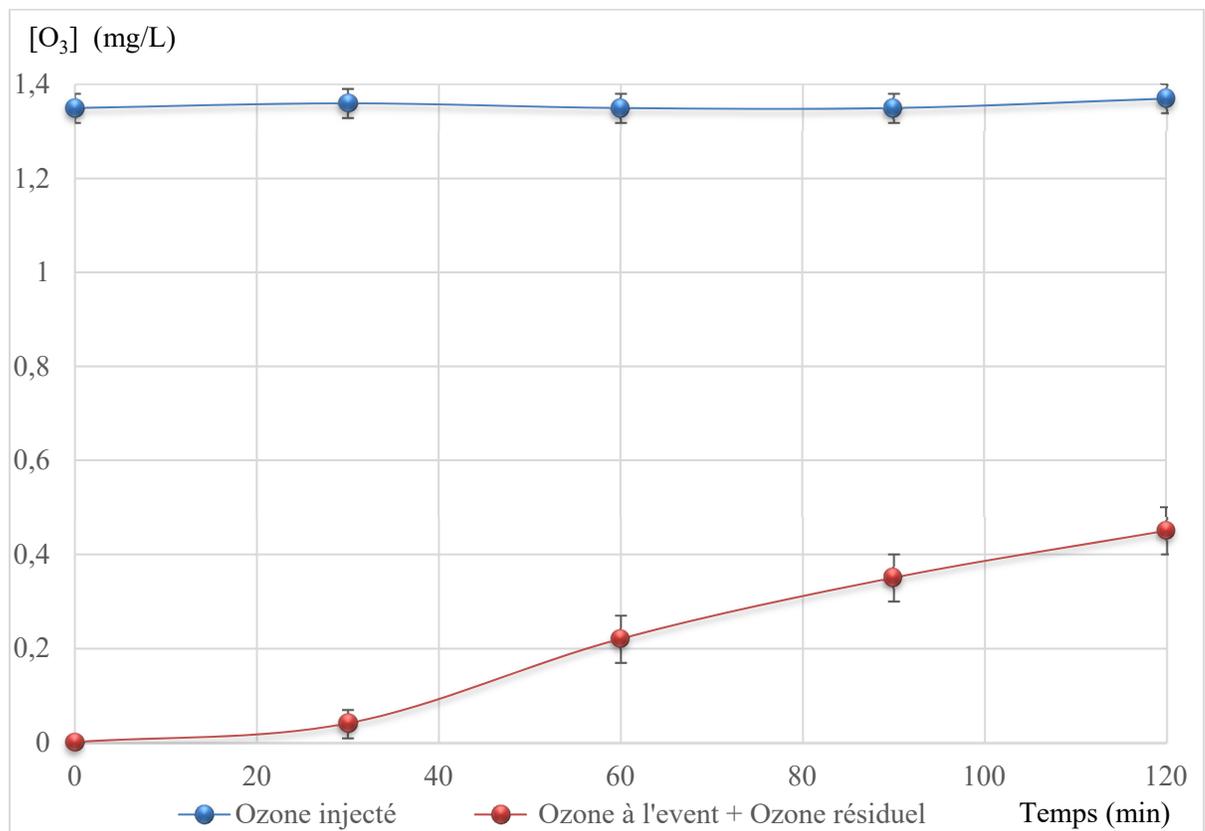


Figure 3.4 : Ozone consommé au cours d'ozonation des eaux d'élevage

Donc, la consommation d'ozone ainsi que la concentration d'ozone résiduel dans l'eau dépendent fortement de la qualité de l'eau ozonée. En effet, plus l'eau est chargée, plus est grande la consommation d'ozone et moins est la concentration d'ozone résiduel dans l'eau.

3.3 Effet de l'ozonation sur les paramètres physiques des eaux piscicoles

L'évaluation de l'effet de l'ozonation sur la qualité physique des eaux piscicoles a été effectuée à travers le suivi de l'évolution des paramètres physiques des eaux au cours du temps d'ozonation. Les paramètres physiques analysés sont le potentiel d'oxydoréduction, les solides et la turbidité.

3.3.1 Suivi du potentiel d'oxydoréduction POR

Afin d'étudier l'effet de l'ozonation sur le potentiel d'oxydoréduction des eaux piscicoles, ce paramètre a été mesuré toutes les 10 minutes tout au long des essais d'ozonation. La figure 3.5 illustre les résultats obtenus.

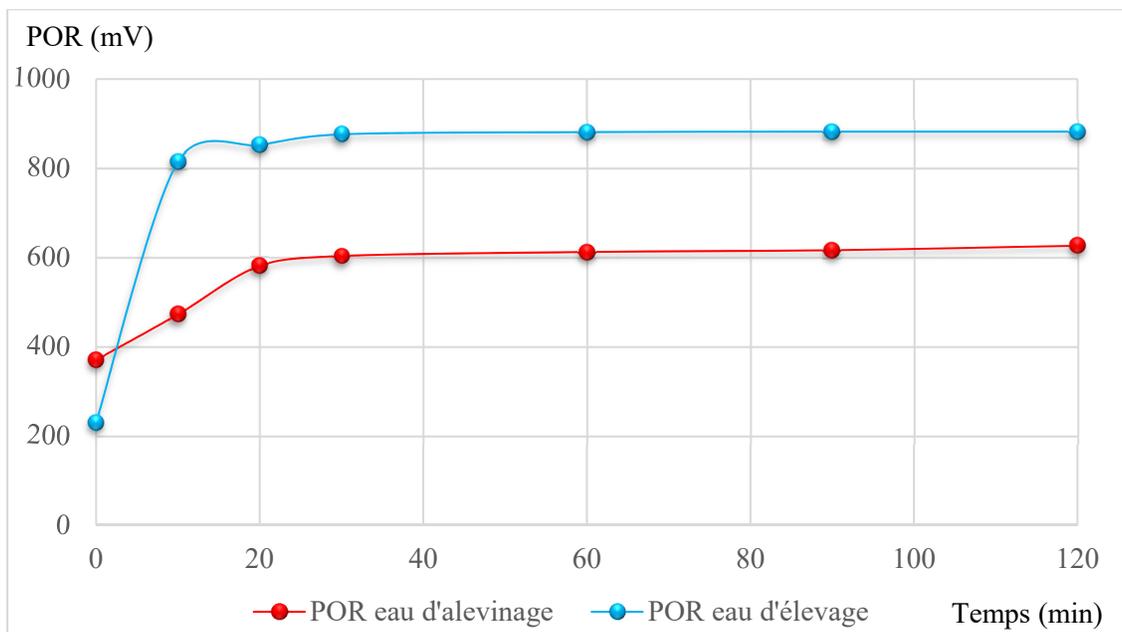


Figure 3.5 : Évolution du POR au cours de l'ozonation des eaux piscicoles

Au cours d'ozonation des eaux d'alevinage, le POR augmente fortement au cours des premières 40 minutes dont il passe de 370 mV à 603 mV, et se stabilise le reste de l'essai à environ 610 mV.

Dans le cas d'ozonation des eaux d'élevage, Le POR augmente aussi fortement au cours des premières 60 minutes pour atteindre une valeur proche 850 mV, et se stabilise à une valeur proche de 880 mV le reste de l'expérience.

L'élévation du POR au cours de l'ozonation est logique et elle est conforme aux résultats déjà trouvés dans les anciennes études tel que trouvé par Alex Augusto Gonçalves en 2011. Cette augmentation peut être due à la présence des molécules oxydées et à la présence de l'ozone résiduel dans l'eau.

3.3.2 Effet de l'ozonation sur les solides et la turbidité

- Effet de l'ozonation sur les solides

Le suivi de l'effet de l'ozonation sur les solides est réalisé en suivant l'évolution des solides totaux, des solides en suspension totaux et des solides dissous totaux durant l'ozonation des eaux piscicoles. La figures 3.6 et 3.7 illustrent les variations de ces paramètres pendant 2 heures d'ozonation. Les solides en suspension sont faibles au niveau des eaux d'alevinage dont ils ne dépassent pas les 30 mg/L, alors qu'ils sont beaucoup plus élevés au niveau des eaux d'élevage (environ 100 mg/L). Lors des essais d'ozonation des eaux d'alevinage ainsi que des eaux d'élevage, ces valeurs ne varient pratiquement pas (figure 3.6 et figure 3.7).

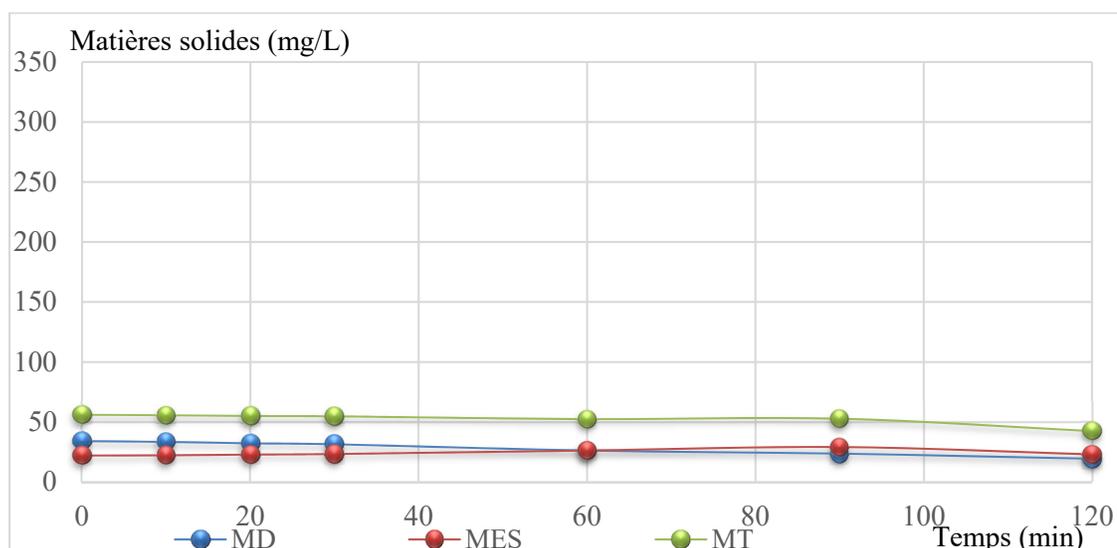


Figure 3.6 : Évolution des solides au cours de l'ozonation des eaux d'alevinage

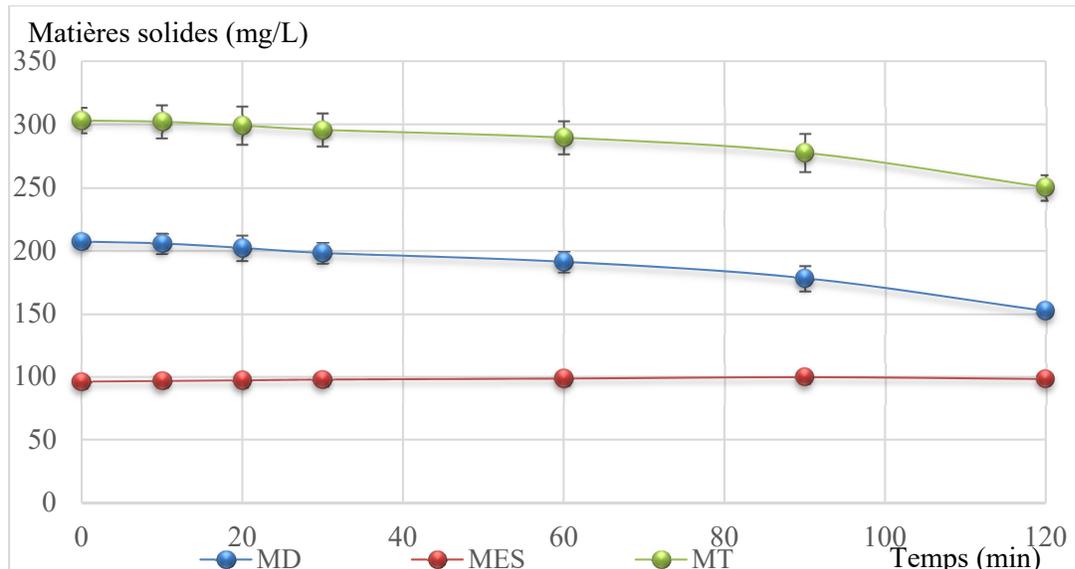


Figure 3.7 : Évolution des solides au cours de l'ozonation des eaux d'élevage

Les figures 3.6 et 3.7 illustrent que les solides dissous diminuent durant l'ozonation des deux types d'eau dont ils passent de 34 à 19 mg/L dans le cas d'ozonation des eaux d'alevinage et de 207 à 152 mg/L dans le cas d'ozonation des eaux d'élevage. Comme les solides totaux sont la somme des solides en suspension et des solides dissous, et puisque les solides en suspension ne varient pratiquement pas lors de l'ozonation, la cinétique des solides totaux est donc identique à celle des solides dissous.

- Effet de l'ozonation sur la turbidité

L'étude de l'effet de l'ozonation sur la turbidité des eaux piscicoles permet d'obtenir les résultats présentés dans la figure 3.8.

Les résultats obtenus (figure 3.8) montrent que la turbidité est caractérisée par une légère augmentation au cours d'ozonation des eaux piscicoles. Dans le cas d'ozonation des eaux d'alevinage, la turbidité passe de 0,4 à environ 0,65 UTN à la fin de l'essai d'ozonation. Dans le cas des eaux d'élevage, la turbidité augmente légèrement dont elle passe d'environ 1,9 vers environ 4,4 à la fin de l'essai d'ozonation.

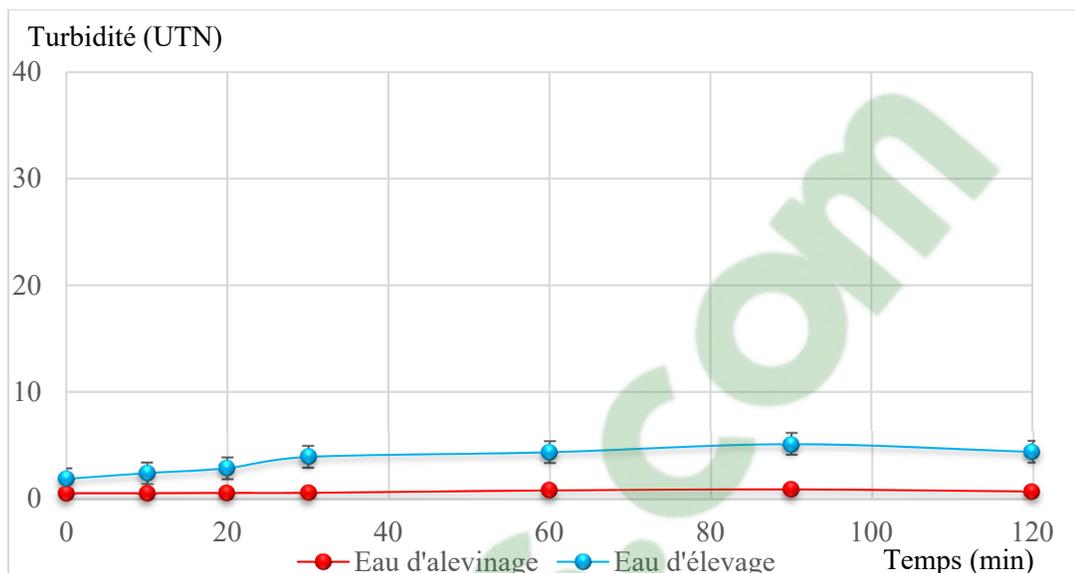


Figure 3.8 : Évolution de la turbidité au cours de l'ozonation des eaux piscicoles

Au cours de l'ozonation des eaux piscicoles (alevinage et élevage), le suivi des solides montre que les matières en suspension ne varient pratiquement pas lors de l'ozonation. Par contre, la turbidité est caractérisée par une légère augmentation. Souvent, la mesure de la turbidité est utilisée comme une évaluation indirecte des matières en suspension, or ce n'est pas le cas des résultats trouvés. Ceci peut être expliqué par le fait que des molécules solubles dans l'eau précipitent et forment des suspensions colloïdales. Ces suspensions ne sont pas retenues sur le filtre utilisé lors de l'analyse des matières en suspension (porosité de l'ordre de 1,2 à 1,5 μm). Généralement, dans les systèmes à recirculation, l'ozonation peut produire des changements incohérents dans la turbidité. Cela est dû au fait que l'ozonation favorise la microfoculation et peut donc modifier à la fois la concentration et la taille des colloïdes dans les systèmes (Krumins et al., 2001a). Les matières dissoutes ont été réduites de manière significative avec l'application de l'ozone. Cette réduction est normale et elle s'explique par l'oxydation partielle des matières organiques dissoutes dans l'eau lors de l'ozonation.

3.4 Effet de l'ozonation sur les paramètres chimiques des eaux piscicoles

L'évaluation de l'effet de l'ozonation sur les paramètres chimiques des eaux piscicoles a été effectuée en suivant l'évolution, au cours du temps d'ozonation, du pH, la DCO, la DBO₅, le CT, le CIT, le COT, l'alcalinité et les nitrates.

3.4.1 Suivi de pH

Afin de suivre l'effet de l'ozone sur le pH des eaux piscicoles, le pH est mesuré toutes les 10 minutes tout au long des essais d'ozonation. La figure 3.9 résume les résultats de pH obtenus au cours d'ozonation des eaux d'alevinage et des eaux d'élevage.

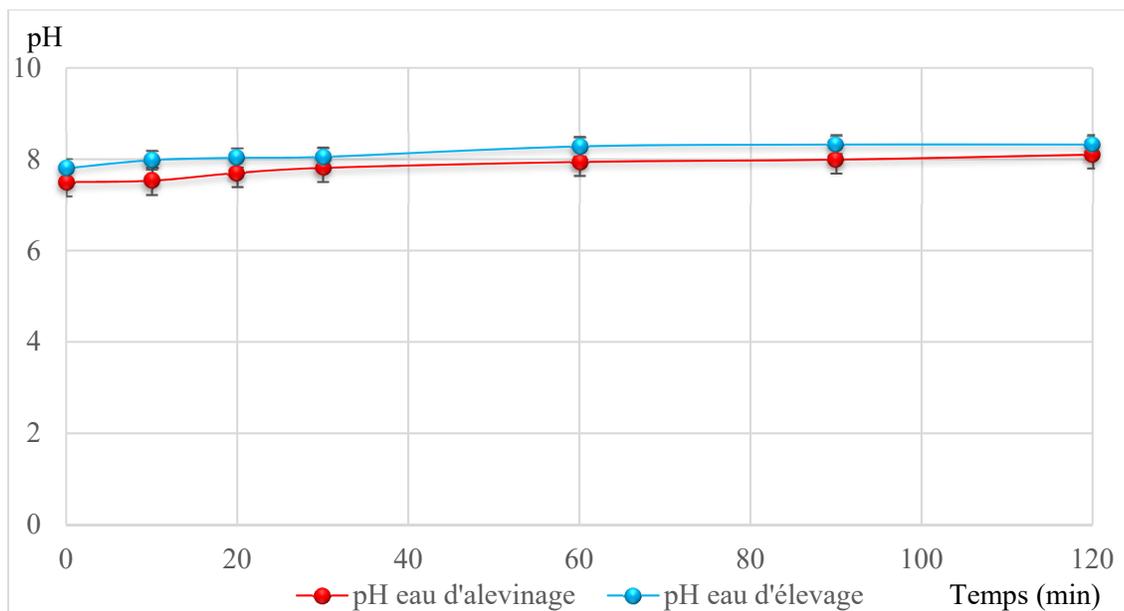


Figure 3.9 : Évolution du pH au cours d'ozonation des eaux piscicoles

La figure 3.9 montre une légère augmentation du pH au cours d'ozonation des deux types d'eaux piscicoles. Au cours de l'ozonation des eaux d'alevinage, le pH augmente légèrement au cours des premières 40 minutes et se stabilise le reste de l'expérience à une valeur proche

de 8,1. Dans le cas d'ozonation des eaux d'élevage, le pH augmente aussi légèrement pendant les premières 60 minutes et se stabilise le reste de l'essai à près de 8,3.

L'augmentation du pH au cours d'ozonation des eaux piscicoles peut être expliquée par le phénomène de dégazage de CO_2 et par conséquent le déplacement de l'équilibre carbonique. Le phénomène de dégazage consiste à l'élimination des gaz dissous des liquides, en particulier de l'eau. Il existe de nombreuses méthodes possibles pour éliminer les gaz des liquides. Dans le cas d'ozonation des eaux piscicoles, les eaux sont agitées vigoureusement et soumises à des bulles de gaz pendant 2 heures. Par conséquent le phénomène de dégazage des gaz dissous tel que le CO_2 est favorisée. De plus, la solubilité d'un gaz obéit à loi de Henry, c'est-à-dire que la quantité de gaz dissous dans un liquide est proportionnelle à sa pression partielle. Par conséquent, le fait de placer une solution sous pression réduite rend le gaz dissous moins soluble et favorise le dégazage de celui-ci, tel est le cas des échantillons d'eau ozonés dont en faisant l'échantillonnage la pression dans le système diminue ce qui favorise le dégazage des gaz dissous.

3.4.2 Suivi de la demande chimique en oxygène DCO

Les résultats obtenus à partir de l'analyse de la demande chimique en oxygène des eaux piscicoles au cours de l'ozonation pendant 2 heures sont présentés dans la figure 3.10.

Lors de l'ozonation des eaux d'alevinage et des eaux d'élevage, la demande chimique en oxygène diminue en fonction du temps. Cette diminution peut être expliquée l'oxydation partielle des molécules organiques au cours de l'ozonation. Dans le cas d'ozonation des eaux d'alevinage, la DCO passe de 83,5 mg-C/L à environ 21 mg-C/L, et diminue donc d'environ 70 %. Au cours d'ozonation des eaux d'élevage, la DCO diminue d'environ 40 % en passant de 190 mg-C/L sans ozonation à près de 114 mg-C/L après deux heures d'ozonation.

La diminution des teneurs du DCO lors d'ozonation des eaux piscicoles confirme l'hypothèse de l'oxydation partielle des molécules organiques lors de l'ozonation.

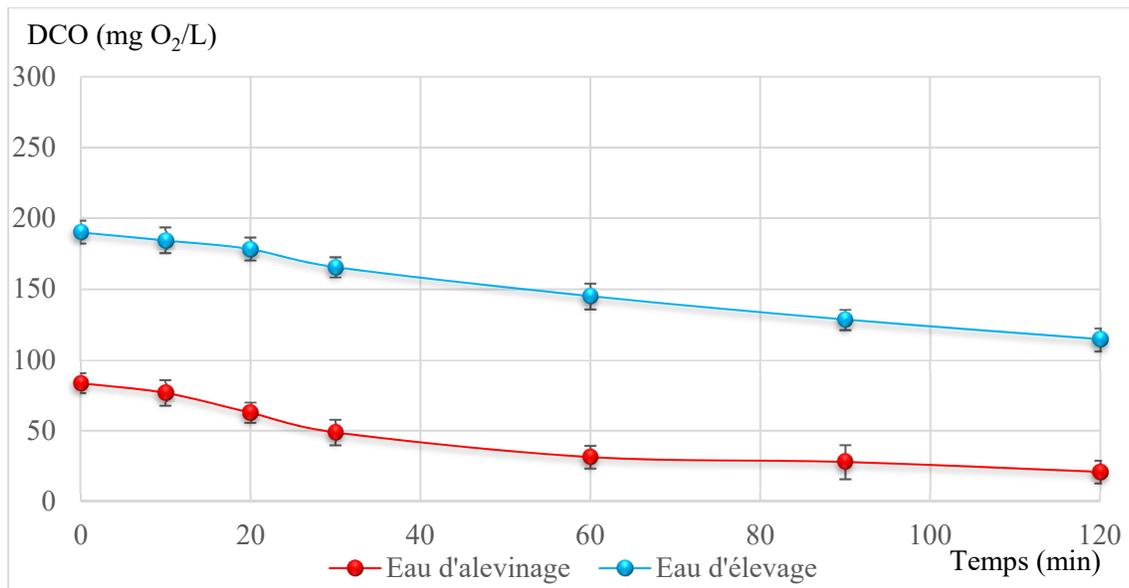


Figure 3.10 : Évolution de la DCO au cours de l'ozonation des eaux piscicoles

Lors de l'ozonation des eaux d'alevinage et des eaux d'élevage, la demande chimique en oxygène diminue en fonction du temps. Cette diminution peut être expliquée l'oxydation partielle des molécules organiques au cours de l'ozonation. Dans le cas d'ozonation des eaux d'alevinage, la DCO passe de 83,5 mg-C/L à environ 21 mg-C/L, et diminue donc d'environ 70 %. Au cours d'ozonation des eaux d'élevage, la DCO diminue d'environ 40 % en passant de 190 mg-C/L sans ozonation à près de 114 mg-C/L après deux heures d'ozonation.

La diminution des teneurs du DCO lors d'ozonation des eaux piscicoles confirme l'hypothèse de l'oxydation partielle des molécules organiques lors de l'ozonation.

3.4.3 Suivi de la demande biologique en oxygène DBO₅

Le suivi de la demande biologique en oxygène au cours d'ozonation des eaux piscicoles permet d'obtenir les résultats illustrés dans la figure 3.11.

La figure 3.11 montre que la demande biologique en oxygène diminue toujours au cours de l'ozonation des eaux piscicoles.

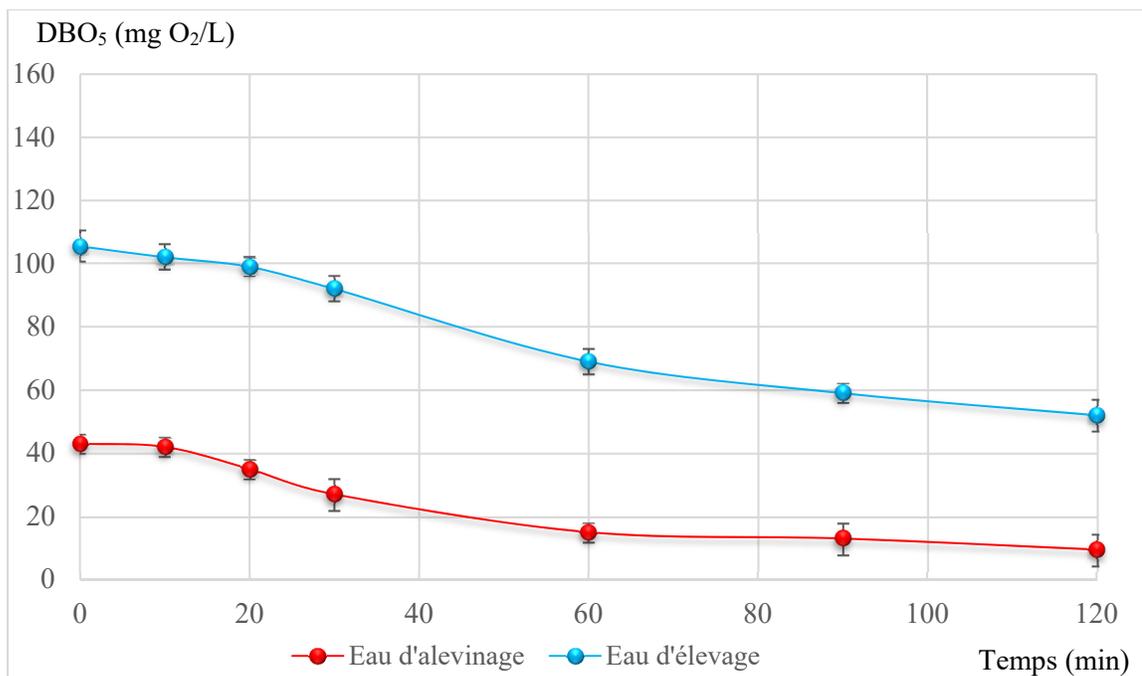


Figure 3.11 : Évolution de la DBO₅ au cours d'ozonation des eaux piscicoles

La variation de la DBO₅ lors d'ozonation des deux types d'eau peut être caractérisée par 2 phases :

- $0 < t < 60$ minutes : la DBO₅ initialement à 43 mg O₂/L dans le cas d'eau d'alevinage et à 105 dans le cas d'eau d'élevage diminue graduellement pour atteindre respectivement 15 mg O₂/L et 69 mg O₂/L, ce qui représente un abattement de 60 % dans le cas d'ozonation des eaux d'alevinage et un abattement de 40 % dans le cas d'ozonation des eaux d'élevage.
- $60 < t < 120$ minutes : la DBO₅ varie peu au-delà d'une heure de traitement dont elle passe de 15 à 9 mg O₂/L dans le cas d'ozonation des eaux d'alevinage, et de 69 à 52 mg O₂/L dans le cas d'ozonation des eaux d'élevage.

La diminution de la demande biologique en oxygène DBO₅ est corrélée par une diminution de la demande chimique en oxygène tant dans le cas d'ozonation des eaux d'alevinage que dans le cas d'ozonation des eaux d'élevage. Cette diminution peut être expliquée comme présenté

précédemment par l'oxydation partielle des molécules organiques lors de processus d'ozonation.

3.4.4 Effet de l'ozonation sur le carbone total CT, le carbone inorganique total COT et le carbone inorganique total CIT

Le suivi de la matière organique est réalisé en suivant l'évolution de la DCO, la DBO5, le CT et ses composantes durant l'ozonation. Les figures 3.12 et 3.13 illustrent les variations du carbone total et ses composantes pendant 2 heures d'ozonation des eaux piscicoles. Le carbone organique total ne varie pratiquement pas durant l'ozonation des eaux piscicoles. Par contre le carbone inorganique total diminue dont il passe de 33 à 28 mg-C/L dans le cas d'ozonation des eaux d'alevinage, et de 148 à 112 mg-C/L lors d'ozonation des eaux d'élevage. Comme le carbone total est la somme du carbone organique total et du carbone inorganique total, et puisque le carbone organique total reste presque constant lors de l'ozonation des eaux piscicoles, la cinétique du carbone total est donc identique de celle du carbone inorganique total.

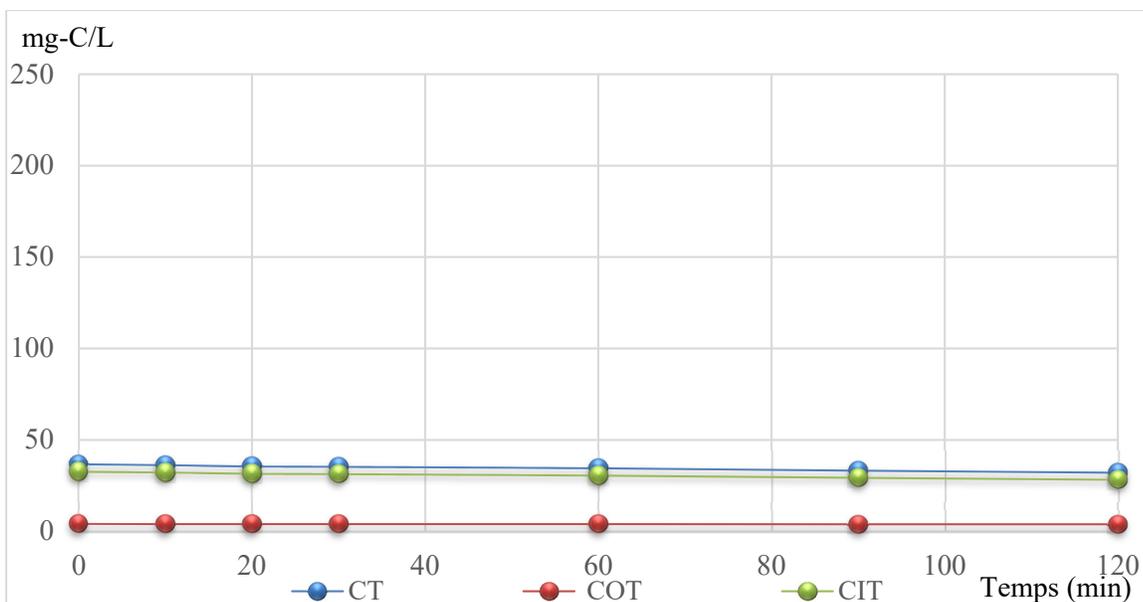


Figure 3.12 : Évolution du CT, COT et CIT au cours de l'ozonation des eaux d'alevinage

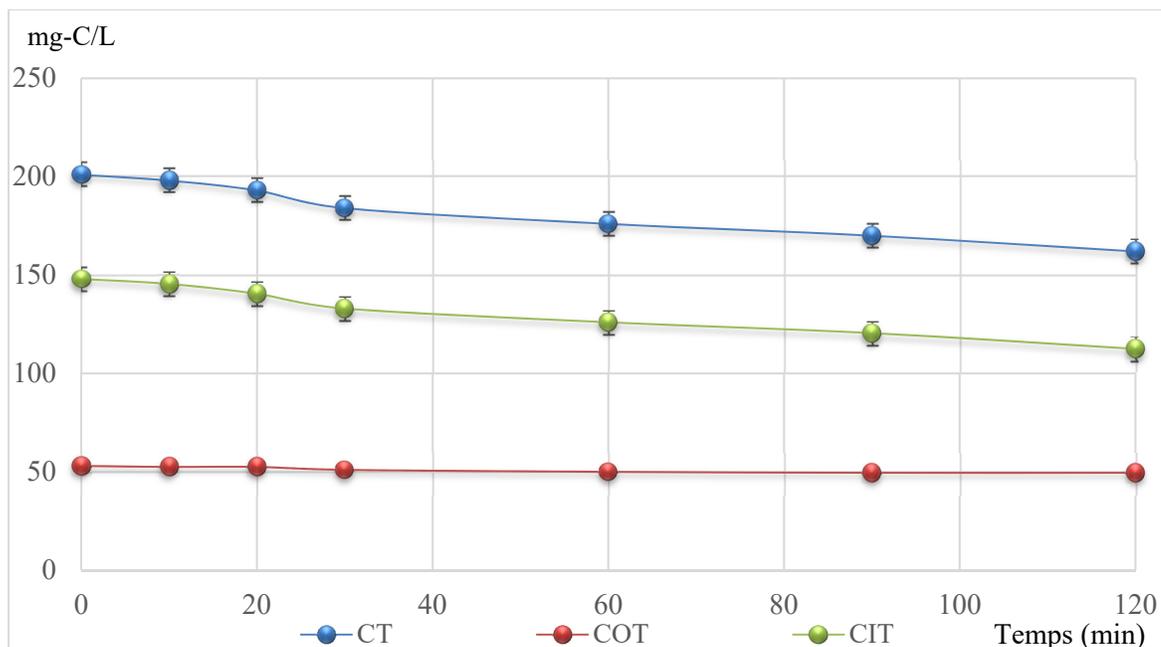


Figure 3.13 : Évolution du CT, COT et CIT au cours de l'ozonation des eaux d'élevage

Au cours de l'ozonation des eaux piscicoles, le carbone organique total (COT) ne varie pratiquement pas, ce qui est relativement logique en tenant compte des valeurs de pH trouvées au cours de l'ozonation. En fait, en se basant sur la structure de l'ozone, ce dernier peut réagir avec les composés organiques selon deux mécanismes : la réaction moléculaire directe de l'ozone et ou la réaction radicalaire indirecte. Le mécanisme d'oxydation à l'ozone dépend généralement de deux paramètres qui sont le pH et la nature des composés trouvés dans les eaux ozonées (Stachelin & Hoigné., 1985).

Les valeurs de pH trouvées durant l'ozonation, tant dans l'eau d'alevinage que dans l'eau d'élevage, confirment l'hypothèse qu'il n'y a pas d'oxydation radicalaire au cours d'ozonation des deux types d'eau, d'où le carbone organique total reste presque constant. Cependant, les composés organiques des eaux piscicoles peuvent être oxydés en molécules de plus petites tailles (aldéhydes, alcools ou acides) par le mécanisme moléculaire directe de l'ozone.

Au contraire du carbone organique total qui reste presque constant, le suivi du carbone total (CT) semble montrer une diminution durant l'ozonation. Cette diminution est corrélée par une diminution du carbone inorganique total (CIT) tant au cours d'ozonation des eaux d'alevinage que lors d'ozonation des eaux d'élevage, ce qui renforce l'hypothèse de dégazage de dioxyde

de carbone CO_2 , déjà discutée précédemment en étudiant l'évolution du pH durant l'ozonation. En effet, l'augmentation de pH et la diminution du carbone inorganique total CIT confirment l'hypothèse de dégazage de CO_2 par barbotage durant l'ozonation.

3.4.5 Effet de l'ozonation sur l'alcalinité

L'étude de l'effet de l'ozonation sur l'alcalinité des eaux piscicoles permet d'obtenir les résultats présentés dans la figure 3.14.

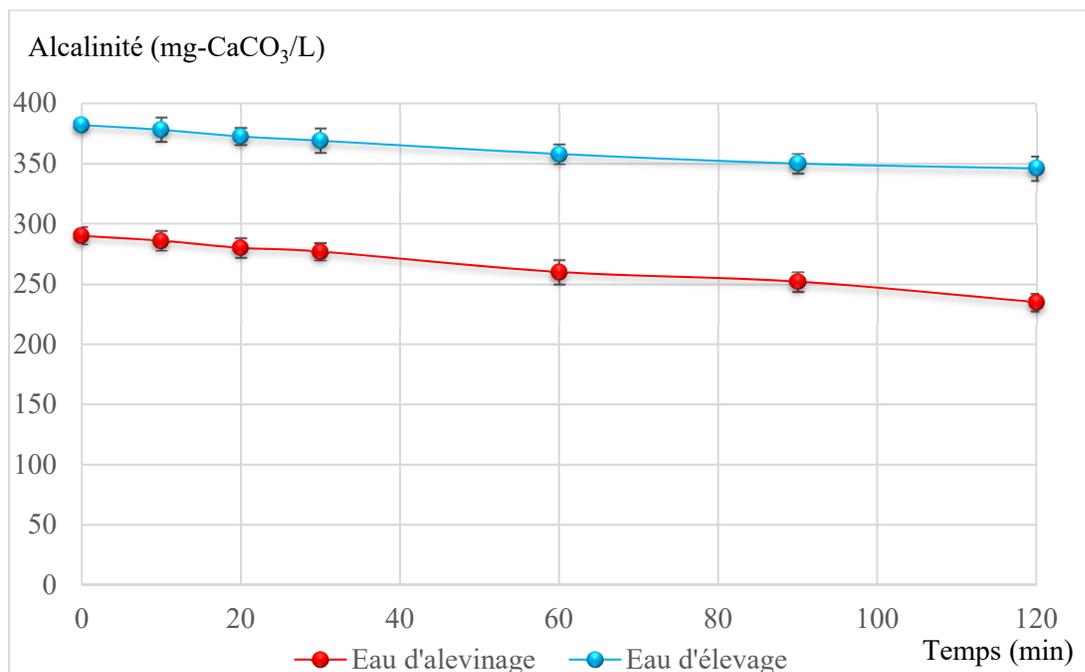


Figure 3.14 : Évolution de l'alcalinité au cours de l'ozonation des eaux piscicoles

Les résultats présentés au niveau de la figure 3.14 montrent que l'alcalinité diminue en fonction du temps lors d'ozonation des eaux piscicoles. Dans le cas d'ozonation des eaux d'alevinage, l'alcalinité diminue et passe de 290 à 235 mg CaCO_3/L . Lors d'ozonation des eaux d'élevage, l'alcalinité diminue aussi, elle passe de 382 sans ozonation à 346 mg CaCO_3/L après 2 heures d'ozonation.

Lors d'ozonation des eaux piscicoles, l'alcalinité diminue graduellement en fonction du temps. Comme, l'alcalinité est la mesure de la capacité de l'eau à neutraliser un acide. Les bicarbonates (HCO_3^-), les carbonates (CO_3^{2-}), le dioxyde de carbone (CO_2) et les hydroxydes (OH^-) sont les principaux éléments responsables de l'alcalinité de l'eau. Donc comme présenté précédemment, l'hypothèse du dégazage du CO_2 et par conséquent le déplacement de l'équilibre carbonique peut expliquer la diminution de l'alcalinité. Cependant, cette diminution pourrait également expliquer par la formation d'acides organiques dans les eaux piscicoles ozonées.

3.4.6 Suivi des nitrates

Afin d'évaluer le comportement des nitrates lors d'ozonation des eaux piscicoles, ce paramètre a été mesuré toutes les 10 minutes au cours des premières 30 minutes et toutes les 30 minutes le reste de l'essai d'ozonation. La figure 3.15 récapitule les résultats obtenus.

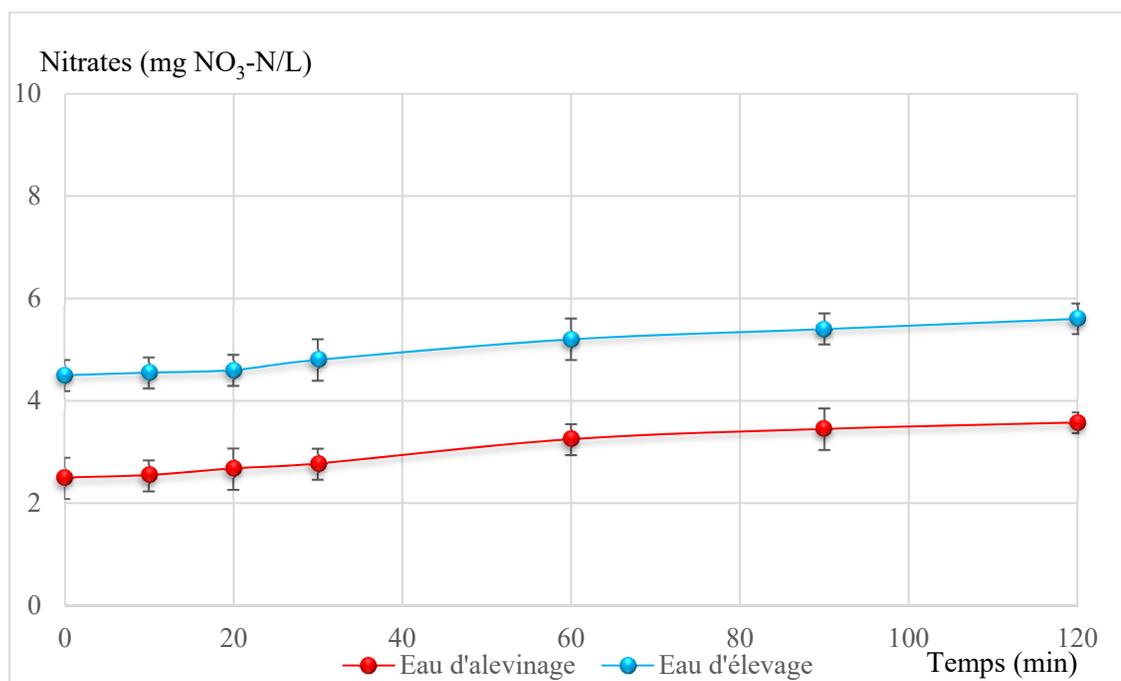


Figure 3.15 : Évolution des nitrates au cours de l'ozonation des eaux piscicoles

L'analyse des courbes montre que les nitrates augmentent légèrement durant l'ozonation, tant dans l'eau d'alevinage que dans l'eau d'élevage. Au cours d'ozonation des eaux d'alevinage, les nitrates augmentent légèrement en passant d'environ 2,5 à peu près de 3.5 mg NO₃- N/L après 2 heures d'ozonation. Dans le cas d'ozonation des eaux d'élevage, les nitrates augmentent aussi légèrement, ils évoluent de 4,5 à 5,6 mg NO₃- N/L.

Les nitrates sont les produits finaux du processus de nitrification et peuvent s'accumuler de manière continue dans le système d'élevage à recirculation d'eau. Deux phénomènes peuvent expliquer l'augmentation des nitrates lors de l'ozonation des eaux piscicoles. Tout d'abord, la légère augmentation des nitrates peut être engendrée par l'augmentation de la turbidité puisque la méthode de dosage des nitrates est spectrophotométrique. D'autre côté, des réactions impliquant l'oxydation des nitrites en nitrates due à la présence d'ozone résiduel ont été rapportées dans plusieurs recherches (Rosenthal & Kruner, 1985 ; Bablon et al., 1991).

CHAPITRE 4

DISCUSSION

Ce chapitre aborde la discussion de la qualité et la validité des résultats déjà présentés précédemment, et ce dans une perspective d'exploitation ultérieure.

4.1 Montage d'ozonation et dosage d'ozone

Les essais d'ozonation ont été effectués au niveau du laboratoire. Un montage d'ozonation a été mis en place (voir partie méthodologie) afin d'ozoner les eaux piscicoles mises en recirculation sans contenir des alevins ou des poissons puisque le fait de travailler avec des alevins ou des poissons nécessite un certificat d'autorisation.

Des expériences préliminaires sur l'ozone ont été menées au laboratoire afin d'étudier la cinétique d'ozone dans les eaux piscicoles au cours du temps. Plusieurs doses d'ozone différentes, allant de 0,5 à 7 mg O₃ /L, ont été injectées. Afin de bien suivre les paramètres d'ozone et l'effet d'ozonation sur les paramètres physico-chimiques des eaux piscicoles, une dose d'ozone d'environ 1,3 mg O₃ /L pendant 2 heures a été retenue au cours de l'ozonation des eaux d'alevinage et d'élevage.

Au niveau de la littérature, les expériences d'ozonation sont généralement effectuées au niveau des systèmes d'aquaculture en recirculation réelles contenant des alevins ou des poissons. Afin de répondre à la demande en ozone dans une pisciculture à système donné de recirculation d'eau, il est suggéré de doser l'ozone en fonction de la quantité d'aliments donnée aux alevins ou aux poissons (Bullock et al., 1997 ; Good et al., 2011). Des expériences d'ozonation à grande échelle montrent qu'une gamme de doses d'ozone allant de 15 à environ 25 g d'O₃ / kg d'aliment (Summerfelt & Hochheimer, 1997 ; Davidson et al., 2011) permet généralement d'améliorer la qualité de l'eau. Mais par contre au niveau de la littérature la durée d'ozonation et la manière d'application d'ozone (en continue ou en série de traitement) ne sont pas pris en considération en donnant des doses d'ozone.

En effet, le dosage de l'ozone requis au niveau d'une pisciculture à système de recirculation d'eau peut être influencé par plusieurs facteurs tels que la qualité de l'eau, le taux de recyclage d'eau, la manière d'application d'ozone, etc. Par conséquent, l'étude de la littérature ne fournit pas des doses d'ozone exactes applicables dans cette étude. Pour cela plusieurs doses d'ozone différentes, allant de 0,5 à 7 mg O₃ /L, ont été injectées dans les eaux piscicoles afin de fixer une dose d'ozone (dans cette étude une dose de $1,3 \pm 0.08$ mg/L est fixée, et est utilisée au cours de l'ozonation des eaux d'alevinage et des eaux d'élevage) permettant de suivre l'évolution dans le temps des paramètres d'ozone et des paramètres physicochimiques de l'eau. Afin de tirer le meilleur parti de l'ozonation dans le domaine de la pisciculture, l'utilisateur doit, donc, tout d'abord connaître les facteurs contrôlant le processus d'ozonation afin de déterminer les techniques et les dosages appropriés.

4.2 Ozonation et qualité de l'eau

- Ozonation

L'ajout d'ozone dans les eaux piscicoles a entraîné une amélioration générale de la qualité de l'eau. Par conséquent, en améliorant la qualité de l'eau piscicole, le taux de recyclage des eaux au niveau des piscicultures va augmenter. Il en résulte l'augmentation de la production piscicole avec un approvisionnement limité en ressources naturelles en conservant de l'eau. Donc, en augmentant le taux de recyclage de l'eau et en diminuant les besoins en eau neuve, l'ozonation peut être une solution prometteuse aux producteurs géographiquement désavantagés en raison d'une saison de croissance extrêmement sèche.

De plus, il en résulte la protection de l'environnement en diminuant les volumes des effluents piscicoles rejetés dans les milieux naturels.

L'application d'ozone dans les eaux piscicoles doit être fait avec soin. Elle nécessite la génération d'ozone, le transfert d'ozone dans la solution, le temps de contact pour la réaction de l'ozone, la concentration d'ozone résiduel afin de s'assurer que l'ozone ne devient pas létal pour les poissons, et éventuellement la destruction de l'ozone afin de s'assurer qu'aucun résidu d'ozone n'affecte la santé des gens utilisant l'ozone.

Un transfert efficace d'ozone dans l'eau est important car le coût de production de l'ozone n'est pas négligeable, en particulier si l'ozone est produit à partir de l'oxygène pur mis en bouteilles.

- Ozonation et qualité physico-chimique de l'eau

Les échantillons d'eau d'alevinage et d'élevage ozonés au cours de cette étude ont été prélevés 3 à 4 heures après que le pisciculteur leurs a donnés d'aliments. En effet selon la littérature, trois à quatre heures après avoir nourri les poissons, les concentrations d'ammoniac, de matières organiques dissoutes et d'autres déchets sont maximales (Gonçalves A. A & Gagnon G. A., 2011). Par conséquent, les résultats obtenus caractérisent la qualité de l'eau d'alevinage et d'élevage 3 à 4 heures après le nourrissage. Il est évident qu'avec le changement du temps de prélèvement de l'eau piscicole par rapport au temps du nourrissage, la qualité de l'eau change. Par conséquent le dosage d'ozone appliqué change.

L'ozonation des eaux piscicoles avec une dose d'ozone de l'ordre de 1,3 mg/L pendant 2 heures permet de constater généralement que :

- 1) Le pH augmente au cours de l'ozonation mais les valeurs de pH trouvées se situent dans l'intervalle de tolérance des poissons qui s'étend de 6,5 et 8,5 (SIGMA, 1983a). De plus, selon (SIGMA, 1983a), les poissons sont plus sensibles à une baisse brutale du pH qu'à une hausse. Par conséquent cette légère augmentation de pH tant dans l'eau d'alevinage que dans l'eau d'élevage ne présente pas un danger ni pour les alevins, ni pour les poissons;
- 2) Les valeurs de l'alcalinité diminuent. Cette diminution d'alcalinité désigne une diminution de la capacité de l'eau à contrer des variations de pH. Or, la stabilité du pH est très importante en pisciculture. Les conditions biologiques des poissons d'élevage sont beaucoup meilleures dans des eaux à pH sensiblement constant que dans des eaux dont les variations de pH sont importantes (Huet, 1970) ;

- 3) Dans le cas d'ozonation des eaux d'alevinage, les valeurs du POR trouvées à la fin de l'expérience sont proches de celles retrouvées dans la littérature (Spiliotopoulou et al., 2017), (environ 600 mV). Par contre, le POR, lors de l'ozonation des eaux d'élevage, augmente graduellement et se stabilise à près de 900 mV. Cette valeur pourrait nuire au bien être des poissons ;

- 4) Le suivi de la matière organique est réalisé en suivant l'évolution du carbone organique total (COT), la demande chimique en oxygène (DCO) et la demande biologique en oxygène DBO₅ durant l'ozonation. Ces trois paramètres sont en liaison. Les résultats trouvés de ces trois paramètres montrent que le carbone organique total (COT) ne varie pratiquement pas durant l'ozonation. Par contre, la demande chimique en oxygène (DCO) diminue d'environ 50 % dans les eaux d'alevinage et d'élevage. Cette diminution est corrélée par une diminution de la demande biologique en oxygène DBO₅ tant dans le cas d'ozonation des eaux d'alevinage que dans le cas d'ozonation des eaux d'élevage. La diminution des teneurs du DCO et de DBO₅ lors d'ozonation des eaux piscicoles confirme l'hypothèse de l'oxydation partielle des molécules organiques lors de l'ozonation. Ces résultats rejoignent ceux de (Summerfelt et al., 1997 ; Good et al., 2011) qui ont trouvé que l'ozone est un agent oxydant des matières organiques.

4.3 Perspectives

Les résultats de cette recherche fournissent des données sur les critères pour le design de systèmes d'ozonation, le dosage d'ozone en fonction de la qualité des eaux d'alevinage et d'élevage, l'influence de l'ozone sur la qualité de l'eau piscicole mise en recirculation et les conditions fiables et sécuritaires d'utilisation des systèmes d'ozonation pour les usagers. Ces données présentent des bases afin de rendre opérationnelle l'intégration des systèmes d'ozonation dans les entreprises piscicoles.

Comme mentionné précédemment, les essais d'ozonation sont effectués au niveau du laboratoire en adoptant un montage d'ozonation représentatif du système de recirculation d'eau au niveau des piscicultures mais sans contenir des alevins ou des poissons. Donc, l'effet direct de l'ozone sur la santé des alevins ou des poissons ne peut pas être évalué directement au cours de cette étude. L'application de l'ozone dans des eaux contenant des alevins ou des poissons permettra donc d'évaluer l'effet de l'ozone sur les poissons.

La durée d'ozonation comme présentée précédemment est de 2 heures, et donc les résultats obtenus ne concernent que 2 heures d'ozonation. Il est donc clair qu'après 2 heures d'ozonation de nouvelles informations vont être obtenus, et elles vont aider de mieux comprendre l'influence de l'ozone sur les différents paramètres de l'eau.

Les variations de pH de l'eau peuvent avoir des effets toxiques qui se manifestent à deux niveaux chez les poissons, soit par un effet direct sur le pH du sang du poisson et, soit en favorisant l'augmentation de la toxicité de certains composants présents dans les eaux d'élevage (Morin, 2012), il sera donc important de suivre ce paramètre lors des essais sur le terrain.

Les valeurs du potentiel d'oxydoréduction, lors de l'ozonation des eaux d'élevage, augmentent graduellement et se stabilise à près de 900 mV. Cette valeur pourrait nuire au bien être des poissons. Une recherche sur les couples d'oxydoréduction permettrait d'identifier les composés responsables de cette valeur.

CONCLUSION

L'aquaculture en général et surtout la pisciculture demeurent, pour des centaines de millions de personnes à travers le monde, des ressources de premières importances, qu'il s'agisse de la nutrition, de l'alimentation, des revenus ou des moyens d'existence.

De nombreuses contraintes environnementales, tel que le déficit hydrique, limitent l'expansion de cette industrie. Les pays producteurs des poissons recourent, donc, de plus en plus à mettre en œuvre la pisciculture à système de recirculation d'eau. Le maintien des poissons, tels que les salmonidés, en bonne santé dans ce système d'élevage nécessite l'entretien des eaux d'élevage en bonne qualité. Or, même avec le recours à des différents moyens de traitement, la qualité d'eau au niveau de ces systèmes peut ne pas être favorable à l'élevage des poissons. Le recours à des méthodes alternatives, afin de maintenir l'eau d'élevage des poissons en bonne qualité tout en protégeant l'environnement aquatique et les ressources en eau, s'avère donc nécessaire. Dans ce contexte, cette étude vise essentiellement à évaluer l'efficacité de l'ozonation sur la qualité physicochimique de l'eau piscicole à système de recirculation d'eau.

Au niveau de cette étude, des prises d'eau de la pisciculture Gilbert à différents points (les puits artésiens, les sources d'eau de surface, les bassins d'alevinage, les bassins d'élevage, la sortie des bassins d'élevage) ont été effectuées pendant les différentes saisons afin de caractériser les eaux piscicoles. Les principales conclusions tirées des résultats expérimentaux sont :

- Les eaux des puits artésiens, les eaux de surface, les eaux d'alevinage ainsi que les eaux d'élevage ne contiennent pas des ions bromures. Donc, l'application de l'ozone dans les eaux piscicoles ne présente pas de danger pour les poissons ;
- Les eaux d'alevinage sont généralement très peu chargées et elles gardent des caractéristiques physiques et chimiques proches de celles des eaux de source ;
- Les eaux d'élevage sont plus chargées principalement en DCO, en CT, en COT, en solides dissous et en suspension ainsi qu'en nitrates que les eaux d'alevinage.

Les essais d'ozonation menés au cours de cette étude ont montré que l'utilisation de l'ozone tant dans les eaux d'alevinage que dans les eaux d'élevage améliorerait considérablement diverses conditions de qualité de l'eau piscicole. Les résultats trouvés montrent que l'ajout de l'ozone dans d'eau d'alevinage ainsi que dans l'eau d'élevage à un taux de $1,3 \pm 0,3$ mg O₃ /min/L, pendant 2 heures, permet de conclure que :

- Dans ces conditions, le temps de réaction sécuritaire pour les poissons est d'environ 110 minutes alors que pour les alevins le temps de réaction sécuritaire est d'environ 25 minutes ;
- L'ozone a efficacement réduit la demande chimique en oxygène DCO, la demande biologique en oxygène DBO₅, le carbone total CT, le carbone inorganique total CIT, l'alcalinité et les solides dissous ;
- L'ajout de l'ozone a entraîné l'augmentation de pH, du potentiel d'oxydoréduction POR et des nitrates mais sans dépasser les limites tolérées par les alevins et les poissons ;
- L'application de l'ozone a engendré une légère augmentation de la turbidité d'eau. Ce résultat ne peut pas être généralisé. En fait, au niveau des piscicultures à systèmes de recirculation d'eau, il existe les biofiltres dont le rôle est de diminuer la turbidité. Cela justifie la nécessité de suivre ce paramètre sur le terrain pour mieux comprendre l'effet de l'ozonation sur la turbidité d'eau piscicole dans un système à recirculation d'eau.

RECOMMANDATIONS

L'utilisation de l'ozone pour l'amélioration de la qualité des eaux piscicoles dans les piscicultures à système de recirculation d'eau a fait preuve de son intérêt. Afin de mieux comprendre l'effet de l'ozone sur les paramètres physiques et chimiques des eaux piscicoles en système de recirculation d'eau, les prochaines recherches porteront sur l'étude de différents scénarios d'ozonation des eaux piscicoles sur terrain. Pour chaque scénario d'ozonation, un bassin sert de témoin et un autre bassin permet d'évaluer le scénario de traitement.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ackefors, H. & Enell, M. (1990). Discharge of nutrients from Swedish fish farming to adjacent sea areas. *Ambio*, 19: 28-35.
- Action Contre la Faim (ACF) & Association de spécialistes œuvrant pour le développement et l'application des connaissances sur les poissons et les relations Homme-Nature (AIMARA). (2008). *La pisciculture de subsistance en étangs en Afrique : Manuel technique*. France, p.15.
- American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) & Water Environment Federation (WEF). (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21e edition. American Public Health Association.
- American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) & Water Environment Federation (WEF). (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 22e edition. American Public Health Association
- Bablon, G., Bellamy, W.G., Bourbigot, M.M., Daniel, F.B., Dore, M., Erb, F., Gordon, G., Langlais, B., Laplanche, A., Legube, B., Martin, G., Masschelein, W.J., Pacey, G., Reckhow, D.A. & Ventresque, C. (1991). Fundamental aspects. In: Langlais, B., Reckhow, D.A., Brink, D.R. (Eds.), *Ozone in Water Treatment Applications and Engineering*. American Water Works Association Research Foundation, Denver, CO, pp. 11–132.
- Bader, H. & Hoigné, J. (1981). Detremination of ozone in water by the indigo Method. *Water res*, 15, pp. 449-456.
- Bai, C. (2007). President's Column, *World Aquacult. Mag.*, 38(4):3.
- Bellamy, W.D., Damez, F., Langlais, B., Montiel, A., Rakness, K.L., Reckhow, D.A. & Robson, C.M. (1991). Engineering aspects. In: Langlais, B., Reckhow, D.A., Brink, D.R. (Eds.), *Ozone in Water Treatment: Application and Engineering*. American Water Works Association Research Foundation, Denver, CO, pp. 317-468.
- Bergheim, A., Sanni, S., Indrevik, G. & Hølland, P. (1993b). Sludge removal from salmonid tank effluent using rotating microsieves. *Aquacultural Engineering*, 12: 97-109.
- Bergheim, A. & Brinker, A. (2001). Effluent treatment for flow through systems and European environmental regulations. *Proceedings from the Aquacultural Engineering Society's Second Issues Forum*, Shepherdstown, West Virginia, p.9-31.

- Bergheim, A. & Brinker, A. (2003). Effluent treatment for flow through systems and European environmental regulations. *Aquacultural Engineering*, 27: 61-77.
- Bingham, E., Cohrssen, B. & Powell, C.H. (2001). *Patty's toxicology*. A Wiley-Interscience publication. New York (Toronto): John Wiley.
- Blancheton, J.P. (2000). Developments in recirculation systems for Mediterranean fish species. *Aquacultural Engineering*, 22: 17-31.
- Blancheton, J.P., Piedrahita, R.H., Eding, E.H., Roque d'orbcastel, E., Lemarié, G., Bergheim, A. & Fivelstad, S. (2007). Intensification of landbased aquaculture production in single pass and reuse systems. Chapter 2. In *Aquaculture engineering and environment*.
- Boeniger, M.F. (1995). Use of ozone generating devices to improve indoor air quality. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 56: 590 – 598.
- Boujard, T. (2002). Nutrition and environment interactions in fish farming. EAS meeting 2002.
- Breton, B. (2005). La truite et son élevage. Collection aquaculture pisciculture. Eds TEC et DOC. Lavoisier.
- Bullock, G.L., Summerfelt, S.T., Noble, A.C., Weber, A.L., Durant, M. D. & Hankins, J.A. (1997). Ozonation of a Recirculating Rainbow Trout Culture System. I. Effects on Bacterial Gill Disease and Heterotrophic Bacteria”, *Aquaculture*, 158:43–55.
- Centre d'expertise en analyse environnementale au Québec CEAEQ. (2014). Détermination des anions : méthode par chromatographie ionique, MA. 300 – Ions 1.3, Rév. 3, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, p.18.
- Chen, S., Stetchey, D. & Malone, R.F. (1994). Suspended solids control in recirculating aquaculture systems. In: Timmons, M.B., Losordo, T.M. (Eds.), *Aquaculture Water Reuse Systems: Engineering Design and Management*. Elsevier, Amsterdam, 61-100.
- Cripps, S.J. & Bergheim, A. (2000). Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems. *Aquacultural Engineering*, 22: 33-56.
- Davidson, J., Good, C., Welsh, C., Summerfelt, S., 2011. The effects of ozone and water exchange rates on water quality and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* performance in replicated water recirculating systems. *Aquacult. Eng.* <http://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2011.04.001>.
- Ebeling, J.M. & Timmons, T. B. (2009). Using Carbon/Nitrogen Ratios to Manage Biofilter Start-up Problems, In: *World Aquaculture 2009*, Vera Cruz, Mexico, p. 257.

- Gerber, P.J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A. & Tempio, G. (2014). Lutter contre le changement climatique grâce à l'élevage – Une évaluation des émissions et des opportunités d'atténuation au niveau mondial.
- GIEC. (2014). Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. GIEC, Genève, Suisse, 161 p.
- Goldburg, R.J., Elliott, M.S. & Naylor, M.A. (2001). Marine Aquaculture in the United States: Environmental Impacts and Policy Options. Pew Oceans Commission, Arlington, VA, p.44.
- Gonçalves, A.A., & Gagnon, A. (2011). Ozone Application in Recirculating Aquaculture System: An Overview, *Ozone: Science and Engineering*, 33:5, 345-367, DOI: 10.1080/01919512.2011.604595.
- Good, C., Davidson, J., Welsh, C., Snekvik, K. & Summerfelt, S. (2011). The effects of ozonation on performance, health and welfare of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* in low-exchange water recirculation aquaculture systems. *Aquacult. Eng.* <http://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2011.04.003>.
- Guillaume, J., Kaushik, S., Bergot, P. & Métailler, R. (1999). Bases de la nutrition des animaux aquatiques : physiologie digestive et digestibilité des nutriments. *Nutrition et alimentation des poissons et crustacés*. Éditions INRA-IFREMER, pp. 71-74.
- Hishamunda, N., Cai, J. & Leung, P. (2011). Aquaculture commerciale et croissance économique, réduction de la pauvreté et sécurité alimentaire : cadre d'évaluation. FAO Document technique sur les pêches et l'aquaculture. No. 512. Rome, FAO. p.65.
- Hoigne, J. & Bader. H. (1976). The role of hydroxyl radical reactions in ozonation processes in aqueous solutions. *Water Research* 10: 377-386.
- Hoigne, J. & Bader. H. (1978). Ozone initiated oxidations of solutes in wastewater: a reaction kinetic approach. *Progress in Water Technology* 10(5/6): 657-671.
- Hoigne, J. & Bader. H. (1985). Rate constants of reactions of ozone with organic and inorganic compounds in water-III Inorganic compounds and radicals. *Water Research* 19(8) : 993-1004.
- Huet, M. (1970). *Traité de pisciculture*, Éditions Ch de Wyngaert, Avenue Georges Henri, 296, 1 200 Bruxelles, pp. 519-521.

- Institut national de l'environnement industriel et des risques INERIS. (2011). *Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques. Ozone*. Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques.
- Jimenez del Rio, M., Ramazanov, Z. & Garcia-Reina, G. (1996). *Ulva rigida* (Ulvales, Chlorophyta) tank culture as biofilters for dissolved inorganic nitrogen from fishpond effluents. *Hydrobiologia*, 326: 61-66.
- Kim, I.B. (2000). *Recirculating Aquaculture: The Next Generation*, Advocate, pp. 54–58.
- King, R.K. (2001). *The Presence of Bacterial Pathogens in Biofilms of Recirculating Aquaculture Systems and Their Response to Various Sanitizers*, PhD Thesis, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.
- Krumins, V., Ebeling, J. & Wheaton, F. (2001a). Part-day ozonation for nitrogen and organic carbon control in recirculating aquaculture systems. *Aquacult. Eng.* 24, pp. 231–241.
- Langlais, B., Reckhow, D. A., & Brink, D. R. (1991). *Ozone in water treatment-application and engineering*. American Water Works Association Research Foundation, Denver.
- Lauwerys, R. R. (1999). *Toxicologie industrielle et intoxications professionnelles*. 4ème éd. Paris : Masson.
- Lavenant, M., De la Pomélie, C. & Paquette, P. (1995). Aquaculture en système clos: estimation des coûts de production pour l'élevage du bar et du turbot. *Cah. Options Méditerranéennes* 14, pp. 149-168.
- Léonard, N., Blancheton, J.P. & Guiraud, J.P. (2000). Populations of heterotrophic bacteria in an experimental recirculating aquaculture system. *Aquacultural Engineering*, 22: 109-120.
- Liao, P. & Mayo, R. (1974). Intensified fish culture combining water reconditioning with pollution abatement. *Aquaculture*, 3: 61-85.
- MacMillan, J.R., Huddleston, T., Woolley, M. & Fothergill, K. (2003). Best management practice development to minimize environmental impact from large flow-through trout farms. *Aquaculture*, 226: 91-99.
- Mordecai B. Rubin. (2001). The history of ozone. *Bull. Hist. Chem.*, vol. 26, n° 1, Department of Chemistry, Technion-Israel Institute of Technology, pp. 1839-1868.
- Morin, R. (2007). Production piscicole au Québec. Document d'information DADD-02. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. p. 8.

- Morin, R. (2007). Production piscicole au Québec. STPED-02. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. pp. 2-3.
- 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. p. 25.
- Organisation des nations unis pour l'alimentation et l'agriculture ONUAA. (1997). Review of the state of world aquaculture. FAO Fisheries Circular. N°886, Rev. 1. Rome, Italy. FAO Inland water resources and aquaculture service, Fishery Resources Division.
- Organisation des nations unis pour l'alimentation et l'agriculture ONUAA. (2016). La situation mondiale des pêches et de l'aquaculture 2016. Contribuer à la sécurité alimentaire et à la nutrition de tous. Rome. 224 pages.
- Pagand, P. (1999). Traitement des effluents piscicoles marins par lagunage à haut rendement algal. Thèse de doctorat de l'université de Montpellier 1, Montpellier, France, p. 220.
- Pêches et Océans Canada. (2012). L'aquaculture au Canada 2012 : Un rapport sur la durabilité de l'aquaculture. pp. 7-8.
- Peleg, M. (1976). The chemistry of ozone in the treatment of water. *Water Research* 10: 361-365.
- Pfeiffer, T.J., Osborn, A. & Davis, M. (2008). Particle Sieve Analysis for Determining Solids Removal Efficiency of Water Treatment Components in a Recirculating Aquaculture System, *Aquacult. Eng.*, 39(1):24–29.
- Piedrahita, R.H., Fitzsimmons, K., Zachritz, W. H. II. & Brockway, C. (1996). Evaluation and improvements of solids removal systems for aquaculture. *Aquaculture Engineering Society. Proceedings II: Successes and failures in commercial recirculating aquaculture conf.*, Roanoke, VA (USA), 1: 141-150.
- Rakness, K.L. (2005). *Ozone in Drinking Water Treatment: Process Design, Operation and Optimization*, ISBN 1-58321-379-1 Catalog Number 20589, Published by American Water Works Association, Denver, CO, USA, p. 302.
- Read, P., (2008). *Ozone in Recirculating Aquaculture*, New South Wales Department of Primary Industries – Fishing and Aquaculture. New South Wales, Australia.
- Rosenthal, H. (1981). Ozonation and sterilization. Pages 219-274 in K. Tiews, editor. *Proceedings of the world symposium on aquaculture in heated effluents and recirculation systems*, volume I. Heenemann Verlagsgesellschaft, Berlin.

- Rosenthal, H., Krumer, G. (1985). Treatment efficiency of an improved ozonation unit applied to fish culture situations. *Ozone Sci. Eng.* 7 (3), pp.179–190.
- Rueter, J. & Johnson, R. (1995). The use of ozone to improve solids removal during disinfection. *Aquacult. Eng.* 14, pp.123-141.
- SIGMA Environmental Consultants Ltd. (1983). Summary of water quality criteria for salmonids fishes, Department of Fisheries and Oceans, SECL 8067, p. 49-58.
- Stachelin, J. & Hoigné, J. (1985). Decomposition of Ozone in Water in the Presence of Organic Solutes Acting as Promoters and Inhibitors of Radical Chain Reactions. *Environmental Science and Technology* 19: 1206-1213.
- Summerfelt, S.T. & Hochheimer, J.N. (1997). Review of Ozone Processes and Applications as an Oxidizing Agent in Aquaculture, *Progress. Fish- Cultur.*, 59: 94–105.
- Spiliotopoulou, A., Martin, R., Pedersen, L.F. & Andersen, H.R. (2017). Use of fluorescence spectroscopy to control ozone dosage in recirculating aquaculture systems. *Water Res.* 111, pp. 357-365.
- Tango, M.S. & Gagnon, G.A. (2003). Impact of Ozonation on Water Quality in Marine Recirculation Systems, *Aquacult. Eng.*, 29: 125–137.
- Troell, M., Halling, C., Neori, A., Chopin, T., Buschmann, A.H., Kautsky, N. & Yarish, C. (2003). Integrated mariculture: asking the right questions. *Aquaculture*, 226: 69-90.
- Twarowska, J.G., Westerman, P.W. & Losordo, T.M. (1997). Water treatment and waste characterization evaluation of an intensive recirculating fish production System. *Aquacultural Engineering*, 16 (31): 133-147.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division UNDESA. (2017). *World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables*. Working Paper No. ESA/P/WP/248.
- Varadi, L. (2000). Responsible Management of inland waters for fisheries and aquaculture. In: Creswell, R.L., Flos, R. (Eds.), *Perspectives on Responsible Aquaculture for the New Millennium*, World Aquaculture Society, Baton Rouge, LA, USA/The European Aquaculture Society, Oostende, Belgium, pp. 125-141.
- Weschler, C.J. (2000). Ozone in indoor environments: concentration and chemistry. *Indoor Air* 10, pp. 269–288.
- Wong, K.B. & Piedrahita, R.H. (2003). Prototype Testing of the Apparatus for Settleable Solids In-raceway Separation (ASSIST). *Aquacultural Engineering*, 27 (4): 273-293.

