

**Titre:** Flux de phosphore et collecte des boues d'une pisciculture de moyenne taille  
Title: [Flux de phosphore et collecte des boues d'une pisciculture de moyenne taille](#)

**Auteur:** Carlos Gerardo Sanchez Barrios  
Author: [Carlos Gerardo Sanchez Barrios](#)

**Date:** 2008

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Sanchez Barrios, C. G. (2008). Flux de phosphore et collecte des boues d'une pisciculture de moyenne taille [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/8235/>  
Citation: [Sanchez Barrios, C. G. \(2008\). Flux de phosphore et collecte des boues d'une pisciculture de moyenne taille \[Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal\]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/8235/](#)

## Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/8235/>  
PolyPublie URL: [https://publications.polymtl.ca/8235/](#)

**Directeurs de recherche:** Yves Comeau, & Florent Chazarenc  
Advisors: [Yves Comeau](#), [Florent Chazarenc](#)

**Programme:** Non spécifié  
Program: [Non spécifié](#)

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

FLUX DE PHOSPHORE ET COLLECTE DES BOUES D'UNE PISCICULTURE  
DE MOYENNE TAILLE

CARLOS GERARDO SANCHEZ BARRIOS  
DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES  
(GÉNIE CIVIL)  
DÉCEMBRE 2008



Library and  
Archives Canada

Published Heritage  
Branch

395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

Bibliothèque et  
Archives Canada

Direction du  
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

*Your file Votre référence*

*ISBN: 978-0-494-48937-6*

*Our file Notre référence*

*ISBN: 978-0-494-48937-6*

#### NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

---

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

#### AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

---

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.



# Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

FLUX DE PHOSPHORE ET COLLECTE DES BOUES D'UNE PISCICULTURE  
DE MOYENNE TAILLE

présenté par : SANCHEZ BARRIOS Carlos Gerardo  
en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées  
a été accepté par le jury d'examen constitué de :

M. FUAMBA Musandji, Ph.D., président

M. COMEAU Yves, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. CHAZARENC Florent, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. GAGNON Daniel, B. Ing., membre

## DÉDICACE

Ce mémoire est une offrande à mon Dieu qui m'a soutenu avec sa puissance divine et qui m'a donné les dons spirituels du saint esprit pour écrire ce mémoire.

« Ne crains point, car je suis avec toi ; ne t'effraye point, car je suis ton Dieu ; je t'ai pris à moi ; je t'aide aussi, et je te soutiens par la droite de ma justice.». Ésaïe 41 : 10

À mon Seigneur Jésus qui m'a guidé toujours dans ma vie avec sa parole et son exemple divine, il permet que je sois là pour continuer son oeuvre.

« Jésus lui dit : Je suis la résurrection et la vie. Celui qui croit en moi vivra, même s'il est mort; et quiconque vit et croit en moi ne mourra jamais. Crois tu cela?

Elle lui dit : Oui Seigneur, je crois que tu est le Christ, le Fils de Dieu, qui devait venir dans le monde ». Jean 11 : 25 - 27

Je dédie ce mémoire à Milagros la femme que Dieu m'a donnée pour épouse et que grâce à elle j'ai eu la force de son amour pour continuer dans le bon chemin. Ma chérie aimée, je t'aime à la façon des Corinthiens 13 : 4 - 8a

« Celui qui trouve une femme trouve le bonheur; c'est une grâce qu'il obtient de l'Eternel ». Proverbes 18:22

Je dédie aussi ce travail à toute ma famille : en spécial mes parents Marta et Jorge et Maman Dominga qui se trouvent loin mais qui sont toujours avec moi par leurs prières et la force du Saint-Esprit; Dieu vous bénisse tous pour toujours.

## REMERCIEMENTS

Merci tout d'abord au professeur Yves Comeau pour son excellent encadrement scientifique et académique, et surtout pour m'avoir donné l'occasion de travailler dans sa prestigieuse équipe de recherche.

Un grand merci à Florent Chazarenc pour son encadrement, ses conseils, et ses nombreux encouragements. Également, à Jaume Puigagut pour la révision, la correction et la structuration de l'article scientifique soumis à la revue *Aquaculture*.

Je tiens à remercier tout spécialement Denis Bouchard, qui grâce à son expertise, rigueur, et patience, m'a aidé à la réalisation des analyses du laboratoire.

Un grand remerciement à Serge Gilbert, à Brigitte Martel et leur famille pour m'avoir permis de réaliser les expériences dans leur pisciculture et surtout pour leur aide et leur patience lors des échantillonnages et leurs apports d'information pour ce projet de recherche.

Un grand merci à Dominic Marcotte du MAPAQ et à Daniel Gagnon du MDDEP pour leur aide technique.

Merci aussi à la précieuse collaboration de Romain Broséus, qui a corrigé les erreurs grammaticales de ce mémoire, ainsi qu'à celle de Majdala Mansour-Geoffrion et de Natasha McQuaid qui ont corrigées grammaticalement l'article scientifique.

Je remercie également le CRSNG, la SORDAC, le RAQ, Multiserv – Harsco et Arcelor Mittal qui ont financés ce projet de recherche. Merci aussi à nos partenaires MAPAQ, MDDEP, IRBV de l'Université de Montréal, Biodôme de Montréal, Envirogain, la Pisciculture Gilbert Inc. et la Ferme Piscicole des Bobines Inc.

Merci à tous les étudiants, et personnel technique de notre équipe de recherche pour leur collaboration et encouragements pendant la maîtrise.

Enfin, merci à mon Dieux, à ma femme chérie Milagros, à Maman Dominga, Maman Julia, à Jesús, à mes parents, Marta et Jorge, ainsi qu'à mes frères et sœur Ernesto, Coco et Eli, de m'avoir soutenu de près ou "à distance" tout au long de ma maîtrise.

## RÉSUMÉ

La production de l'industrie aquacole québécoise en eau douce a été réduite en raison de contraintes environnementales imposées. D'ici 2014, cette industrie a pour objectif de réduire ses rejets en phosphore (P) à 4,2 kg de P rejeté /tonne de poisson produit dans le cadre d'une entente dénommée « stratégie de développement durable de l'aquaculture en eau douce au Québec (STRADDAQ) ». Au Québec, 91% des stations piscicoles inscrites à la STRADDAQ utilisent au moins un étang pour l'élevage, d'où l'importance d'une gestion intégrée de la pisciculture en étang. Or, peu de données sont disponibles sur la dynamique du P.

Le but de cette étude est d'établir un bilan annuel du P pour des étangs piscicoles et d'identifier les facteurs influençant les rejets en P de piscicultures en étangs basés sur la masse de P récupéré dans les boues issues des vidanges annuelles d'une pisciculture.

À cet effet, une pisciculture en étang québécoise a été étudiée pendant deux années de production. Les paramètres analysés ont été la masse de P dans la boue des étangs, la moulée distribuée et la production de poissons par rapport au temps de rétention hydraulique, à la charge superficielle et à la densité de poissons. En vue de la réalisation des essais, deux étangs similaires à fond bétonné (#1 et #2) et un étang en terre (#3) ont été sélectionnés. Pendant la première année, l'efficacité de rétention de P dans la boue et des estimés de bilan en P ont été déterminés dans les étangs #1 et #2. Au cours de la deuxième année, la boue des étangs a été caractérisée mensuellement (excepté pour la période d'hiver entre janvier et mars 2008) dans les étangs #2 et #3. La boue a été pompée depuis dix sections transversales définies dans les étangs. De plus, les bilans de P par le biais de vidanges annuelles des boues ont été calculés dans les étangs #1, #2 et #3.

La caractérisation mensuelle des boues des étangs étudiés a montré que entre 63 et 91% et entre 19 et 83% du P des boues s'accumulait sous l'aérateur de surface dans l'étang à fond bétonné 2 et l'étang en terre 3, respectivement. De plus, les résultats des vidanges annuelles des boues ont indiqué que l'étang en terre (récupération dans la boue correspondant à 31% du P non retenu par les poissons) semble être plus efficace dans la récupération de P par rapport aux étangs à fond bétonné (récupération de 8 à 17% du P non retenu par les poissons). Il est possible, cependant, que l'enlèvement des boues du fond du bassin en terre ait enlevé du P provenant d'années d'opération précédentes et que ce rendement d'enlèvement de P soit surestimé. Un temps de rétention hydraulique élevée (HRT : *hydraulic retention time*), une charge superficielle (SOR : *surface overflow rate*) et une densité de poisson ( $f_d$  : *fish density*) faibles ainsi que les mécanismes de sorption plus importants dans l'étang en terre auraient favorisé l'efficacité de récupération de P dans la boue.

Les bilans de P dans les étangs ont permis d'estimer que sur 100% du P ajouté par la moulée distribuée, entre 5 et 19 % (8 à 31% du P non retenu par les poissons) a été récupéré dans la boue des vidanges annuelles. Entre 40 et 57% a été rejeté de ces étangs, ce qui a représenté de 3,8 à 6,3 kg de P rejeté par tonne de poisson produit. Finalement, le HRT, le SOR, la densité de poissons et la sorption du P ont été les facteurs les plus importants pour améliorer l'efficacité de récupération du P d'étangs d'élevage.

Des études plus approfondies de ces paramètres doivent être réalisées alors que les étangs peu efficaces pour la récupération de P pourront augmenter leur fréquence d'enlèvement de boues (au moins 2 fois par année).

## ABSTRACT

The production of Quebec's freshwater fish farm industry was reduced due to imposed environmental constraints. By 2014, this industry aims to reduce phosphorus (P) discharge to 4.2 kg of P released / ton of fish produced within the framework of an agreement called « Quebec's freshwater aquaculture development strategy (STRADDAQ) ». In Quebec, 91 % of the fish farms use at least one pond for fish rearing and culture, which indicates the importance to establish an integrated management system for pond fish farms. However, not enough data is available on the dynamics of P.

The purpose of this study was to establish an annual P balance in fish farm ponds and to identify the main factors for P release in fish farms based on the P mass measured in annual aquaculture sludge removal.

For this purpose, one Quebec fish farm was studied during two years of production. The analysed parameters were: the mass of P in the pond sludge, in the distributed feed and in the fish produced in relation with the hydraulic retention time, the surface overflow load and the fish density. Two similar shotcrete ponds (#1 and #2) and an earthen pond (#3) were chosen. For the first year, the efficiency of P retained in sludge and annual P balance were determined in ponds #1 and #2. In the second year, the pond sludge was characterized monthly (except for the winter period between January and March 2008) in ponds #2 and #3. Sludge was pumped from ten cross-sections defined in ponds. Furthermore, P balance by means of annual sludge removal was determined in ponds #1, #2 and #3.

The monthly characterization of sludge in the studied ponds showed that between 63 and 91% and between 19 and 83% of P in sludge accumulated under the floating surface aerator in shotcrete pond 2 and earthen pond 3 respectively. Moreover, results of annual sludge removal indicated that the earthen pond, which recovered an

estimated 31% of P not taken up by fish, appeared to be more efficient in P retention in comparison with the shotcrete ponds which recovered between 8 to 17 % of P not taken up by fish. However, it is possible that removed sludge from the bottom of the earth pond would be taking phosphorus accumulated from previous years of operations and thus, the efficiency of P removal would have been overestimated. A higher hydraulic retention time (HRT), a lower surface overflow rate (SOR) and a lower fish density ( $f_d$ ), as well as stronger P sorption mechanisms in the earthen pond favoured a high efficiency in P removed in sludge.

Results of P balances in ponds showed that from the 100 % of P added by distributed feed, between 5 and 19 % (8 to 31 % of P not taken up by fish) was removed in the annual sludge removal. Between 40 and 57 % was released from these ponds, which represented from 3.8 to 6.3 kg of P released per ton of fish produced. Finally, the HRT, the SOR, the fish density ( $f_d$ ) and the P sorption were the most important factors to improve the efficiency of P removed from aquaculture ponds.

More in-depth studies of these parameters should be carried out and ponds with lower P retention efficiency could increase their sludge removal frequency to at least twice per year.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>DÉDICACE.....</b>	<b>IV</b>
<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b>V</b>
<b>RÉSUMÉ.....</b>	<b>VI</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>VIII</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES .....</b>	<b>X</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>XIII</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>XIV</b>
<b>LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS.....</b>	<b>XVI</b>
<b>LISTE DES ANNEXES .....</b>	<b>XX</b>
<b>CHAPITRE 1: INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
1.1    Problématique des activités piscicoles d'eau douce au Québec .....	1
1.2    Hypothèses.....	3
1.3    Objectifs.....	4
<b>CHAPITRE 2: REVUE DE LITTÉRATURE.....</b>	<b>5</b>
2.1    Réglementation relative à l'aquaculture en eau douce .....	5
2.2    Production piscicole au Québec.....	6
2.3    Types, nombre et taille des entreprises.....	8
2.4    Le phosphore dans le milieu aquatique et l'eutrophisation .....	9
2.5    L'excration du phosphore par les poissons.....	11
2.6    Mécanismes de rétention du phosphore et sorption des phosphates.....	14
2.6.1    Sorption du phosphore .....	14
2.6.2    Paramètres opérationnels.....	18
2.6.3    Vitesse d'entraînement de particules.....	19
2.7    Bilan de phosphore par enlèvement des boues d'étangs d'élevage.....	21

2.8	Gestion des rejets du phosphore dans la pisciculture .....	24
2.8.1	Réduction à la source et gestion de l'alimentation des poissons.....	24
2.8.2	Réduction par enlèvement et traitement des boues des étangs d'élevage .....	25
2.8.3	Réduction du P des effluents .....	28
<b>CHAPITRE 3: MATÉRIEL ET MÉTHODES .....</b>		<b>31</b>
3.1	Description de la pisciculture et des étangs étudiés.....	31
3.2	Étapes du projet .....	32
3.3	Caractérisation mensuelle des boues .....	33
3.4	Caractérisation annuelle des boues .....	34
3.5	Méthodologie de calcul pour les déterminations de P dans les composantes du bilan.....	38
3.5.1	Teneur en phosphore de la moulée distribuée et du poisson.....	38
3.5.2	Estimation de la fraction de P dans les boues de l'étang en terre #3 ..	38
3.5.3	Bilan annuel de P dans les étangs d'élevage .....	40
3.6	Méthodes analytiques .....	41
3.6.1	Échantillons de boues.....	41
3.6.2	Pourcentage de phosphore dans la moulée et dans le poisson .....	42
3.6.3	Analyses complémentaires de la moulée et du poisson .....	43
3.6.4	Échantillons du flux liquide .....	44
<b>CHAPITRE 4: MANAGEMENT STRATEGIES IN TROUT PONDS TO MINIMIZE PHOSPHORUS DISCHARGE.....</b>		<b>45</b>
4.1	Abstract.....	46
4.2	Introduction.....	47
4.3	Materials and methods.....	49
4.3.1	Fish farm and studied ponds.....	49
4.3.2	Sludge sampling .....	51
4.3.3	Sample preparation and analysis .....	52

4.3.4	Calculations and assumptions .....	53
4.4	Results.....	58
4.4.1	Distribution of phosphorus in pond sludge .....	58
4.4.2	Influence of operational parameters on sludge phosphorus .....	61
4.4.3	Annual P balance in ponds .....	63
4.5	Discussion.....	65
4.5.1	Annual phosphorus balance in ponds.....	65
4.5.2	Distribution of phosphorus in pond sludge .....	67
4.5.3	Influence of operational parameters on sludge retention .....	68
4.5.4	Removal frequency of sludge.....	69
4.6	Conclusions.....	71
4.7	Acknowledgements.....	72
4.8	References.....	72
<b>CHAPITRE 5: RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES .....</b>		<b>78</b>
5.1	Concentration du volume des boues sous l'aérateur.....	78
5.2	Distribution du phosphore dans la boue des étangs .....	79
5.3	Caractéristiques complémentaires des boues.....	81
5.4	Entraînement de particules de boues .....	82
<b>CHAPITRE 6: DISCUSSION GÉNÉRALE.....</b>		<b>85</b>
6.1	Mécanismes de rétention de P dans la boue des étangs .....	85
6.2	Bilan annuel de P dans les étangs d'élevage.....	87
6.3	Distribution de P dans le fond des étangs et fréquence de vidange des boues .....	89
<b>CHAPITRE 7: CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....</b>		<b>92</b>
<b>RÉFÉRENCES .....</b>		<b>95</b>
<b>ANNEXES.....</b>		<b>107</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1. Nombre des entreprises piscicoles par classe de niveaux de production annuelle entre 2000 et 2006 (Morin, 2007).....	9
Tableau 2.2. Vitesses d'entraînement pour différents matériaux (Roberson <i>et al.</i> , 1998).....	20
Tableau 3.1. Caractéristiques des boues des étangs bétonnés, du sol et masse excavée (boues + sol) de l'étang #3 à la fin de la campagne de production 2007-2008 .....	39
Tableau 3.2. Caractéristiques estimées de la boue et du sol de la vidange annuelle de l'étang #3 .....	40
Tableau 3.3. Méthodes analytiques pour les échantillons de boues.....	42
Tableau 3.4. Prétraitement des échantillons de moulée et de poisson pour l'analyse de phosphore .....	43
Tableau 3.5 Méthodes analytiques pour les échantillons de flux liquide (APHA <i>et al.</i> , 2005).....	44
Table 4.1. Main characteristics of studied ponds .....	50
Table 4.2. Monthly measurements of main operational parameters in ponds #2 and #3 during phase 2 .....	70
Tableau 5.1. Caractérisation mensuelle de boue et sa relation avec les paramètres opérationnels de l'étang .....	79
Tableau 5.2. Comparaison de la vitesse d'écoulement moyenne et la vitesse d'entraînement de particules dans les étangs #2 et #3 .....	83
Tableau 5.3. Caractéristiques des aérateurs de surface et des diffuseurs du fond des étangs.....	84

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1. Production piscicole au Québec (Morin, 2007).....	7
Figure 2.2. Formes de phosphore analytique dans l'environnement aquatique .....	10
Figure 2.3. Forme de rejets et bilan de phosphore chez la truite arc-en-ciel (Ouellet, 1999).....	13
Figure 2.4. Solubilités des phosphates de fer, aluminium et calcium.	
FePO <sub>4</sub> (strensite), AlPO <sub>4</sub> (variscite), CaHPO <sub>4</sub> (dicalcium de phosphate),	.....
Ca <sub>4</sub> H(PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (octocalcium de phosphate), Ca <sub>10</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> (OH) <sub>2</sub> (hydroxylapatite)	.....
et Ca <sub>10</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> (F) <sub>2</sub> (fluoroapatite).....	17
Figure 2.5. Lignes de courants causées par les aérateurs de surface dans les étangs d'élevage (AIR-O-LATOR, 2008).....	19
Figure 2.6. Estimation du flux massique annuel de phosphore dans un étang d'élevage (en terre) à partir de l'intégration de quelques études menées au Québec.....	24
Figure 3.1. Méthode de prélèvement des échantillons mensuels des boues des étangs.....	33
Figure 3.2. Procédure d'échantillonnage des boues des vidanges annuelles des étangs à fond bétonné #1 et #2. A : nettoyage de parois; B : mesure du volume de boues; C : échantillonnage représentatif des boues.....	36
Figure 3.3. Procédure d'échantillonnage des boues de la vidange annuelle de l'étang en terre #3. A : excavation par pelle mécanique; B : transfert du masse excavée dans un conteneur; C : mesure du volume de la masse excavée; D : échantillonnage représentatif des boues.....	37
Figure 3.4. Composition et caractéristiques de la masse excavée dans la vidange annuelle de l'étang #3.....	39
Figure 4.1. Fish farm configuration.....	49

Figure 4.2. A) Schematics of fish pond for mass balance. Note: B: fish biomass; $B_A$ : biomass added to pond; $B_L$ : biomass lost; $B_s$ : biomass sold; e: earth; F: feed; i: inlet; o: outlet; s: sludge. B) Symbols used in calculations.....	53
Figure 4.3. Phosphorus accumulation trends in sludge at the bottom of ponds # 2 and # 3 based on monthly sludge characterization. Time 0 (when fish were added to ponds) corresponds to Sept. 8th, 2007 and Aug. 15th, 2007 for ponds # 2 (concrete bottom) and # 3 (earth bottom), respectively. End of production was on May 28th, 2008 and April 22nd, 2008 for ponds # 2 and # 3 respectively.....	60
Figure 4.4. P retained in sludge in shotcrete pond #2 and in earthen pond # 3 as a function of hydraulic retention time (HRT) for the production year 2007-2008.....	61
Figure 4.5. P retained in sludge in shotcrete pond #2 and in earthen pond # 3 as a function of surface overflow rate (SOR) for the production year 2007-2008.....	62
Figure 4.6. P retained in sludge in shotcrete pond #2 and in earthen pond # 3 as a function of fish density ( $f_d$ ) for the production year 2007-2008.....	63
Figure 4.7. Phosphorus mass balance in shotcrete ponds # 1, # 2, and earthen pond #3 as a function of phosphorus input from feed and collected phosphorus in annual sludge removal.....	64
Figure 5.1. Distribution de P dans la boue des étangs 2 et 3 pendant octobre 2007 à mai 2008 et octobre 2007 et avril 2008, respectivement.....	80
Figure 5.2. Valeurs moyennes de fraction volatile et siccité des boues dans chaque sous-section (10) des étangs #2 et #3.....	81
Figure 6.1. Intégration des bilans annuels de P dans les étangs d'élevage mesurés, dont quatre bilans pour les étangs bétonnés et un bilan pour l'étang en terre.....	88

## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

- $\%$  : Pourcentage
- AAQ : Association des Aquaculteurs du Québec
- Al : Aluminium
- $B$  : Biomasse de poisson (fish biomass)
- $B_A$  : Masse annuelle de poissons admis dans l'étang (kg/a)
- $B_L$  : Masse annuelle de poissons perdus par mortalité et prédatation (kg/a)
- $B_s$  : Masse de poissons vendus (kg/a)
- $C$  : Concentration (mg/L)
- Ca : Calcium
- $C_{P_i}$  : Concentration de phosphore à l'entrée de l'étang (mg P/L)
- $C_{Ps}$  : Concentration de phosphore dans les boues de l'étang (mg P/L)
- $d$  : Diamètre des particules ( $\mu\text{m}$ )
- DCO : Demande chimique en oxygène (mg/L)
- dur : Durée de la production annuelle en jours (d) (duration)
- e : Sol (*earth*)
- EGB : Biofiltre granulaire expansible
- $E_{p/B}$  : Phosphore rejeté par masse de poisson produit (kg P rejeté/kg poisson produit)
- $f$  : Facteur de friction de Darcy-Weisbach
- $F$  : Moulée (*Feed*)
- FCR : Taux de conversion alimentaire (kg moulée/kg poisson) (*feed conversion rate*)
- $f_d$  : Densité du poisson ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) (*fish density*)
- Fe : Fer

- $f_{p,B}$  : Fraction de phosphore dans la biomasse (g P/g poisson)
- $f_{p,T}$  : Fraction de phosphore dans les matières totales(g P/g TS)
- $f_{V,T}$  : Fraction volatile (g matières volatiles/g matières totales)
- $g$  : Gravité ( $9,81 \text{ m.s}^{-2}$ )
- $\text{Ge}$  : Gravité spécifique (g/mL)
- $\text{GPM}$  : Gallon par minute
- $\text{HRT}$  : Temps de rétention hydraulique (h) (*hydraulic retention time*)
- $i$  : Entrée (*inlet*)
- $k$  : Constante, fonction du type de matériau des particules
- **LISAM** : Lit de séchage à macrophytes
- **LPM** : Litres par minute
- **MAPAQ** : Ministère de l'Agriculture, des Pêches et de l'Alimentation du Québec
- **MDDEP** : Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec
- **Mn** : Manganèse
- **MRNF** : Ministère de Ressources naturelles et de la Faune
- **MT** : Matières totales (mg/L ou mg/g)
- **MVT** : Matières volatiles totales (mg/L ou mg/g)
- $o$  : Sortie (*oulet*)
- **OD** : Oxygène dissous (mg/L)
- $\text{o-PO}_4$  : Orthophosphates (mg P/L)
- $p$  : Phosphore (kg P)
- **PAPE** : Piège à phosphore extensif
- $PB$  : Production annuelle de poisson (kg/a)
- $PF$  : Moulée annuelle distribuée (kg/a)
- $P_{p_B}$  : Masse de phosphore dans la biomasse annuelle des poissons produits (kg P/a)

- $Pp_F$  : Masse de phosphore dans la moulée annuelle distribuée (kg P/a)
- $Pp_i$  : Masse annuelle de phosphore dans l'affluent de l'étang (kg P/a)
- $Pp_{nt}$  : Masse annuelle de phosphore non retenu par les poissons produits (kg P/a)
- $Pp_o$  : Masse annuelle de phosphore rejeté dans l'effluent de l'étang (kg P/a)
- $Pp_s$  : Masse annuelle de phosphore dans la boue (kg P/a)
- Pt : Phosphore total (mg P/L)
- PTS : Matières totales annuelles (kg/a) (*production of total solids*)
- PVS : *Matières volatiles annuelles (kg/a) (production of volatile solids)*
- Q : Débit (m<sup>3</sup>/d) (*flowrate*)
- $Q_s$  : Volume de boues (m<sup>3</sup>)
- RAQ : Réseau Aquaculture Québec
- rpm : révolutions par minute
- s : Boues (*sludge*)
- Sic : Siccité (g matières sèches/ g échantillon)
- SOR : Charge superficielle (m/h) (*surface overflow rate*)
- $s_r$  : Densité relative de particules
- STRADDAQ : Stratégie de développement durable en aquaculture en eau douce au Québec
- t : Tonne
- T° : Température (°C)
- TFAEDQ : Table filière de l'aquaculture en eau douce du Québec
- TS : Matières totales (g TS/g échantillon) (total solids)
- TSS : Matières totales en suspension (mg/L) (*total suspended solids*)

- $V_h$  : Vitesse d'entraînement de particules (m/s ou m/h) (*scour velocity*)
- VS : Matières volatiles (g VS/g échantillon) (volatile solids)

## **LISTE DES ANNEXES**

ANNEXE 1. Caractérisation mensuelle des boues de l'étang #2 (en béton) .....	108
ANNEXE 2: Caractérisation mensuelle des boues de l'étang #3 (en terre).....	111
ANNEXE 3: Résultats de la vidange annuelle 2006-2007 .....	113
ANNEXE 4: Résultats de la vidange annuelle 2007-2008 .....	114
ANNEXE 5: Registre de moulée par étang 2007-2008 .....	116
ANNEXE 6: Registre de poissons dans l'étang #1 (2007-2008) .....	124
ANNEXE 7: Registre de poissons dans l'étang # 2 (2007-2008) .....	125
ANNEXE 8: Registre de poissons dans l'étang # 3 (2007-2008) .....	126
ANNEXE 9: Registre de poissons dans l'étang géniteur (2007-2008).....	127
ANNEXE 10: Mesures de débit dans les étangs .....	128
ANNEXE 11: Caractéristiques des aérateurs de surface des étangs d'élevage .....	129

## CHAPITRE 1

### INTRODUCTION

#### 1.1 Problématique des activités piscicoles d'eau douce au Québec

À partir des années 1980, l'industrie piscicole québécoise a connu une expansion qui a permis une production de 2 200 tonnes en 1998 et 1999. En 2003 et 2004, la production de poisson d'élevage en eau douce était de 1400 tonnes (Morin, 2007), ce qui représentait 68% de la production aquacole québécoise (le reste étant la production en milieu marin). Depuis les années 2000, la production piscicole a été réduite en raison de restrictions environnementales, notamment, à cause des rejets de phosphore dans les cours d'eaux. La fermeture de plusieurs entreprises de production entre les années 2000 et 2003 a aussi été observée (MAPAQ, 2005; Morin, 2007).

L'industrie piscicole constitue une source significative de polluants pour les milieux récepteurs. Le métabolisme du poisson et l'apport de la moulée entraînent la présence de matières en suspension et de solides décantables (Maillard *et al.*, 2005), ainsi que d'azote et surtout de phosphore, accélérant les processus d'eutrophisation des cours d'eaux. La contribution de nutriments par tonne de poisson produit est estimée à 100-150 g NH<sub>4</sub>-N /d et à 20-60 g P/d (Boaventura *et al.*, 1997). Au Québec, le phosphore est l'élément contraignant, pour les milieux récepteurs, de la plupart des piscicultures d'eau douce (Forget, 2001). Par conséquent, l'Association des aquaculteurs du Québec (AAQ), le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP), le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ) et la Table filière de l'aquaculture en eau douce du Québec (TFAEDQ) ont conclu une entente de partenariat appelée « stratégie de développement durable de l'aquaculture en eau douce au Québec (STRADDAQ) ». Cette entente est présentement la solution qui tient compte des préoccupations de chacun des maillons de la filière piscicole québécoise. La STRADDAQ s'articule principalement autour d'un engagement des pisciculteurs à diminuer, entre 2004 et 2014, leurs rejets

moyens annuels estimés de 7,2 kg de phosphore par tonne (t) de production à 4,2 kg de phosphore par tonne de production (AAQ *et al.*, 2003). Sur 90 piscicultures québécoises inscrites au MAPAQ en 2004, 36 produisaient moins de 5 t/an, 53 moins de 10 t/an et 76 moins de 25 t/an (Morin, 2006).

Dans le cadre de la STRADDAQ, une première phase d'un portrait aquaenvironnemental a été réalisée en 2004-2005 auprès de 67 pisciculteurs contribuant à 86% de la production québécoise. Plus de 91% des pisciculteurs ont utilisé au moins un étang pour l'élevage (MAPAQ, 2005). Le nettoyage des étangs est normalement effectué par vidange complète du bassin, en moyenne, une fois l'an. Cette technique d'enlèvement des boues du flux principal représente une des meilleures méthodes pour réduire les rejets de polluants des piscicultures. Selon Cripps et Bergheim (2000), les solides d'un effluent d'une pisciculture d'élevage intensif peuvent contenir le P à des teneurs variant entre 30 et 85% du phosphore total. Il a également été montré que les matières particulières d'un diamètre supérieur à 100  $\mu\text{m}$  étaient bien séparées par décantation physique. De plus, de nombreux systèmes de microtamisage ont été développés pour permettre de retenir des particules aussi fines que 20  $\mu\text{m}$  (Cripps et Bergheim, 2000), ce qui permet d'améliorer grandement l'efficacité de rétention de P.

Une autre technique de diminution des polluants est l'optimisation de l'alimentation des poissons. L'utilisation de nouvelles générations de moulée qui contient moins de P (Sugiura *et al.*, 1999) offre une meilleure digestibilité, une meilleure décantation et une plus grande cohésion de fèces (Brinker *et al.*, 2005). D'autre part, des apports trop fréquents de moulée génèrent une activité plus importante de poissons qui remettent en suspension beaucoup de matières en suspension contenant du P et des apports en excès ou carence de moulée, générant ainsi, des problèmes de pollution (Cho *et al.*, 1994). L'ensemble de ces techniques a été compilé par le concept de BMP (*best management practices*) qui consiste à réduire les rejets de polluants et

notamment, de P, en optimisant chaque étape de la production piscicole (Seo et Boyd, 2001; Saraiva Gomes, 2003).

La pisciculture québécoise a pour défi d'implanter ces techniques et de trouver les moyens pour atteindre les objectifs de rejets en P. En fait, les mécanismes d'élimination et de présence de P dans les étangs d'élevage ne sont pas précisément connus et les données disponibles ne permettent pas de répondre à ces questions (Sauvé et al., 2006). À cette fin, une caractérisation de flux de phosphore dans les étangs piscicoles et l'identification des facteurs influençant les rejets en phosphore de la pisciculture seront évaluées à partir de l'étude de la quantité de phosphore récupéré dans les boues accumulées au fond des étangs au moment de la vidange annuelle.

## 1.2 Hypothèses

1. Les conditions hydrauliques résultantes du fonctionnement d'un aérateur de surface favorisent l'accumulation des boues piscicoles sous cet aérateur dans un étang d'élevage.

L'originalité de cette hypothèse est basée sur le fait qu'il n'a pas encore été démontré que les divers mécanismes d'opération, en combinaison avec le fonctionnement des aérateurs de surface dans les bassins d'élevage, pourraient entraîner l'accumulation de la boue sous ces aérateurs.

2. L'enlèvement des matières particulières au fond d'étangs d'élevage permet de récupérer près de 20% du phosphore non retenu par des poissons dans un système où 100% du P provient directement de la moulée.

L'originalité de cette hypothèse est basée sur le fait que la proportion de phosphore éliminée dans la collecte annuelle de boues des étangs piscicoles et son influence dans le rejet de P des effluents de ces étangs n'ont pas été évalués en pisciculture de moyenne taille au Québec.

### 1.3 Objectifs

L'objectif général du projet est d'établir un bilan annuel de phosphore des étangs piscicoles et d'identifier les facteurs influençant les rejets en phosphore d'une pisciculture en étangs de moyenne taille, d'après la masse de phosphore récupérée dans les boues des vidanges annuelles.

Les objectifs spécifiques du projet sont les suivants :

- a. Déterminer la proportion de phosphore récupérée par la collecte annuelle de boues d'étangs piscicoles et évaluer l'avantage d'une collecte plus fréquente.
- b. Établir l'influence de certains paramètres sur l'efficacité de rétention du phosphore dans les étangs d'élevage : le temps de rétention hydraulique (HRT), la charge superficielle (SOR), la densité de poissons et le type de matériau dans le fond des étangs.
- c. Évaluer la distribution du phosphore dans les boues accumulées d'étangs d'élevage.

## CHAPITRE 2

### REVUE DE LITTÉRATURE

#### 2.1 Réglementation relative à l'aquaculture en eau douce

Pour développer des activités d'aquaculture commerciale au Québec, il est nécessaire de détenir soit le permis d'aquaculture en milieu terrestre pour l'élevage, soit le permis d'étang de pêche, tous les deux étant délivrés par le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ).

Le permis pour l'élevage s'adresse aux établissements piscicoles produisant des poissons destinés à l'ensemencement, à la consommation, et à l'approvisionnement des autres éleveurs tandis que le permis pour l'étang de pêche s'adresse aux exploitants d'un étang de pêche, lesquels gardent des poissons en captivité dans un plan d'eau artificiel pour les vendre à des pêcheurs qui les capturent à la ligne (Morin, 2007).

Le Règlement relatif à l'aquaculture commerciale, établit les conditions pour l'obtention de ces permis. Le MAPAQ exige que l'entreprise détienne un certificat d'autorisation du Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) et une autorisation faunique du Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune (MRNF) pour les piscicultures construites après 1972 (Morin et Direction de l'aquaculture et du développement durable (Québec), 2006).

Le certificat d'autorisation du MDDEP limite la quantité d'eau qui peut être captée à partir d'un cours d'eau de surface et impose des mesures pour la diminution des impacts de la production piscicole sur l'environnement aquatique. Le certificat exige un traitement minimal d'un effluent piscicole préalablement à son rejet dans le cours

d'eau récepteur et le respect de seuils maximaux de rejets pour certains polluants (Morin, 2007)

Afin de protéger l'intégrité de la faune sauvage, la production piscicole est limitée sur le territoire québécois, l'élevage d'une espèce n'étant permis qu'aux endroits où elle est déjà présente à l'état naturel. Le territoire de la province a donc été subdivisé en 28 zones, à l'intérieur desquelles on a déterminé les espèces de poissons et les activités d'élevage, de transport et d'ensemencement permises pour chacune d'elles (Morin, 2007).

L'entente entre l'AAQ, le MDDEP et le MAPAQ appelée STRADDAQ prévoit une série de mesures pour que la filière piscicole québécoise puisse respecter sur une base volontaire, d'ici 2014, la limite de rejets moyens annuels de 4,2 kg de phosphore par tonne de production (AAQ *et al.*, 2003)

## 2.2 Production piscicole au Québec

La production piscicole au Québec depuis 1980 a augmenté progressivement jusqu'à l'année 1999, où elle a atteint 2200 tonnes (Figure 2.1). La production a régressé par la suite à 1400 tonnes en 2004. Les raisons de cette diminution ont été les limites de rejets de phosphore dans les cours d'eau et la fermeture de plusieurs entreprises de production importantes. Une entente appelée Stratégie de développement durable de l'aquaculture en eau douce au Québec (STRADDAQ), ratifiée en 2004 par les pisciculteurs, le MAPAQ et le MDDEP, a permis de consolider les entreprises en place et de cesser la diminution de la production (Morin, 2007).

La production piscicole au Québec est constituée principalement de salmonidés. L'omble de fontaine et la truite arc-en-ciel sont les deux plus importantes espèces. L'omble de fontaine domine la biomasse produite depuis 2002. Selon Morin (2007), la production de la truite arc-en-ciel a atteint 617 tonnes en 2006 tandis que celle de l'omble de fontaine a été de 758 tonnes au cours de la même année.

L'omble de fontaine, une espèce indigène au Québec, est vendue surtout à des fins d'ensemencement en milieu naturel et en étang de pêche. Il est le plus recherché pour la pêche sportive. La truite arc-en-ciel, originaire des États-Unis, est principalement utilisée pour le marché de la consommation parce qu'elle se prête plus facilement à l'élevage que l'omble de fontaine. Elle occupe aussi une part du marché de l'ensemencement et de l'étang de pêche, dans les situations où la température des plans d'eau est trop élevée pour l'omble de fontaine (Morin, 2007).

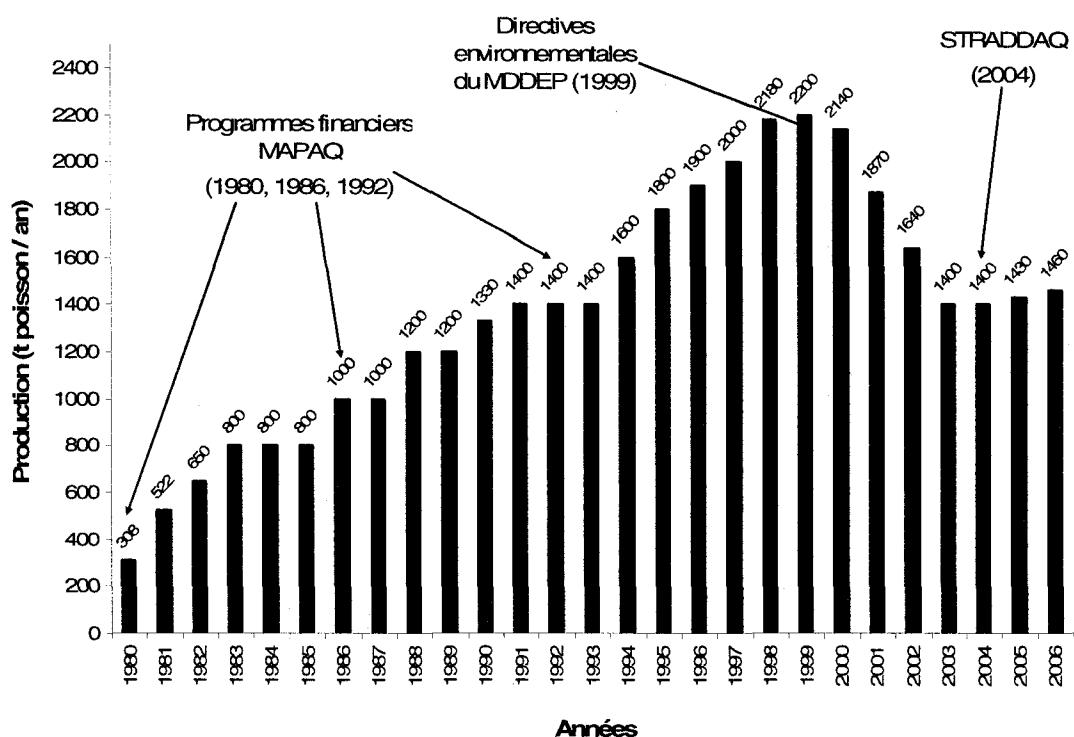


Figure 2.1. Production piscicole au Québec (Morin, 2007).

L'omble chevalier, espèce naturelle présente dans peu de plans d'eau au sud du Québec, représente la troisième plus importante production. Elle est destinée au

marché de la consommation. La production est en augmentation, elle a atteint 60 tonnes en 2006.

Les autres espèces ont constitué environ 25 tonnes de la production annuelle depuis 1998. Selon la production enregistrée en 2006, ces espèces sont la truite brune (10 tonnes), les hybrides Moulac et Lacmou (10 tonnes), la ouananiche (< 2 tonnes), le dore et la perchaude (< 2 tonnes), le touladi (< 1 tonne) et l'achigan (< 1 tonne).

### **2.3 Types, nombre et taille des entreprises**

Au Québec, il existe deux types d'entreprises piscicoles : les stations piscicoles productrices et les étangs de pêche. La quasi-totalité de la production est réalisée dans les stations piscicoles qui sont exploitées par des producteurs agricoles. Les étangs de pêche offrent principalement une activité sportive dont l'exploitation est saisonnière. Les propriétaires s'approvisionnent auprès des stations piscicoles productrices. Certains font un peu d'engraissement de truite dans leurs étangs.

Selon Morin (2007), le nombre de permis d'établissement piscicoles et d'étangs de pêche émis en 2006 a été de 126 et de 181, respectivement. Quant au nombre des entreprises selon la production, le tableau 2.1 montre une diminution du nombre des entreprises de 1 à 5 tonnes, de 5 à 10 tonnes et de plus de 50 tonnes tandis que le nombre des entreprises de 10 à 25 tonnes ont augmenté et le nombre de celles de 25 à 50 tonnes se sont maintenues stables entre 2000 et 2006.

**Tableau 2.1. Nombre des entreprises piscicoles par classe de niveaux de production annuelle entre 2000 et 2006 (Morin, 2007).**

Taille des entreprises (*)	Production des entreprises (tonnes/année)	2000	2002	2004	2006
Petite	1 à 4,9	49	45	38	38
	5 à 9,9	20	18	12	12
Moyenne	10 à 24,9 (**)	20	27	27	27
	25 à 49,9	7	7	7	7
Grande	plus de 50	10	7	7	7
<b>Total</b>		<b>106</b>	<b>104</b>	<b>91</b>	<b>91</b>

(\*) La classification par taille n'est pas officielle toutefois elle est pratique pour nos études

(\*\*) Pisciculture étudiée.

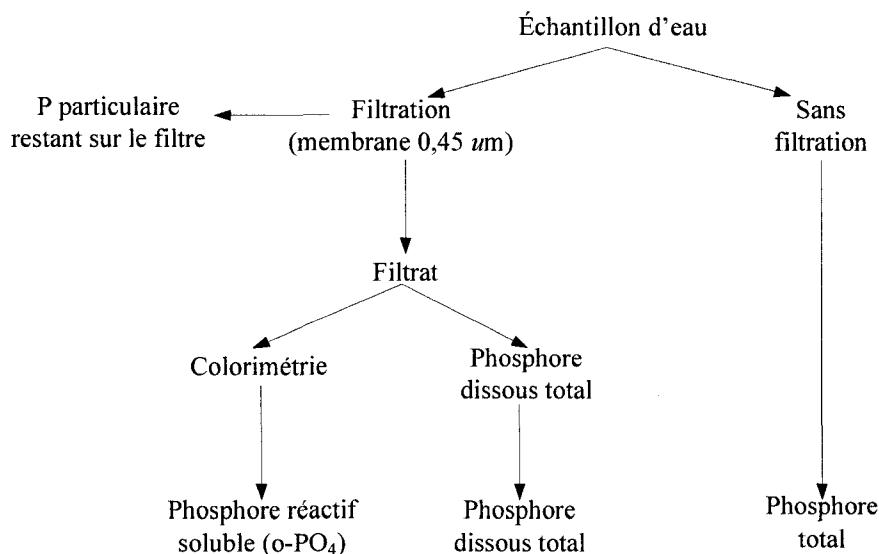
## 2.4 Le phosphore dans le milieu aquatique et l'eutrophisation

Le phosphore est essentiel pour la croissance des algues et d'autres organismes biologiques dans le milieu aquatique. Cependant, l'enrichissement de l'eau, par des nutriments, et en particulier par des composés d'azote et de phosphore, est à l'origine de l'eutrophisation. Celle-ci est définie comme une pollution minérale élevée des cours d'eau, qui entraîne la croissance d'organismes biologiques, causant effets toxiques et néfastes dans l'écosystème des eaux (e.g. consommation de l'oxygène dissous, etc.).

Dans les eaux douces, le phosphore est l'élément limitant de la croissance de phytoplancton et des plantes aquatiques (Ackefors et Enell, 1994; Ouellet, 1999). Le phosphore est rejeté dans le milieu aquatique sous forme particulaire et dissous. Les composés particulaires incluent le phosphore présent dans les organismes vivants, le phosphore adsorbé sur des complexes inorganiques tels les argiles, les carbonates et les hydroxydes de fer, ainsi que le phosphore adsorbé sur des particules organiques mortes. Le phosphore dissous est composé d'orthophosphates ( $H_nPO_4^{(3-n)-}$ , n allant de 0 à 3), de polyphosphates qui proviennent souvent des détergents synthétiques, ainsi que de colloïdes organiques. De toutes ces formes, le phosphore inorganique soluble sous forme d'orthophosphates est disponible pour le métabolisme biologique (Metcalf & Eddy *et al.*, 2003).

Les roches de stockage de phosphore (l'apatite, par exemple), les engrains, les excréptions des animaux, l'épandage des boues des stations d'épuration sont les principales sources de phosphore dans le milieu terrestre. Ainsi, les eaux de ruissellement de terres aménagées à des fins d'exploitation forestière ou agricole constituent une source importante de phosphore dans le milieu aquatique. De plus, les rejets d'eaux usées municipales et industrielles augmentent la teneur de phosphore dans l'eau (Chambers *et al.*, 2001).

Plus de 90% du phosphore présent dans les milieux aquatiques se retrouve sous forme organique, et environ 70% de celui-ci est sous forme particulaire. Le phosphore inorganique soluble ne constitue donc qu'une faible partie du phosphore total présent dans les milieux aquatiques. Alors, la mesure de la concentration du phosphore total est plus indicatrice de l'état trophique du milieu (Ouellet, 1999).



**Figure 2.2. Formes de phosphore analytique dans l'environnement aquatique**  
(Chambers *et al.*, 2001).

La Figure 2.2 schématise la mesure des différentes formes de phosphore analytique dans l'environnement.

La comparaison de la contribution de diverses sources de phosphore dans les eaux de surface et les eaux souterraines au Canada a été effectué en 1996 par (Chambers *et al.*, 2001). Sur les 68300 tonnes annuelles de phosphore rejeté dans les sources d'eau, 8,2% proviennent des installations municipales de traitement des eaux usées, 3,4% des égouts sanitaires et purges des égouts pluviaux, 2,8% de fosses septiques, 2,9 % de rejets des eaux usées industrielles, 82 % des champs agricoles (après la récolte) et 0,7 % de l'aquaculture.

L'aquaculture est donc une source modeste de contribution de phosphore en comparaison avec des autres activités, mais elle contribue de façon croissante à l'apport d'éléments nutritifs dans les eaux canadiennes.

Les rejets d'éléments nutritifs des exploitations aquacoles résultent de l'excrétion des déchets dissous ou solides par les poissons et de la décomposition de la nourriture excédentaire. Les exploitations aquacoles canadiennes rejettent environ 500 tonnes de phosphore dans les eaux côtières et les eaux intérieures (Chambers *et al.*, 2001). Du phosphore total rejeté par la aquaculture canadienne, les Provinces atlantiques et la Colombie-Britannique représentent ensemble 80% des rejets dans ce secteur d'activité. Ainsi, la contribution de l'aquaculture québécoise est mineure et égale à 2% des rejets aquacoles canadiens.

Dans le même rapport, on note que la province de Québec contribue à 46 % des rejets du phosphore au Canada. De ce pourcentage, 92% proviennent de l'agriculture québécoise tandis que la contribution de l'aquaculture est minime et égale à 0,03% des rejets de phosphore de la province (10 tonnes par an).

## 2.5 L'excrétion du phosphore par les poissons

Les poissons ont besoin d'azote et de phosphore pour leurs activités métaboliques. Ces éléments sont apportés aux poissons par leur nourriture (moulée), mais ils ne sont

pas absorbés ou digérés complètement (digestibilité). Il y a donc une certaine quantité rejetée dans le milieu (Ouellet, 1999).

La digestibilité du phosphore est très variable selon les espèces et selon l'origine du phosphore. Le phosphore peut être d'origine animale (farine d'os, farine de poisson, farine de volaille), végétale ou minérale. De 100% ingéré, le phosphore d'une farine de poisson est digestible à 60% par la truite arc-en-ciel (Dosdat, 1992). Par contre, le phosphore d'origine végétale sous forme complexe de sels de calcium et de magnésium de phytate est peu utilisable par les poissons (0-20%) qui ne possèdent pas l'enzyme phytase nécessaire pour les digérer (Dosdat, 1992; Vandenberg, 2001). Le phosphore ingéré est ainsi retenu dans des proportions assez variables. Le taux de rétention ne dépasse pas 30% et est en moyenne de 20% (Dosdat, 1992). D'autres études montrent des taux de rétention de 38 à 55% selon la température et la ration alimentaire d'utilisation de nutriments (Azevedo *et al.*, 1998).

De nos jours, la moulée est produite à des niveaux plus élevés en éléments digestibles et nutritifs (protéines et lipides) et par conséquent, des niveaux plus élevés d'énergie digestible. Ces moulées à haute teneur en énergie digestible (e.g. protéine de 40-50% et gras de 22-28%) permet d'atteindre des facteurs de conversion alimentaire (FCR : *feed conversion rate*) de 1,0 à 1,2 pour la truite arc-en-ciel de taille commerciale. Ainsi, l'amélioration de la qualité de la moulée et des FCR a permis la diminution significative des déchets solides, des rejets en phosphore et en azote et ultimement des coûts de nourrissage (Boucher et Vandenberg, 2007).

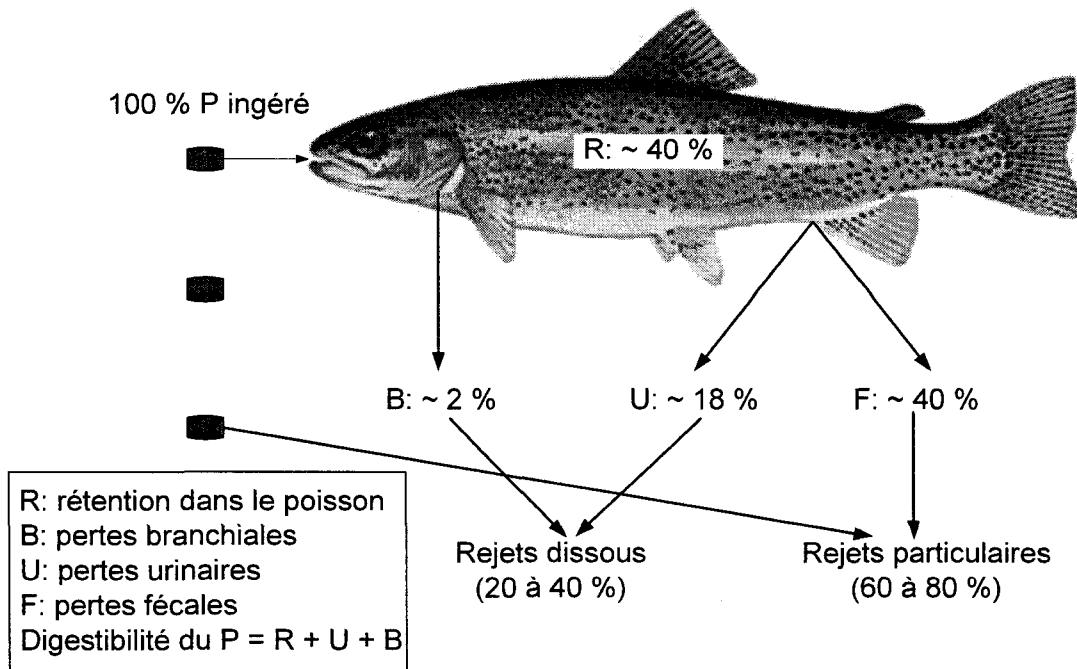


Figure 2.3. Forme de rejets et bilan de phosphore chez la truite arc-en-ciel (Ouellet, 1999).

L'évacuation du phosphore se fait par le rein dans l'urine sous forme de phosphate inorganique et par les fèces sous forme particulaire à partir de la nourriture non digérée et de déchets métaboliques. Une petite proportion (environ 2 %) du phosphore en entrée est rejetée par les branchies (Dosdat, 1992) (Figure 2.3).

Malgré la variabilité des résultats des fractions particulières et solubles dans les excréptions, il est généralement accepté que 60 à 80 % du phosphore est excrété par le poisson sous forme particulaire (Foy et Rosell, 1991; Dosdat, 1992; Ackefors et Enell, 1994; Ouellet, 1999). Les variations observées s'expliquent par les différences dans le contenu et la forme du phosphore dans l'aliment et la forme dans les fèces (Lall, 1991; Dosdat, 1992). En effet, la solubilisation du phosphore non retenu par le poisson dépend de la forme du phosphore excrété. Ainsi, la fraction liée au calcium est insoluble alors que la fraction associée aux composés organiques est dissoute plus

ou moins rapidement : Dosdat (1992) a montré que 26 à 48 % du phosphore présent dans les fèces est re-solubilisé en 15 jours à 17 °C.

Le phosphore total rejeté par les poissons dans le système est défini comme la différence entre la quantité de phosphore provenant de la moulée et la quantité de phosphore retenue dans la biomasse de poisson (Boucher et Vandenberg, 2005; Roque d'Orbcastel *et al.*, 2008). Des bilans de phosphore dans des fermes commerciales au Canada en utilisant des moulées nouvellement développées et traditionnelles ont montré respectivement des rejets de phosphore par le poisson, en kg de P non retenu par les poissons /tonne de poisson produit, de 4,6 et 9,2 (FCR de 0,91 et 1,21) pour l'omble de fontaine et de 4,9 et 6,5 (FCR de 0,84 et 0,92) pour la truite arc-en-ciel (Boucher et Vandenberg, 2005). D'autres études chez l'omble de fontaine avec des farines de volaille à 50% et un FCR de 0,9 ont montré des rejets de phosphore de 4 (en été) et 6 (en automne) kg P non retenu par les poissons/ tonne de poisson produit (Boucher et Vandenberg, 2007).

## **2.6 Mécanismes de rétention du phosphore et sorption des phosphates**

### **2.6.1 Sorption du phosphore**

Dans un étang, en général, le phosphore particulaire, contenu dans des particules organiques et des organismes morts et vivants, se dépose au fond où l'action de bactéries le transformera en orthophosphates par des processus chimiques ou enzymatiques. Ce phosphore dissous est relâché dans les eaux interstitielles du sédiment. Cependant, les ions phosphates ne peuvent pas se diffuser dans la colonne d'eau parce qu'ils sont adsorbés, fortement, dans la couche superficielle des sédiments, par des hydroxydes de fer, d'aluminium et de manganèse, tant que la surface des sédiments est oxydée (principalement par l'oxygène). Le phosphore est ainsi fixé dans les sédiments et est enlevé du système trophique (Ouellet, 1999).

Ensuite, le relargage de phosphore (comme phosphates), des sédiments vers la colonne d'eau, dépend de facteurs tel que la température, l'oxygène dissous, le pH, la nature des sédiments et du matériau de recouvrement de l'étang (Hasnaoui *et al.*, 2001).

Les étangs, à fond recouvert (par exemple, par une fine membrane de polyéthylène), empêchent la percolation du phosphore qui par conséquent se trouve stocké en grande quantité dans le sédiment. Dans de tels étangs, l'accumulation de matière organique est plus élevée, favorisant des conditions anaérobies favorables au processus de relargage du phosphore (lorsque l'activité bactérienne de décomposition de la matière organique consomme tout l'oxygène disponible). Ainsi, le phosphore relargué explique le développement des algues et les niveaux élevés de chlorophylle *a*. Ces algues constituent la majeure partie de la matière organique dans les sédiments (Hasnaoui *et al.*, 2001).

Dans les étangs en terre, le phénomène de relargage de phosphore se manifeste quand les conditions anoxiques font disparaître la couche oxydée de surface des sédiments. Les ions ferriques sont réduits à l'état ferreux, les liens sont affaiblis et les ions phosphates passent alors librement dans l'eau où ils seront disponibles pour les organismes autotrophes (Ouellet, 1999).

Selon les travaux de Hasnaoui *et al.* (2001), dans un étang en terre, le relargage du phosphore a été favorisé par un pH acide ( $\text{pH}=6$ ) tandis que dans un étang à fond plastifié, il a été favorisé par un pH alcalin. Ce comportement a été observé parce que le pH acide a provoqué la dissolution du P lié au calcium alors que le pH alcalin a provoqué celle du phosphore lié aux hydroxydes de fer et sa précipitation partielle sur les carbonates présentes dans les sédiments. De plus, le relargage du phosphore est beaucoup plus actif dans les sédiments d'étangs recouverts parce que l'accumulation

de matière organique favorise l'installation de conditions anaérobies favorables au processus de relargage du phosphore. (Hasnaoui *et al.*, 2001)

La sorption est un processus où les contaminants sont immobilisés à la surface des particules solides par des mécanismes d'adsorption et de précipitation.

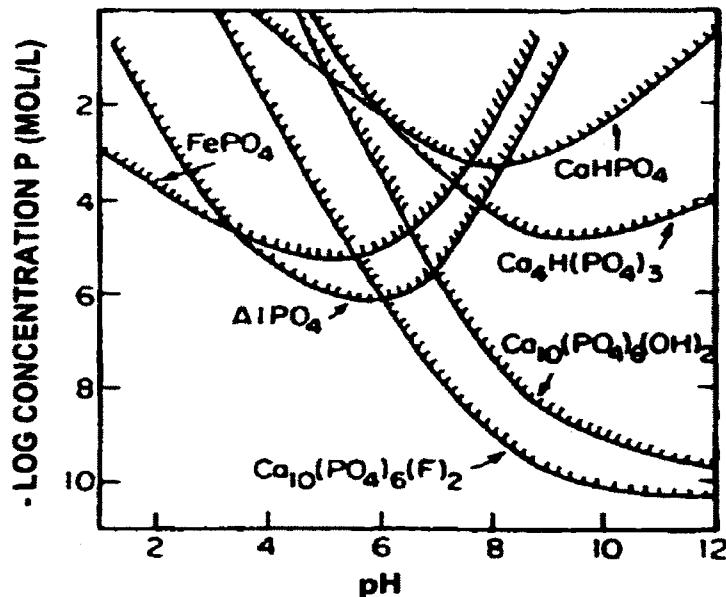
L'adsorption des phosphates est réalisée principalement par deux mécanismes majeurs, l'échange de ligands et l'échange ionique.

L'échange de ligands consiste en un remplacement d'un groupe OH<sup>-</sup> ou H<sub>2</sub>O des ligands, par un anion comme le phosphate formant ainsi une molécule plus stable. Les ligands sont l'union des groupes OH<sup>-</sup> ou H<sub>2</sub>O avec l'atome central d'un complexe par une liaison de coordination (Sposito, 1989; Forget, 2001).



L'échange ionique est le résultat des forces électrostatiques agissant entre les ions en solution et la surface des particules. La surface d'un solide peut être chargée principalement par des substitutions isomorphiques (e.g. argiles souvent chargées négativement) et par des réactions de groupes fonctionnels ionisables avec des ions en solutions (la plupart des oxydes et hydroxydes) (Sposito, 1989). Les oxydes et hydroxydes possèdent des groupes fonctionnels ionisables et leur charge dépend du pH du milieu. À un pH faible, la surface est chargée positivement alors qu'à un pH élevé, la surface est chargée négativement (Stumm et Morgan, 1981). L'échange d'anions, tels les phosphates, s'effectue en présence d'une surface chargée positivement (pH faible). Ainsi, les oxydes et hydroxydes dans un milieu acide sont intéressants pour l'enlèvement du phosphore dissous.

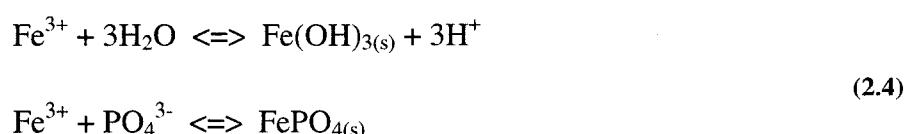
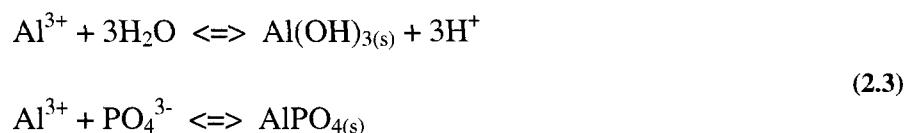
La précipitation a lieu à des teneurs relativement élevées en phosphates. Par contre si les concentrations de phosphates sont faibles pour de courts temps de réaction, l'enlèvement des phosphates est limité à l'adsorption. La formation de minéraux phosphates est étroitement liée au pH du milieu (Figure 2.4).



**Figure 2.4. Solubilités des phosphates de fer, aluminium et calcium. FePO<sub>4</sub> (strengeite), AlPO<sub>4</sub> (variscite), CaHPO<sub>4</sub> (dicalcium de phosphate), Ca<sub>4</sub>H(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> (octocalcium de phosphate), Ca<sub>10</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>(OH)<sub>2</sub> (hydroxylapatite) et Ca<sub>10</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>(F)<sub>2</sub> (fluoroapatite).**

Adapté de (Stumm et Morgan, 1981).

Dans les milieux acides, la précipitation des phosphates est favorisée par la présence d'ions Al<sup>3+</sup> et Fe<sup>3+</sup>. L'aluminium et le fer interagissent avec l'eau pour former des hydroxydes (Al(OH)<sub>3</sub> et Fe(OH)<sub>3</sub>) et ceux avec les orthophosphates pour former la variscite (AlPO<sub>4</sub>) et la strengeite (FePO<sub>4</sub>) selon les équations suivantes :



La précipitation de  $\text{AlPO}_4$  est envisageable pour des pH situés entre 5 et 6, alors que la précipitation de  $\text{FePO}_4$  est située dans la gamme de pH entre 5 et 7 (Figure 2.4). Selon Stumm et Morgan (1981), à des pH supérieurs, la précipitation des hydroxydes ( $\text{Fe(OH)}_3$  et  $\text{Al(OH)}_3$ ) est favorisée et la concentration de phosphates en solution augmente pour encourager leur adsorption sur ces hydroxydes. Finalement, lorsque le pH augmente, les précipités de phosphates d'aluminium et de fer diminuent et ceux de phosphates de calcium augmentent (Stumm et Morgan, 1981).

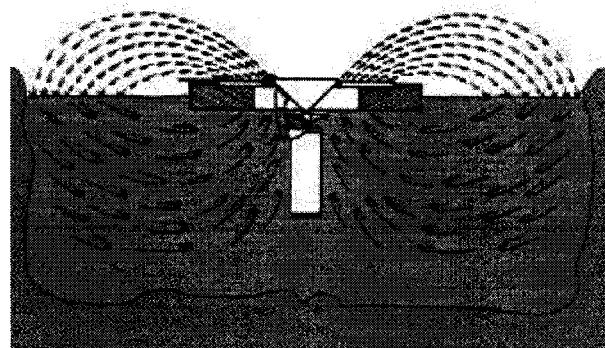
Dans les milieux alcalins, la précipitation de phosphates est plutôt encouragée par la présence des ions calcium. Selon divers auteurs, les principaux sont : le dicalcium de phosphate ( $\text{CaHPO}_4$ ), le tricalcium de phosphate ( $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ), l'octocalcium phosphate ( $\text{Ca}_4\text{H}(\text{PO}_4)_3$ ) et l'hydroxylapatite ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ) (Stumm et Morgan, 1981) (Figure 2.4). La précipitation du phosphate de calcium à partir d'une solution sursaturée se fait généralement en trois étapes : 1) formation de noyaux et précipitation de la phase amorphe, 2) transformation de la phase amorphe en phase cristalline et 3) croissance des cristaux (Stumm et Morgan, 1981)

### 2.6.2 Paramètres opérationnels

L'influence des paramètres opérationnels comme le temps de rétention hydraulique (HRT : *hydraulique retention time*), la charge superficielle (SOR : *surface overflow rate*) et la densité de poissons ( $f_d$  : *fish density*) sur la rétention de phosphore d'étangs d'élevage est presque inexistant dans la littérature. Ces paramètres peuvent favoriser la sédimentation de polluants pour ensuite les récupérer dans la boue. Ainsi, les études préliminaires de Marcotte (2008) ont conclu à la nécessité d'inclure dans la conception d'étangs d'élevage extérieurs, les facteurs de charge superficielle et des temps de renouvellement (temps de rétention hydraulique) adaptés aux paramètres

optimaux pour la production de poissons (débit d'eau, densité de poissons et cycles de production).

Par ailleurs, certains auteurs recommandent les mêmes paramètres pour guider la conception des bassins de sédimentation dans le milieu aquicole. Selon (Timmons *et al.*, 2002), les vitesses de sédimentation des fèces de poissons fraîches ou dans un système de récirculation sont de l'ordre de 0,36 à 154,8 m/h. Ces auteurs recommandent des charges superficielles de conception pour des bassins de sédimentation de boue, inférieures à de 1,66 m/h et moins. Selon (Marcotte, 2007), il est commun de concevoir des bassins de sédimentation de boues piscicoles avec des charges superficielles de 1,0 m/h et moins avec un temps de rétention hydraulique de 2h et plus, dans le but de favoriser la sédimentation de plus fines particules. Cependant, la plupart des étangs d'élevage existant au Québec ont une faible efficacité de sédimentation de particules à cause de turbulences générées par les aérateurs (Figure 2.5) et le mouvement de poissons, malgré le suivi des recommandations sur la charge superficielle.



**Figure 2.5. Lignes de courants causées par les aérateurs de surface dans les étangs d'élevage (AIR-O-LATOR, 2008).**

### 2.6.3 Vitesse d'entraînement de particules

Selon Metcalf & Eddy *et al.* (2003), dans le but d'éviter la resuspension (entraînement ou « scouring » en anglais) de particules sédimentées, la vitesse horizontale (vitesse d'écoulement) qui traverse le bassin doit être faible. Ainsi, si

cette vitesse tangentielle produit l'entraînement de particules sédimentées, elle est dénommée la vitesse d'entraînement ou « scour velocity » en anglais. Selon Metcalf & Eddy *et al.* (2003) et (MDDEP, 1998), l'équation de cette formule critique est la suivante :

$$V_h = [(8k * (s_r - 1) * g * d) / f]^{1/2} \quad (2.5)$$

où :

$V_h$  : vitesse d'entraînement de particules,  $LT^{-1}$  (m/s)

$k$  : constante, fonction du matériau à être entraînée normalement entre 0,04 (sable unigranulaire) et 0,06 (matériau plus adhésive)

$s_r$  : densité relative des particules

$g$  : gravité,  $LT^{-2}$  (9,81 m/s<sup>2</sup>)

$d$  : diamètre des particules, L (m)

$f$  : facteur de friction de Darcy-Weisbach, fonction de la surface d'écoulement et du nombre de Reynolds, normalement entre 0,02 et 0,03.

**Tableau 2.2. Vitesses d'entraînement pour différents matériaux (Roberson *et al.*, 1998)**

Matériau	Vitesse d'entraînement (m/s)
Sable fin	0,46
Loam sableux	0,53
Loam limoneux	0,61
Loam ferme	0,76
Argile peu plastique	1,14
Gravillon	0,76
Gros gravier	1,22

Le tableau ci-dessus indique que l'argile peu plastique est un des matériaux difficiles à entraîner (vitesse d'entraînement de 1,14 m/s), comparable à celle d'un gros gravier.

Selon Maillard *et al.* (2005), plus de 85% de particules des boues sédimentées d'un système de rigolets d'élevage (raceways) avaient un diamètre entre 1,5 et 30  $\mu\text{m}$ .

La densité relative de particules dans les systèmes de récirculation est faible, entre 1,005 et 1,25 (Chen *et al.*, 1993; Patterson *et al.*, 2003; True *et al.*, 2004a; Johnson et Chen, 2006). L'accumulation de particules sédimentées dans les étangs d'élevage est constituée de particules minérales et de particules organiques. Dans les étangs en terre, la fraction minérale est plus élevée que dans les étangs recouverts. La densité relative de particules organiques est beaucoup plus faible que celle de particules minérales du sol (Boyd, 1998).

## 2.7 Bilan de phosphore par enlèvement des boues d'étangs d'élevage

Dans une pisciculture, la moulée qui contient environ 1% (poids humide) de phosphore (Boucher et Vandenberg, 2007), représente la source principale de rejets de phosphore (Pillay, 1992; Cripps et Bergheim, 2000). Ainsi, le phosphore non retenu est issu de l'aliment (moulée) non consommé et non digéré (fèces) ainsi que des excréptions des poissons (pertes branchiales et urinaires) (Figure 2.3) (Cripps et Bergheim, 2000; Bergheim et Brinker, 2003; Roque d'Orbcastel *et al.*, 2008).

La détermination des rejets de nutriments dans une pisciculture est primordiale pour obtenir l'autorisation d'exploitation, contrôler le respect de la législation et augmenter la production sans causer d'impacts sur l'environnement aquatique.

Deux méthodes sont utilisées pour déterminer les rejets de phosphore : 1) une méthode directe qui mesure les flux d'entrée et de sortie de la pisciculture (méthode hydrobiologique) et 2) l'évaluation indirecte, basée sur une approche nutritionnelle (méthode nutritionnelle) qui utilise les quantités apportées de moulée et des

coefficients d'utilisation digestive (Papatryphon *et al.*, 2005; Roque d'Orbcastel *et al.*, 2008). De ces deux méthodes, la méthode nutritionnelle est la plus exacte et robuste pour déterminer les déchets de poissons en termes de nutriments et matières solides (Papatryphon *et al.*, 2005; Roque d'Orbcastel *et al.*, 2008).

Dans une pisciculture en étang, les rejets en phosphore s'accumulent au fond des étangs comme fraction des matériaux solides formant la boue (P particulaire) et l'autre fraction est dirigée vers l'effluent de la pisciculture (P particulaire et P soluble).

Au Québec, 91% des stations piscicoles participant au portrait aquaenvironnemental – phase 1 de la STRADDAQ, utilisait au moins un étang d'élevage et parmi ces entreprises, 79% ont révélé n'utiliser que des étangs (MAPAQ *et al.*, 2005). Ces valeurs démontrent l'importance d'évaluer les étangs d'élevage extérieurs dans le but de comprendre et de diminuer éventuellement les émissions de phosphore des stations piscicoles québécoises.

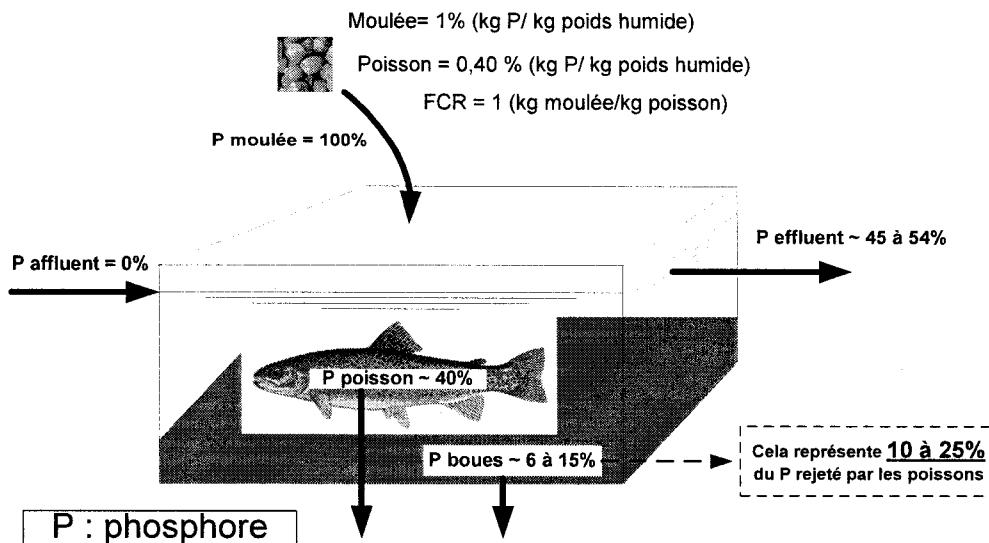
Les études menées par Ouellet (1999) dans des étangs de sédimentation de quatre stations piscicoles ont montré un enlèvement moyen de phosphore de 10 à 20% en mesurant les concentrations à l'affluent et à l'effluent. Bien que ces valeurs ne soient pas comparables à celles d'étangs d'élevage (présence d'aérateurs, mouvements de poissons et variables hydrauliques différentes), elles renseignent sur l'efficacité de l'enlèvement de phosphore des étangs.

Un bilan de phosphore basé sur l'approche hydrobiologique (P des intrants et des extrants) dans une pisciculture québécoise de salmonidés en étang montre que sur 100 % du phosphore des intrants (95% dans la moulée et 5% dans l'affluent), 24 % s'est retrouvé dans les boues, 40 % dans la biomasse de poissons produits et 36 % rejeté à l'effluent (Sauvé *et al.*, 2006). Cependant, les auteurs recommandent de

concentrer les efforts sur une évaluation de la masse de phosphore des boues en visant une balance de phosphore plus exacte.

Un autre rapport du MAPAQ par Marcotte (2008) s'est concentré sur l'évaluation de phosphore récupéré par l'enlèvement des boues de six étangs d'élevage en terre. La conclusion principale de ce rapport est que le nettoyage annuel des boues des étangs en terre évalués ont permis de récupérer environ 25 % du phosphore total rejeté par les poissons (Marcotte, 2008). Et comme recommandation suggérée par Marcotte, les étangs doivent réaliser la récupération de leurs boues au minimum une fois par année. Cependant, le rapport pourrait surestimer la proportion de phosphore mesuré dans la « boue » sachant que la plupart des étangs évalués n'ont été jamais vidangé et que une proportion significative de phosphore des années précédentes a pu rester dans le sol enlevé avec la boue au moment de l'évaluation. De plus, le rapport n'a pas montré les proportions de phosphore à l'effluent des étangs.

Une estimation du flux massique annuel de phosphore dans un étang d'élevage en terre a été élaborée a partir des données existantes au Québec (Ouellet, 1999; Sauvé *et al.*, 2006; Marcotte, 2008). Le bilan considère une concentration de phosphore de la moulée de 1%, et du poisson de 0,4 % (Ouellet, 1999) ainsi qu'un facteur de conversion alimentaire (FCR) de 1 (1 tonne de moulée est nécessaire pour 1 tonne de poisson produit). L'efficacité de captage de phosphore dans les boues a été considérée variant de 10 à 25% du phosphore non retenu par les poissons (Ouellet, 1999; Marcotte, 2008).



**Figure 2.6. Estimation du flux massique annuel de phosphore dans un étang d'élevage (en terre) à partir de l'intégration de quelques études menées au Québec.**

Actuellement, les travaux d'évaluation de flux de phosphore dans la pisciculture en étangs ne permettent pas de conclure avec certitude quant aux observations obtenues (Marcotte, 2008). Les données disponibles demeurent insuffisantes pour répondre aux questions de la dynamique du phosphore dans les étangs d'élevage (Sauvé *et al.*, 2006; Marcotte, 2008). En outre, l'influence du temps de rétention hydraulique, de la charge superficielle, de la fréquence d'enlèvement des boues et de leur distribution dans l'étang, du type de matériaux de construction ou des mécanismes de rétention de phosphore des étangs, n'ont pas encore été étudiée.

## 2.8 Gestion des rejets du phosphore dans la pisciculture

### 2.8.1 Réduction à la source et gestion de l'alimentation des poissons

La première étape pour la réduction de polluants est la réduction à la source, qui consiste à optimiser l'alimentation des poissons. Au Québec, cela a été envisagé par l'utilisation de nouvelles générations de moulées qui contiennent moins de phosphore

(environ 1% du poids humide) et offrent une meilleure digestibilité (Boucher et Vandenberg, 2007), ou qui permettent une meilleure décantation et une plus grande cohésion de fèces (Brinker *et al.*, 2005) sans affecter la croissance des poissons. Des apports optimisés et moins fréquents de moulée sont recommandés dans le but d'éviter la remise en suspension des matières solides contenant du phosphore par des mouvements des poissons ou de moulée non consommée.

L'ensemble de ces travaux et autres actions ont mené au concept du BMP ("Best Management Practices"), qui consiste à optimiser chaque étape de la production piscicole pour réduire les rejets de polluants (Boyd, 2003), et notamment de phosphore, à l'effluent. Par exemple, une liste de points identifiés et à surveiller a été établie par (MacMillan *et al.*, 2003), comme suit :

- point 1: veiller à la qualité de l'eau à l'entrée de la station,
- point 2: contrôler les flux d'eau entrant dans les bassins d'élevage,
- point 3: utiliser la qualité de moulée optimale (faible en P) et en optimiser sa distribution pour une utilisation maximale,
- point 4: veiller à la santé des poissons,
- point 5: gérer les zones de décantation dans les bassins (fréquence de nettoyage en fonction de la charge en polluants),
- point 6: garder les bassins d'élevage propres,
- point 7: surveiller régulièrement la qualité des eaux en sortie de la pisciculture,
- point 8: gérer les boues accumulées suite aux nettoyages des zones de décantation.

### **2.8.2 Réduction par enlèvement et traitement des boues des étangs d'élevage**

Idéalement, après avoir appliqué les pratiques de BMP, la deuxième étape doit se concentrer sur le traitement des matériaux particulaires. Ainsi, des systèmes de

traitement intégrés ont été proposés, dont le but est de concentrer et éliminer les solides (fèces de poisson et moulée non consommée) qui contiennent une fraction significative de phosphore particulaire (entre 60 et 80% selon Ouellet (1999)).

D'abord, il faut favoriser la séparation de solides au sein du bassin d'élevage. Dans certaines fermes piscicoles extensives, il est connu que les boues s'accumulent au fond des bassins et elles sont récoltées par nettoyage au moins une fois par année. L'efficacité d'enlèvement du phosphore pourrait se situer dans la plage de 10 à 25 % du phosphore non retenu par les poissons selon les études préliminaires menées par Ouellet (1999) et Marcotte (2008).

Les facteurs favorisant la déposition ou remise en suspension des boues au fond d'étangs d'élevage sont :

- a. Le type de moulée : les moulées qui permettent une meilleure sédimentation, une plus grande cohésion de fèces et ont une plus grande masse volumique favoriseraient la sédimentation de celles-ci et ensuite l'accumulation de boues.
- b. Le temps de rétention hydraulique (HRT) : la tendance est que le temps de rétention hydraulique plus élevé favorise la déposition de solides en suspension. Les solides en suspension sédimenteront dans les aires de l'étang où les courants d'eau sont faibles pouvant créer l'accumulation de sédiments.
- c. La charge superficielle (SOR) : elle est définie comme le flux d'eau par unité de surface de l'étang. Si la charge superficielle est faible, les particules en suspension sédimenteront plus facilement dans les aires plus favorables de l'étang.
- d. La vitesse d'écoulement moyen : elle est définie comme le flux d'eau qui traverse une unité d'aire transversale de l'étang. Les vitesses élevées causeront la resuspension ou l'entraînement de particules sédimentées. Alors de vitesses faibles favoriseront la permanence de sédiments.
- e. La vitesse d'entraînement de particules : les particules sédimentées dont les vitesses d'entraînement sont élevées, offriront plus de résistance à la resuspension.

- f. La densité d'élevage de poissons : elle est définie comme la biomasse de poisson produite par unité de volume d'étang. La tendance indique que des densités de poisson plus élevées seront les causes de turbulence d'eau dans les étangs et ainsi la resuspension de particules sédimentées.
- g. La taille de poissons : les mouvements des poissons de grande taille peuvent engendrer des fortes turbulences pour remettre en suspension des solides sédimentés dans le fond de l'étang.
- h. La présence d'aérateurs : il existe des aérateurs de surface et des diffuseurs du fond des étangs.
  - Selon les observations préliminaires par les pisciculteurs et par notre équipe de recherche, les aérateurs de surface de puissance élevée (par exemple, dans les étangs étudiés, tous les aérateurs ont eu un moteur de 0,5 HP à 3450 rpm, récirculant un débit de 500 GPM, et l'énergie fournie par étang a été entre 1,5 et 3,2 W/m<sup>3</sup>) génèrent de courants d'eau qui favorisent l'accumulation des boues d'étangs sous ces aérateurs.
  - Les diffuseurs du fond des étangs, par contre, génèrent des petites bulles d'air qui pourraient faire entraîner des particules sédimentées au fond de l'étang et ainsi, les remettre en suspension (par exemple, dans les étangs à fond bétonné, les trois diffuseurs existant dans chaque étang ont fourni une énergie totale par étang variant entre 4,5 et 5,8 W/m<sup>3</sup>).
- i. Le sènnage : il est connue comme l'enlèvement des poissons par le pisciculteur pour le transfert dans un autre étang ou la vente. Cette activité génère des mouvements assez élevés pour « pêcher » les poissons avec des filets de sorte que une remise en suspension des particules sédimentées pourrait s'effectuer.

Une fois que les boues sont concentrées dans les étangs d'élevage, elles seront enlevées par vidange ou pompage et ensuite traitées ou disposées si les conditions les permettent. Autrement, la disposition des boues piscicoles est souhaitable par valorisation ou épandage sur les terrains du pisciculteur ou avoisinants. Un système

que ne dépendrait pas de la disponibilité de terrains d'épandage ou d'un plan agroenvironnemental de fertilisation soumis aux contraintes d'autres utilisateurs serait avantageux pour des pisciculteurs de petit et moyenne taille ( $< 50$  t poisson/an). Dans cette perspective, un système extensif de traitement de boues par lits de séchage à macrophytes (LISAM) et piège à phosphore extensif (PAPE) a été conçu (Comeau *et al.*, 2006). Ce système est capable de retenir plus de 85% du phosphore total (particulaire et dissous) des boues piscicoles. Cependant, ce système n'a pas encore été testé dans une station piscicole à échelle réelle.

### 2.8.3 Réduction du P des effluents

Les technologies les plus répandues pour l'enlèvement des solides des effluents piscicoles sont la sédimentation et le microtamisage.

La fraction particulaire du phosphore rejeté par les étangs d'élevage pourrait être interceptée par sédimentation de particules solides. Selon Ouellet (1999), l'efficacité d'enlèvement du phosphore par des étangs de sédimentation est de 10 à 20%. Toutefois, le développement cyclique d'algues génère des phénomènes saisonniers de relargage, notamment de P comme orthophosphates (Porrello *et al.*, 2003a; b).

L'autre méthode reconnue pour l'élimination des MES est la filtration sur microtamis rotatif à tambour (Cripps et Bergheim, 2000). Cette technologie est une alternative à l'utilisation des étangs de sédimentation. Cripps et Bergheim (2000) citent des efficacités d'enlèvement de 67 à 97 % des MES, 4 à 89 % de l'azote total et 21 à 86 % du phosphore total pour un filtre avec un tamis de 60  $\mu\text{m}$ . Ces auteurs ont aussi observé que l'efficacité variait proportionnellement avec la quantité de déchets dans l'effluent. Les données provenant d'observations dans plusieurs stations piscicoles françaises ont montré des efficacités d'enlèvement pouvant varier de 20 % dans le cas d'eaux peu chargées et à 80 % dans le cas d'eaux très chargées en MES (Thomas,

1997). Selon Ouellet (1999), il est difficile de comparer ces données provenant d'expériences dans des conditions souvent inconnues et avec des filtres différents. Il est donc préférable de reprendre les expériences dans des conditions typiques des entreprises québécoises pour vérifier l'efficacité de ce type d'équipement.

Plusieurs systèmes ont été développés pour traiter le flux dans sa totalité (sans séparation des solides). La plupart sont des systèmes conventionnels ou sophistiqués pour l'enlèvement du P.

Des marais artificiels ont été testés pour traiter la totalité du flux (à l'échelle pilote). Utilisés à des charges hydrauliques élevées, ces derniers ont montré un bon potentiel d'abattement (95,8% TSS, et 49% TP) sur une courte période (Schulz *et al.*, 2003). Ces résultats sont toutefois à remettre en perspective puisque d'une part la nature des effluents piscicoles utilisés dans l'étude citée était plus concentrée que la moyenne (14 mg TSS/L, 41 mg DCO/L, 0,35 mg P/L) et que, d'autre part, les marais artificiels ont nécessité des surfaces élevées pour obtenir des efficacités relativement élevées. Les contraintes de disponibilité de terrain et d'efficacité rendent cette technique inappropriée.

La déphosphatation chimique utilise des sels métalliques tels l'alun, le chlorure ferrique ou encore la chaux pour former des précipités peu ou non solubles. Toutefois, la difficulté de faire précipiter les phosphore a des concentrations souvent inférieures à 0,5 mg/L, les coûts attribués aux produits chimiques, le traitement et la disposition des boues produites, et le contrôle et le suivi du système physico-chimique constituent des inconvénients majeurs. Ainsi, d'un point de vue économique, ce type de traitement est inapproprié en vue d'un système extensif pour une pisciculture (Bellier *et al.*, 2006).

Le biofiltre granulaire expansible (EGBs) est une technologie qui peut fonctionner comme filtre mécanique et filtre biologique. Il a été souvent utilisé pour des systèmes

de récirculation ou intensifs. Ce biofiltre fonctionne à des charges hydrauliques élevées et peut enlever les particules inférieures à  $100 \mu\text{m}$ . Le média est constitué de billes de polyéthylène de 3 à 5 mm de diamètre. Le flux ascendant du biofiltre permet la fluidisation. Il comporte un système de retrolavage appliqué pendant la fluidisation du média. Les solides sont ensuite séimentés à la base, puis déchargés pour leur traitement et leur disposition. Les taux d'enlèvement par ce traitement sont de 80 kg solides/ $\text{m}^3$  de média et de 24-32 kg N/ $\text{m}^3$  de média (nitrification). Les inconvénients de ce système sont la complexité du suivi, l'entretien ainsi que le traitement et la disposition de boues produites.

La déphosphatation biologique se fait via l'alternance anaérobiose/anoxie/aérobiose pour l'accumulation du P sous forme de polyphosphates au-delà des besoins métaboliques de croissance et de maintien cellulaire sous conditions aérobies (Metcalf & Eddy *et al.*, 2003). Le relargage du P accumulé se produit en conditions anaérobiose/anoxie. Le procédé requiert de l'enlèvement et l'élimination de la biomasse accumulatrice de P, contenu dans les boues du réacteur, où un contrôle est nécessaire afin d'éviter tout relargage de P indésirable.

En sachant, que les débits de la pisciculture à traiter sont considérables, ces systèmes de traitement sont très coûteux et ne sont donc pas adéquats pour une pisciculture au Québec (Ouellet, 1999).

## **CHAPITRE 3**

### **MATÉRIEL ET MÉTHODES**

La méthodologie suivie lors des expériences dans la pisciculture étudiée, et par des essais de laboratoire, est présentée dans ce chapitre. Elle complète la méthodologie décrite dans l’article scientifique, à la section 4.3. La méthodologie est la suivante :

- Description de la pisciculture étudiée ainsi que les étapes des expériences (4.3.1).
- Protocoles expérimentaux de caractérisation mensuelle et annuelle des boues des étangs d’élevage (section 4.3.2).
- Description des méthodes analytiques (section 4.3.3).
- Méthodologie de calcul de phosphore dans la moulée et dans le poisson, ainsi que dans les boues des étangs à fond bétonné et en terre 4.3.4).

#### **3.1 Description de la pisciculture et des étangs étudiés**

La pisciculture étudiée a pour nom Pisciculture Gilbert Inc. Elle est située dans la région de l’Estrie au Québec. La zone étudiée de cette pisciculture est constituée des étangs extérieurs, de flux d’eau soutenu, dont : neuf étangs d’élevage, un étang des géniteurs et un étang de sédimentation. L’alimentation en eau de cette pisciculture est principalement de type souterrain toutefois, dans les périodes de sécheresse, des eaux de ruissellement sont utilisées dans le système (Figure 4.1).

Le suivi des expérimentations a été réalisé au sein de deux étangs à fond bétonné (définis dans ce mémoire comme étangs bétonnés #1 et #2) et un étang en terre (nommé étang #3). Les étangs bétonnés ont été sélectionnés en fonction de la similitude des caractéristiques, et ont été choisis en parallèle afin d’éviter des interactions entre les campagnes de mesure. L’étang en terre a été choisi en parallèle pour comparer les facteurs influençant l’efficacité de rétention des boues versus les étangs bétonnés.

La vidange des boues accumulées dans les bassins a été réalisée annuellement.

Les caractéristiques principales des étangs étudiés ont été déterminées sur site et sont présentées dans le tableau 4.1.

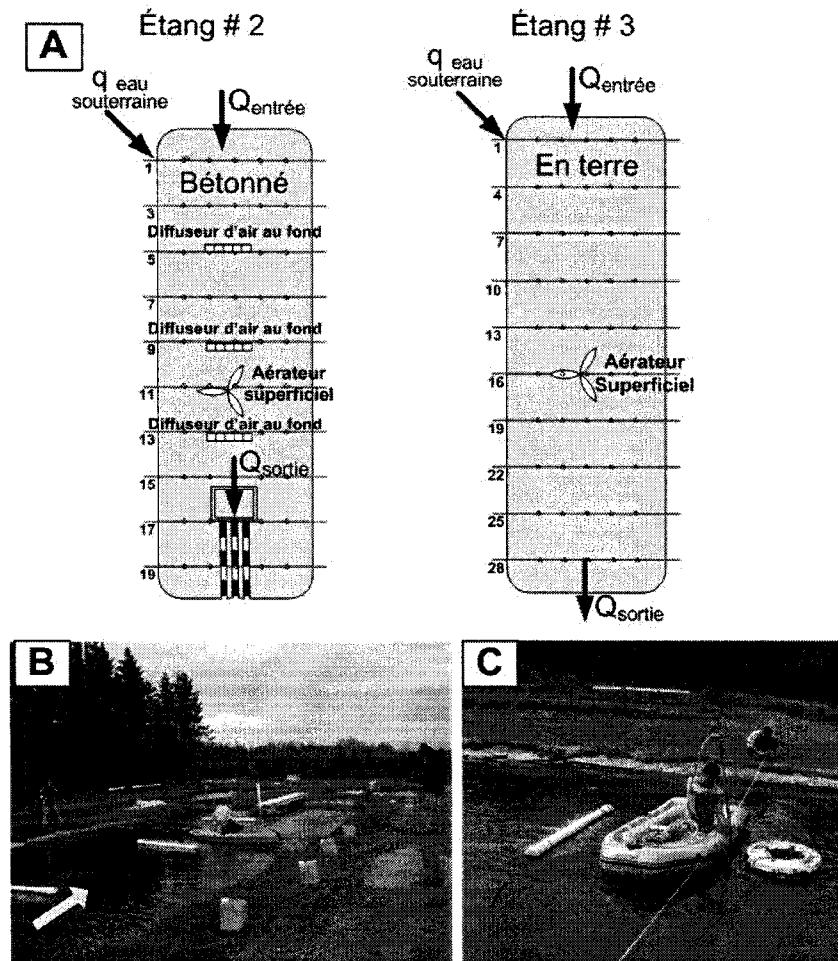
### **3.2 Étapes du projet**

Les essais sur la pisciculture choisie ont débuté de mai 2007 jusqu'à juin 2008. En fonction de la méthodologie, deux étapes d'expériences ont été définies :

- L'étape 1 (campagne d'élevage de septembre 2006 à août 2007), a inclus une séance de mesures dans les étangs bétonnés #1 et #2 dans le but d'établir un bilan et l'efficacité de récupération du phosphore à partir des boues de vidange des étangs. Ainsi, les résultats ont été basés sur des estimations de production de poisson et un calcul de la masse de moulée avec un taux de conversion alimentaire de 1.1 (kg moulée/kg poisson).
- Au cours de l'étape 2 (campagne d'élevage de septembre 2007 à juin 2008), l'évaluation a été réalisée au sein des étangs bétonnés #1 et #2 et de l'étang en terre #3. Cette évaluation a consisté d'abord, à déterminer les caractéristiques des boues accumulées au fond de l'étang à une fréquence mensuelle (sauf en hiver entre janvier et mars 2008) et ensuite, à quantifier le contenu en phosphore des boues enlevées de la vidange annuelle pour établir le bilan en phosphore des étangs mesurés.

### 3.3 Caractérisation mensuelle des boues

La caractérisation mensuelle des boues a été réalisée dans les étangs #2 (bétonné) et #3 (en terre) durant l'étape 2, entre septembre 2007 et mai 2008, excepté pour la saison d'hiver entre janvier et mars 2008.



**Figure 3.1. Méthode de prélèvement des échantillons mensuels des boues des étangs.**

**A : subdivision et configuration des étangs; B : échantillonnage dans l'étang;**

**C : système de prélèvement.**

Les deux étangs ont été divisés en dix sections transversales (Figure 3.1). Pour chaque section transversale, un échantillon d'environ 10 L d'eau + boue a été pompé du fond de l'étang à l'aide d'une pompe péristaltique (Master Flex I/P model 77600-62, Cole Parmer). Chaque échantillon de 10 L a été composé de 5 échantillons de 2 L

prélevés le long de la section transversale à chaque mètre de distance. Les échantillons ont été prélevés à l'aide d'un bateau pneumatique (gonflable) et d'un système connecté à un tube de PVC rigide et flexible de 3/4 po, qui servait à aspirer les boues à l'aide d'une pompe péristaltique. Finalement, dix bidons différents de 10 L d'échantillon (environ 100 L d'eau + boue) ont été collectés par étang chaque mois.

L'aire d'échantillonnage par rapport à la surface d'eau a été minimale. Sachant que la capacité de succion du plongeur est d'environ 6 po de diamètre et que les surfaces d'eau sont de 135 et 229 m<sup>2</sup> pour l'étang #2 et #3 respectivement, les rapports de surface sont 0,7 et 0,4 % (< 1%) pour chaque étang, respectivement.

Pour chaque échantillonnage mensuel, les débits des étangs étudiés ont été mesurés à l'aide d'un sceau de 20 L, un chronomètre et des cylindres gradués pour mesurer les volumes d'eau. La moyenne de 5 mesures de débits a été retenue pour la détermination du débit de chaque étang.

### **3.4 Caractérisation annuelle des boues**

L'évaluation annuelle des boues a été faite lors du nettoyage des étangs à la fin de la campagne de production. Lors de cette activité, les boues contenant des quantités importantes de phosphore particulaires sont enlevées de chaque étang afin de déterminer leur masse en phosphore. Une méthodologie a été développée sur site comme suit :

- Descente du niveau d'eau jusqu'à l'interface eau - boues à l'aide d'une pompe;
- Enlèvement de boues par méthodes différentes décrites ci-après selon le type d'étang, soit en béton, soit en terre;
- Détermination du volume des boues enlevées par transfert de celles-ci dans un conteneur étanche de surface et de volume connus.

- Obtention d'un échantillon représentatif pour la détermination des caractéristiques de boues, notamment la concentration en phosphore.

L'évaluation a été réalisée dans les étangs #1 et #2 (bétonnés) et dans l'étang #3 (en terre).

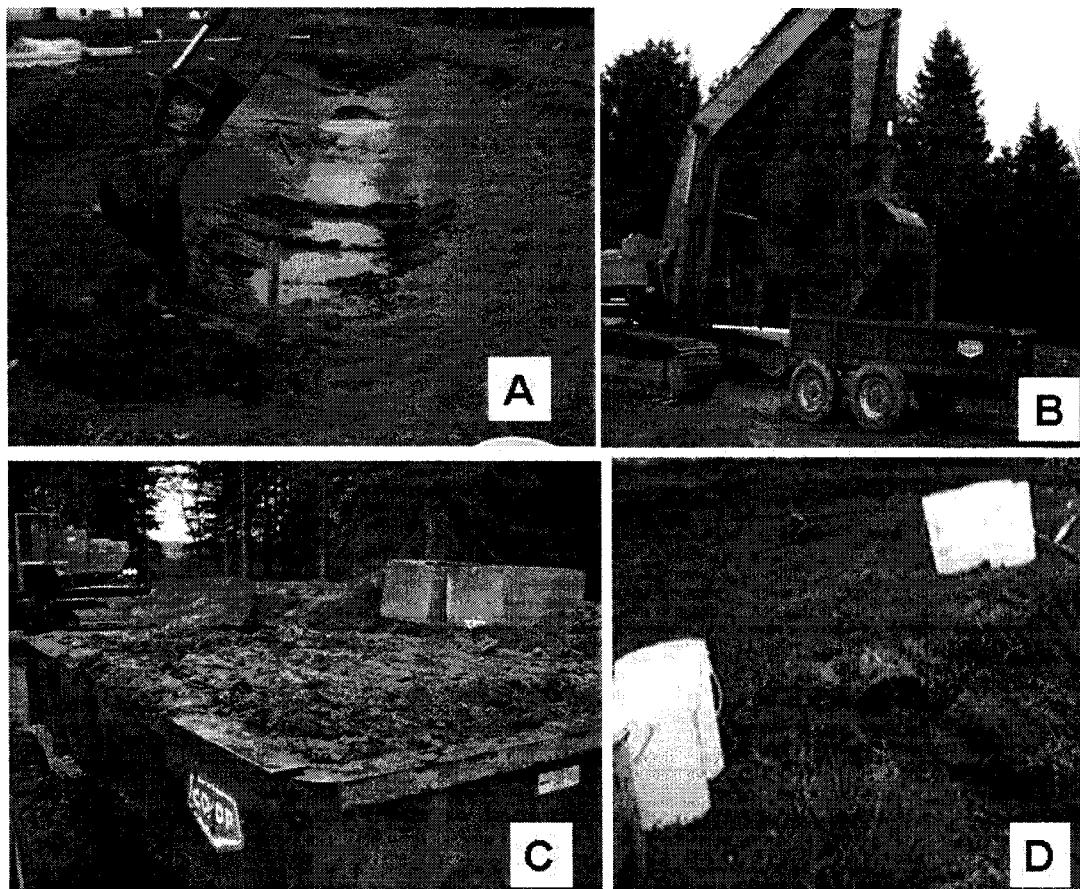
Dans les étangs bétonnés #1 et #2, le volume de boues a été récupéré à l'aide d'une pompe à boues. Avant le pompage des boues (quand l'eau a été enlevée), le nettoyage des berges et du fond a été exécuté à l'aide d'un balayeur. Le volume des boues collecté a été transféré dans un réservoir de dimensions connues (longueur = 1,15 m, largeur = 0,95 m, hauteur = 1 m) afin de déterminer le volume total prélevé. Pour chaque 100 L de boue pompée, 2 L de boue a été prélevée pour obtenir un total d'environ 50 L d'échantillon représentatif. Ensuite, après mélange, quatre bidons contenant environ 8 L d'échantillon de boue ont été retenus pour effectuer les analyses au laboratoire (Figure 3.2).



**Figure 3.2. Procédure d'échantillonnage des boues des vidanges annuelles des étangs à fond bétonné #1 et #2. A : nettoyage de parois; B : mesure du volume de boues; C : échantillonnage représentatif des boues.**

Dans l'étang en terre #3, la boue + sol a été enlevée par excavation à l'aide d'une pelle mécanique. Après avoir abaissé le niveau d'eau, il y a eu une période de séchage de 3 jours, puis la boue + sol a été prélevée. Le mélange sol + boue a été transféré dans un conteneur de volume connu (longueur = 3,02 m, largeur = 1,42 m, hauteur =

0,41 m). Afin d'obtenir un échantillon représentatif du mélange boue + sol collecté, divers échantillons ont été prélevés à l'aide d'une pelle manuelle pendant chaque pelletage le longue de l'étang. Finalement, neufs sceaux contenant environ 10 L de boue et de sol mélangés ont été retenus pour les analyses au laboratoire (Figure 3.3).



**Figure 3.3. Procédure d'échantillonnage des boues de la vidange annuelle de l'étang en terre #3.**  
**A : excavation par pelle mécanique; B : transfert du masse excavée dans un conteneur; C :**  
**mesure du volume de la masse excavée; D : échantillonnage représentatif des boues.**

Pour chaque évaluation, les boues ont été déchargées dans des zones agricoles des alentours.

## 3.5 Méthodologie de calcul pour les déterminations de P dans les composantes du bilan

Les composantes du bilan sont définies dans l'équation (4.11) pour ensuite calculer le phosphore rejeté à l'effluent de l'étang selon l'équation (4.12). Les composants du bilan dans un étang d'élevage sont :

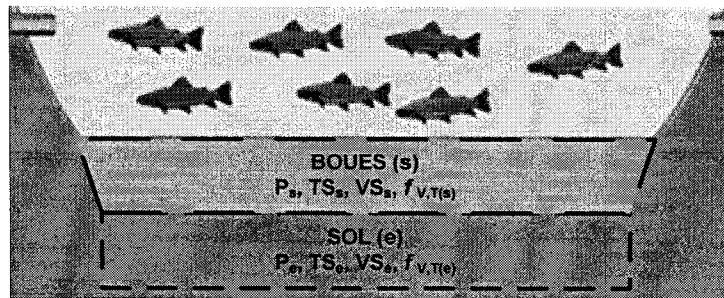
### 3.5.1 Teneur en phosphore de la moulée distribuée et du poisson

La teneur en phosphore de la moulée distribuée et de la production de poisson a été déterminée sur une base annuelle. Dans les deux étapes du projet, les déterminations ont été effectuées selon la procédure décrite dans la section 4.3.4.

### 3.5.2 Estimation de la fraction de P dans les boues de l'étang en terre #3

La vidange annuelle de boues de l'étang #3 a été réalisée par excavation à l'aide d'une pelle mécanique. Cette méthode ne permet pas la détermination directe du P dans les boues parce qu'une grande partie du sol situé au-dessous des boues est extrait avec la masse excavée. Pendant l'excavation de l'étang #3, il a été constaté par le pisciculteur que la profondeur excavée a été plus grande que celles des années précédentes. Ainsi, une quantité du P contenu dans le sol (probablement le P provenant des productions précédentes) a été prélevée avec le P de la boue. Par conséquent, un calcul mathématique a été appliqué afin d'estimer la fraction du P des boues à l'activité piscicole. Ce calcul est basé sur les fractions volatiles et la teneur en P de boues et de sol, mesurés avant et après la vidange annuelle, respectivement.

Le phosphore total contenu dans la masse excavée est la somme de la masse de P dans la boue (*s* : *sludge*) et de la masse de P dans le sol (*e* : *earth*) (Figure 3.1).



**Figure 3.4. Composition et caractéristiques de la masse excavée dans la vidange annuelle de l'étang #3.**

Les calculs ont été basés sur la dernière caractérisation annuelle des boues des étangs bétonnés #1 et #2 (mai et juin 2008, respectivement) ainsi que sur la caractérisation de la masse excavée (boues + sol) de la vidange annuelle et du sol au-dessous de l'étang #3 (le 22 avril 2008, jour de la vidange de l'étang #3). Les hypothèses et les équations de calcul sont présentées à la section 4.3.4:

La masse de P contenu dans la boue de l'étang #3 a été estimée à partir des données du Tableau 3.1 et des équations (4.9) et (4.10)

**Tableau 3.1. Caractéristiques des boues des étangs bétonnés, du sol et masse excavée (boues + sol) de l'étang #3 à la fin de la campagne de production 2007-2008**

Paramètre	Unités	Boues + sol (s + e)	Sol (e)	Boues (s)
Date d'échantillonnage	-	22-avr-08 (étang #3)	22-avr-08 (étang #3)	mai-juin 2008 (étangs bétonnés)
Matières totales (PTS)	kg	8671	-	-
Matières volatiles totales (PVS)	kg	246	-	-
Fraction volatile ( $f_{V,T}$ )	g VS /g TS	0.028	0.017	0,66
Masse totale de phosphore (Pp)	kg P	17,1	-	-
Fraction du phosphore dans les MT ( $f_{P,T}$ )	g P /g TS	0,00197	-	0.0214

MT : matières totales

Les caractéristiques du sol et de la boue ont été calculées, et sont indiqués au tableau 3.2.

**Tableau 3.2. Caractéristiques estimées de la boue et du sol de la vidange annuelle de l'étang #3**

Paramètre	Unités	Boues + sol (s+e)	Sol (e)	Boues (s)
Étang	-	(étang #3)	(étang #3)	(étang #3)
Matières totales (PTS)	kg	8671	818	153
Matières volatiles totales (PVS)	kg	246	145	101
Fraction volatile ( $f_{V,T}$ )	g VS /g TS	0,028	0,017	0,66
Masse totale de phosphore (Pp)	kg P	17,1	13,83	3,27
Fraction du phosphore dans les MT ( $f_{p,T}$ )	g P /g TS	0,00197	0,0016	0,0214

Les résultats du tableau 3.2 montrent que dans l'étang #3, la masse de P dans la boue (3,27 kg P) représente 19 % du phosphore total de la masse boue+sol excavée, le pourcentage restant 81 % est attribué au phosphore contenu dans le sol (Tableau 3.2). Ainsi, l'excavation a apporté une masse de phosphore de sol plus important que la boue et doit toujours être soustraite, pour avoir une approximation plus fiable du phosphore de la boue afin d'éviter un bilan de P négatif ou surévalué (en P dans la boue) pour les étangs excavés.

Par ailleurs, cette méthode estime de façon indirecte la masse de phosphore contenue dans la boue. Toutefois, il faut tenir compte que celle-ci n'est qu'un calcul qui dépend de plusieurs paramètres pouvant induire des erreurs significativement élevées, si les méthodologies de caractérisation des éléments ne sont pas correctes. En conclusion, le bilan annuel de P dans les étangs en terre excavés est difficile à calculer et à boucler et doit être réalisé de façon rigoureuse.

### 3.5.3 Bilan annuel de P dans les étangs d'élevage

Le bilan annuel de P dans les étangs d'élevage a été déterminé en suivant l'équation générale (4.11). Dans cette équation, il a été supposé que les charges de P provenant de l'affluent liquide ont été nulles dans le but de déterminer l'influence directe du P apporté par la moulée distribuée dans les étangs. Selon le travail de Sauvé *et al.* (2006) dans une pisciculture québécoise, le P de la moulée représente plus de 95% de

P d'entrée dans la pisciculture, le 5 % restant étant le P qui provient naturellement des sources d'eau utilisées dans la pisciculture. Les calculs sont présentés à la section 4.3.4

## 3.6 Méthodes analytiques

### 3.6.1 Échantillons de boues

Les échantillons de boues ont été caractérisés mensuellement et annuellement (vidange annuelle). Les échantillons ont été conservés à 4°C. Les analyses ont été fait entre 24 et 48 heures après l'échantillonnage. Préalable à la détermination des paramètres, les échantillons ont été préparés comme décrit ci-dessous :

Les échantillons de boues de la caractérisation mensuelle ont suivis la préparation suivante : 30 min de sédimentation, enlèvement du surnageant d'eau, mesure de volume de boue sédimenté et broyage de boue dans un mélangeur. Pour la détermination du P, des échantillons mensuels des étangs bétonnés; 1 ml de boue a été analysé, tandis que pour les échantillons mensuels de l'étang en terre entre 15 et 35 mg de boue sèche (à 105 °C) ont été analysés.

Les échantillons de boues de la vidange annuelle ont été préparés comme suit: homogénéisation et broyage dans un mélangeur. Pour la détermination du P, des échantillons des vidanges des étangs bétonnés, 1 ml de boue a été analysé, tandis que pour les échantillons excavés de l'étang en terre entre 15 et 35 mg de boue sèche (à 105 °C) ont été analysés.

Tous les paramètres ont été analysés en triplicata. La détermination du P a été réalisée suivant la méthode Quickchem #10-115-01-1-C de *Lachat Instruments* qui dérive de la méthode EPA 365.4 (USEPA, 1983). L'appareil utilisé est un analyseur de type FIA (*Flow Injection Analysis*) modèle QUICKCHEM AE de *Lachat Instruments*. Les

autres paramètres ont été déterminés suivant les méthodes décrite dans les *Standard Methods For the Examination of Water & Wastewater (APHA et al., 2005)* (Tableau 3.3).

**Tableau 3.3. Méthodes analytiques pour les échantillons de boues**

Paramètres	Méthode	Instrument	Référence
Phosphore (P)	<i>colorimetric, automated, block digester, automatic analyser method</i>	Colorimètre Lachat instruments	EPA method 365.4
Matières totales (MT)	Séché à 105°C / gravimétrique	Étuve (105°C) Fischer Scientific	APHA 2540-B
Siccité (Sic)			APHA 2540-G
Matières volatiles totales (MVT)	Calcination à 550°C / gravimétrique	Four à moufle (550 °C) Fischer Scientific	APHA 2540-E
Densité relative (Ge)	volumétrique / gravimétrique	Balance de précision	APHA 2710-F

Pour l'analyse de phosphore , l'échantillon a été rincé avec un petit volume d'eau Mili-Q et acidifié avec 5mL de solution acide (700 mL d'eau, 200 ml H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentré, 133 g sulfate de potassium et 25 mL de sulfate mercurique préparé). Ensuite, l'eau de l'échantillon a été évaporée (160 °C, 1,5 h) et le restant digéré (380 °C, 2,5 h).

### 3.6.2 Pourcentage de phosphore dans la moulée et dans le poisson

Le pourcentage de phosphore dans la moulée et dans le poisson a été mesuré par des analyses au laboratoire des échantillons obtenus à la pisciculture.

Les échantillons ont préalablement été préparés par: homogénéisation, séchage et pesage d'une masse connue tel que décrite au Tableau 3.4. Ensuite, le phosphore a été

analysé suivant la méthode Quickchem #10-115-01-1-C de *Lachat Instruments* qui dérivée de la méthode EPA 365.4 (USEPA, 1983).

**Tableau 3.4. Prétraitement des échantillons de moulée et de poisson pour l'analyse de phosphore**

Paramètre	Prétraitement
<b>POISSON</b> (trois tailles différentes de truite arc-en-ciel): longueur 9.8" , 11.0" , 12.6"	* Broyé dans un mélangeur * Séché dans une étuve à 105°C * Des échantillons secs entre 15-35 mg ont été utilisés pour l'analyse en triplicata * La digestion, préalable à la détermination de P, a été réalisée de manière semblable aux échantillons de boues
<b>MOULÉE</b> Type optimum # 4 (COREY FEED LTD.): Trois échantillons différents de lots utilisés pendant l'année	* Moulue avec un mortier * Séchée dans une étuve à 105°C * Des échantillons secs entre 15-35 mg ont été utilisés pour l'analyse en triplicata * La digestion, préalable à la détermination de P, a été réalisée de manière semblable aux échantillons de boues

### 3.6.3 Analyses complémentaires de la moulée et du poisson

Les analyses complémentaires de la moulée et du poisson ont été réalisées au laboratoire suivant les procédures établies par le *Standards Methods* de l'APHA (APHA *et al.*, 2005).

Les paramètres additionnels mesurés ont été : les matières totales sèches (MTS), les matières volatiles totales (MVT) et la siccité (Sic). Les valeurs obtenues sont comme suit :

Moulée optimum #4: MTS =  $920 \pm 6,2$  mg/g (n = 5); MVT =  $827 \pm 21$  mg/g (n = 5) et Sic =  $92 \pm 0,6$  % (n = 5)

Poisson : MTS =  $293 \pm 12$  mg/g (n = 6); MVT =  $265 \pm 13$  mg/g (n = 6) et Sic =  $29 \pm 1,2$  % (n = 6)

En outre, les taux de conversion alimentaire (FCR) ont été déterminés à partir des registres de moulée et de production menés lors de l'étape 2, selon la formule  $FCR=PF/PB$  (dérivée de l'équation 4.2). Les FCR déterminés ont été 0,97 et 1,22 g moulée /g de poisson produit dans les étangs #2 et #3, respectivement.

### 3.6.4 Échantillons du flux liquide

Les échantillons du flux liquide, principalement l'entrée et la sortie de l'étang #1 et la sortie de l'étang #3, ont été analysés selon les paramètres et les méthodes présentés au tableau 3.5.

**Tableau 3.5 Méthodes analytiques pour les échantillons de flux liquide (APHA *et al.*, 2005)**

Paramètres	Méthode	Instrument	Référence
pH	Électrochimique		APHA 4500-H <sup>+</sup> B
Conductivité (Cond)	Électrochimique	Sonde multiparamétrique Water checker U-10 de HORIBA (pH, cond, OD, T°,)	APHA 2510-B
Oxygène dissous (OD)	Électrométrique		APHA 4500-O G
Température (T°)	Thermométrique		APHA 2550-B
Alcalinité	Titrimétrique	-	APHA 2320-B
Dureté totale			
Dureté calcique	Titrimétrique	-	APHA 2340-C
Dureté magnésienne			

## CHAPITRE 4

### MANAGEMENT STRATEGIES IN TROUT PONDS TO MINIMIZE PHOSPHORUS DISCHARGE

Ce chapitre présente les principaux résultats qui ont été obtenus lors de ce projet. Il a fait l'objet d'un article soumis à la revue *Aquaculture* et il est retranscrit tel que soumis en anglais. Une introduction définit le contexte scientifique qui entoure le projet et présente la problématique abordée. Une section matériel et méthodes présente le protocole expérimental qui a été mis en place, puis la section résultats présente les données les plus pertinentes obtenues, pour expliquer les facteurs influençant la rétention de phosphore et sa distribution dans les boues ainsi que les bilans de P des étangs d'élevage étudiés. Ensuite, la section discussion établit la pertinence des résultats en les comparant avec l'information existante et les observations sur site. Finalement, la section conclusion fait ressortir les principaux constats et recommandations de notre étude.

Carlos Sanchez-Barrios<sup>a,1</sup>, Florent Chazarenc<sup>b</sup>, Jaume Puigagut<sup>a,c</sup>, Yves Comeau<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Department of Civil, Geological and Mining Engineering, Ecole Polytechnique of Montreal. 2500, chemin de Polytechnique, Montréal, (Québec) Canada H3T 1J4*

<sup>b</sup> *École des Mines de Nantes. 4, rue Alfred Kastler, La Chantrerie, B.P. 20722, F-44307 Nantes Cedex 3, France*

<sup>c</sup> *Institut de recherche en biologie végétale, Université de Montréal, 4101 Sherbrooke Est, Montréal (Québec), Canada H1X 2B2*

#### 4.1 Abstract

To establish management and operational strategies to minimize phosphorus (P) discharges in aquaculture ponds, three ponds from a trout-farm facility located in south-eastern Quebec were monitored for two consecutive production seasons. Two of the surveyed ponds are lined with concrete whereas one is lined with earth (clay). Parameters analysed on selected ponds were: hydraulic retention time (HRT), surface overflow rate (SOR), phosphorus mass distribution and quantity, supplied feed and fish production.

The results of an annual P balance show that between 40 to 57 % of feed phosphorus supplied to shotcrete ponds was lost to the effluent, whereas this value was 42% for the earthen pond. The phosphorus content of sludge in earthen ponds was higher when compared to shotcrete ponds (19% as compared to between 5 to 8%, respectively). The higher capacity of earthen ponds to retain phosphorus was attributed to the higher hydraulic retention time (HRT), the lower surface overflow rate (SOR), the lower fish density and P sorption phenomena as well as the probability of taking P accumulated from previous operation years in the soil. Results

---

<sup>1</sup> Corresponding author: Tel.: +1(514) 340-4711 #3728; fax: +1(514) 340-5918; email address: carlos.sanchez@polymtl.ca

also showed that all along the production season, sludge accumulates mainly under the aerator in all studied ponds, between 63 to 90% and between 19 to 85% of the total P in sludge collected from shotcrete and earthen ponds, respectively.

These results highlighted the importance of carrying out deeper studies in operational parameters affecting P retention in pond sludge and the benefit of increasing sludge removal frequency to at least twice a year in ponds with low phosphorus retention, preferably, by means of settled particles trapping systems located under floating aerators.

**Keywords:** Phosphorus discharge; Trout farm; Aquaculture sludge; Operational parameters.

## 4.2 Introduction

Freshwater fish farming is an important food source worldwide (Banas *et al.*, 2008). More and more frequently, however, the release of pollutants from fish farms, mainly organic matter and nutrients, has been identified as a cause of the degradation of surface water quality. In Quebec, current legislation concerning phosphorus (P) discharge has led to a reduction of the provincial fish production during the last decade (Morin, 2007). In Quebec, small and medium size trout fish farms (annual production of less than 50 t of fish) represent around 83% of the total existing installations. These types of facilities are especially affected by the upcoming environmental constraints (most Quebec freshwater fish farms must limit their phosphorus discharge to 4.2 kg of P released per ton of fish produced by 2014), Since neither economical nor technical solutions are currently available to limit phosphorus release (Ouellet, 1999).

Uneaten fish feed and fish feces represent the main source of P in fish farms (Pillay, 1992; Cripps and Bergheim, 2000; Bergheim and Brinker, 2003). To avoid excess phosphorus discharge from uneaten feed, a solution is to produce low-phosphorus fish feed (1% w/w) which did not compromise fish growth (Sugiura *et al.*,

2006). Several studies have shown that between 60 and 80% of phosphorus excreted by fish is in particulate form (Foy et Rosell, 1991; Dosdat *et al.*, 1998; Ouellet, 1999). Therefore, particulate matter collection and removal have been proposed as a good solution to remove P from intensive land-based fish farms (Cripps and Bergheim, 2000; Summerfelt and Penne, 2005) and from flow-through aquaculture facilities (True *et al.*, 2004). However, the levels of P removal achieved by these practices are still not sufficient to meet the demands of the upcoming legislation in Quebec. According to Ouellet (1999), effluent phosphorus discharge is the only parameter that does not meet the water quality criteria required by the Ministry of Environment of Quebec (MDDEP) in the freshwater aquaculture industry. The application of best management tools to reduce aquaculture phosphorus discharge in Quebec is difficult, and the main reason is the lack of data on the fish farm phosphorus cycle and distribution (Ouellet, 1999; Sauvé *et al.*, 2006; Marcotte, 2008). Therefore, the characterization and quantification of fish wastes are key parameters to not only successfully apply best fish farm management strategies in Quebec, but also, as stated by Roque d'Orbcastel *et al.* (2008), to ensure the future of European water legislation, fish farm operations, waste monitoring, and treatment scenarios.

Knowledge of the impact of sludge removal and its frequency, as well as the importance of operational parameters could be used to minimize phosphorus discharge. It would be also valuable to analyse the distribution of phosphorus in production ponds to guide the installation of efficient phosphorus trapping systems.

The main objectives of this study were to determine the phosphorus mass balance in trout ponds, as well as, to study the dynamics of phosphorus associated with sludge to better implement strategies to minimize phosphorus discharge.

## 4.3 Materials and methods

### 4.3.1 Fish farm and studied ponds

The fish farm selected for this study is located in south-eastern Quebec and has nine trout ponds, a spawner pond and a sedimentation pond. The configuration of the facility is shown in Figure 4.1. For the purposes of this study, three ponds, numbered #1, # 2 and #3 were chosen. Ponds # 1 and #2 are lined with concrete (shotcrete) whereas ponds #3 and the spawner earth ponds are dug in clay. As usual practice at the facility the accumulated sludge in ponds is removed once a year at the end of the production season. Annual sludge removal in pond #3 is carried out by power shovel excavation whereas sludge from ponds # 2 and #3 is pumped to the sedimentation pond. During experiments, annual-produced-sludge from spawner pond was sent to pond 3 by the fish farmer. All ponds have a surface floating aerator (0.5 HP, 500 gpm, 3450 rpm) which projects water into the air to promote aeration and CO<sub>2</sub> degassing. In addition, three air diffusers are distributed at the bottom of shotcrete ponds in which the fish density is higher than in the earth pond. The main sources of water for the facility are, mainly, groundwater and, to a lesser extent, surface water. The study was planned in two phases: phase 1 (September 2006 - August 2007) and phase 2 (September 2007-June 2008). Ponds #1 and # 2 were monitored during both phases, but pond #3 was only surveyed during phase 2.

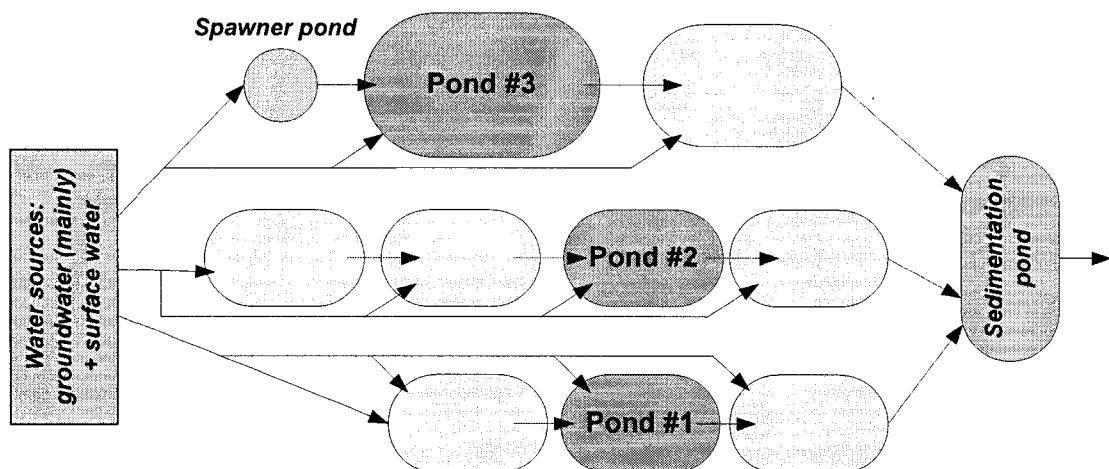


Figure 4.1. Fish farm configuration.

The main design and operational characteristics of the studied ponds were determined *in situ* and are shown in Table 4.1. Physico-chemical parameters of water in ponds # 1 and # 3 were measured monthly by grab samples during phase 2 and are also summarised in Table 4.1.

**Table 4.1. Main characteristics of studied ponds**

Pond characteristics	Parameters	PONDS			
		# 1		# 2	
		2006-2007	2007-2008	2006-2007	2007-2008
	Material	concrete		concrete	earth
	Water surface area (m <sup>2</sup> )	109		135	229
	Volume (m <sup>3</sup> )	115		148	246
	Average water depth (m)	1,40		1,45	1,40
	Up-stream ponds	1		2	1
Characteristics of fish production	Aeration system	1 vertical surface aerator + 3 bottom diffusers		1 vertical surface aerator + 3 bottom diffusers	1 vertical surface aerator
	Fish species	rainbow trout	rainbow trout	brook trout	rainbow trout
	Fish biomass production (t / yr)	2,7 (b)	1,8 (c)	3,2 (b)	2,0 (c)
	P concentration in fish (g P/kg fish)	4,20 (a)	4,88 (c)	4,20 (a)	4,88 (c)
	Feed conversion rate (FCR) (kg feed/kg fish)	1,10 (a)	0,97 (c)	1,10 (a)	0,97 (c)
	P content in feed (% total weight)	1,00	0,98 ± 0,2 (n= 3)	1,00	0,98 ± 0,2 (n= 3)
	Annual P mass in feed (kg P/yr)	29,2	17,2	35,5	19,3
Water pond characteristics	pH	-	7,6 ± 0,3 (n=10)	-	-
	Dissolved oxygen (mg/L)	-	13,0 ± 2,2 (n= 8)	-	-
	Water temperature (°C)	-	6,7 ± 1,7 (n=10)	-	10,7 ± 3,3 (n=19)
	Alkalinity (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	-	137 ± 7 (n=10)	-	173 ± 10 (n=17)
	Total hardness (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	-	154 ± 6 (n=10)	-	-
Operational parameters	Calcium hardness (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	-	125 ± 4 (n=10)	-	-
	Surface overflow rate (m/h)	0,15 (*)	0,10 to 0,23	-	0,11 to 0,22
	Hydraulic retention time (h)	6,9 (*)	4,5 to 10,7	-	4,9 to 10,1
P in fish wastes and in sludge removal	Fish density (kg fish/m <sup>3</sup> )	23,0	3,3 to 15,8	21,9	2,2 to 13,8
	Sludge removal	yearly		yearly	yearly
	Annual P not taken up by fish (kg P/yr)	18,1	8,4	22,0	9,4
	Annual P removed in sludge (kg P/yr)	1,4	1,4	2,7	1,2
	Annual P removed in sludge (%) [kg P / (kg feed P - kg fish P)]	8%	17%	12%	13%
	Annual P discharge via the pond effluent (kg P/yr)	16,7	6,9	19,3	8,1

(\*) Hydraulic retention time (HRT) and Surface overflow rate (SOR) were measured once in June 2007 for phase 1. Values of HRT and SOR of phase 2 were determined in a monthly frequency except in winter time (January to March 2008)

(a) Values obtained by Sauve *et al.* (2006)

(b), (c) Calculated values from fish farm yearly register

#### 4.3.2 Sludge sampling

Pond sludge was sampled by two different methods. The first one consisted of collecting the sludge from the annual removal from ponds in a container. The second method consisted of collecting sludge monthly from ponds #2 and #3 during phase 2 of the study. The first method was applied to calculate the annual P balance and to assess the efficiency of P removal in each pond. The second method was carried out to determine the longitudinal distribution and accumulation of the phosphorus in sludge, as well as to define the influence of operational parameters (HRT, SOR, fish density, etc) on the retention of P in sludge.

For monthly sludge sampling, both ponds (#2 and #3) were subdivided into ten cross-subsections. At each subsection ten liters of water-sludge were collected. The ten-liter sample consisted of collecting five two-liter samples at each subsection to increase the reliability of sludge distribution and quantity measurements. Samples were taken with the help of an inflatable boat using a peristaltic pump. Therefore, monthly sampling provided ten different containers of 10 L samples (approximately 100 L of water and sludge per pond) that were taken to the laboratory for physico-chemical analyses.

Annual removal of sludge accumulated in ponds at the end of the production season was carried out by pumping the water out of each pond until the sludge-water level was reached. The volume of pond sludge was determined by transferring the sludge to a known-volume container. Afterwards, the phosphorus concentration of a representative sludge sample was determined.

In shotcrete ponds, sludge volume was removed and measured by pumping the sludge into a 1 m<sup>3</sup> graduated reservoir (width = 0.95 m, length = 1.15 m, height = 1 m). At every one hundred liters of pumped sludge, two liters of sludge were sampled, this was repeated until about fifty liters of representative sludge sample was obtained

and placed in a barrel. Finally, the fifty-liter sample was mixed and 4 eight-liter bottles of sample were taken for analysis.

In earthen pond # 3, sludge was excavated with a power shovel. The volume of sludge-soil excavated was measured by transferring it into a container (width = 1.42 m, length = 3.02 m, height = 0.41 m). During excavation, a manual shovel was used to fill nine buckets of ten-liter representative sludge-soil samples that were brought to the laboratory for analysis.

#### **4.3.3 Sample preparation and analysis**

Every month, sludge samples (10 bottles of ten liters) from the earthen pond and the shotcrete pond containing high water content were prepared as follows: all ten liters were subjected to a settling process (30 min), after which the supernatant was removed and the sludge volume remaining was measured and ground to obtain a homogenous sample.

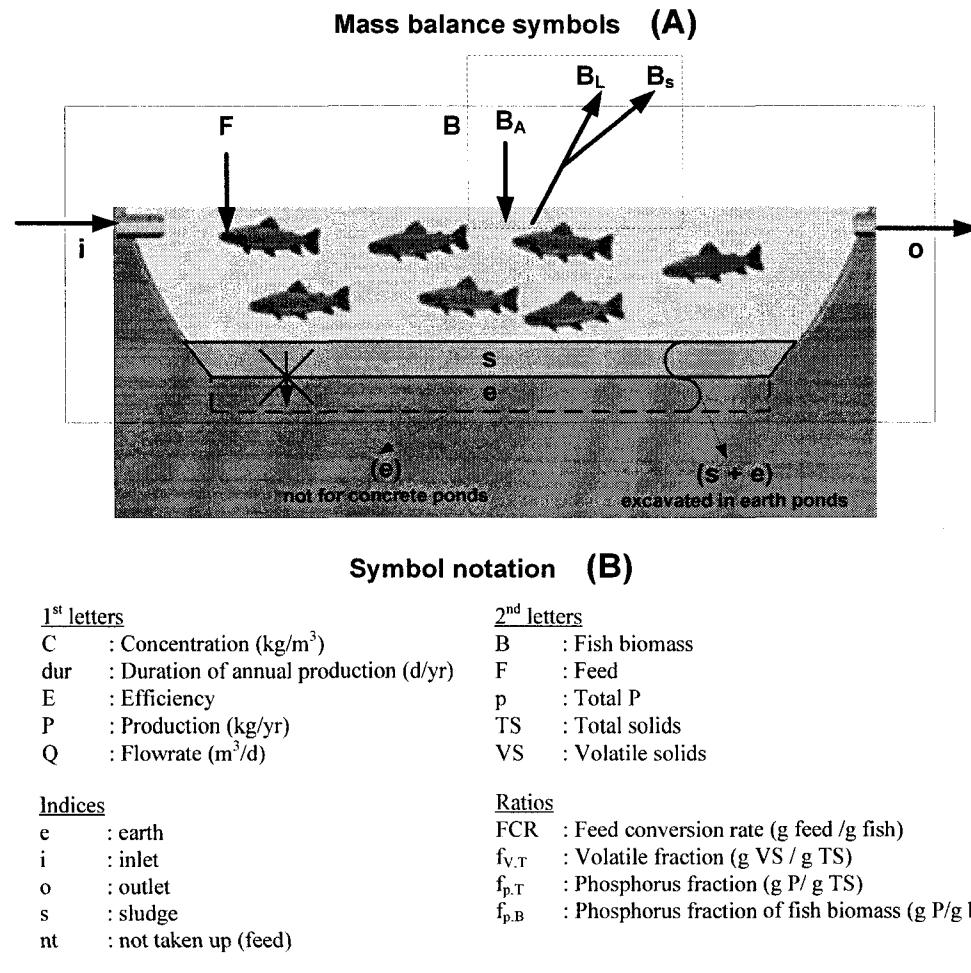
Every annual sludge-liquid sample removed from shotcrete ponds was prepared by taking approximately 750 mL for grinding (3 min) and approximately 250 mL were kept for analysis.

Every annual sludge-soil solid sample removed from earthen pond was homogenized manually and approximately 750 g of sample was kept for analysis.

Rainbow trout samples (whole fishes) and feed samples (between 100 and 250 g) were ground to obtain a homogeneous sample. After sample preparation, each analysis was carried out in triplicate. Between 15 and 35 mg of solid dried (105°C) samples (earthen pond sludge, feed and trout) and 1 mL of liquid sludge samples (shotcrete pond sludge) were used for analysis of total phosphorus (Pt) according to the Quickchem method #10-115-01-1-C from Lachat Instruments adapted from (USEPA, 1983). Approximately 5 mL of liquid samples and 7 g of solid samples were taken for total solids (TS) and total volatile solids (TVS) according to standard methods (APHA *et al.*, 2005).

#### 4.3.4 Calculations and assumptions

Calculations and assumptions were made to determine the annual P balance in the studied ponds. Symbols used are summarized in figure 4.2.



**Figure 4.2. A) Schematics of fish pond for mass balance. Note: B: fish biomass;  $B_A$ : biomass added to pond;  $B_L$ : biomass lost;  $B_s$ : biomass sold; e: earth; F: feed; i: inlet; o: outlet; s: sludge.**  
**B) Symbols used in calculations.**

One component of the mass balance is phosphorus input as waste which is the difference between the P contained in feed and the P in the fish biomass production. The other component is the P in the sludge which is difficult to calculate in excavated

earthen ponds. Thus, calculations of these two important elements as well as P balance to calculate P in the effluent were made as follows:

***Phosphorus input:*** phosphorus in feed and fish were measured on the basis of annual production. Determinations were carried out in the two different phases.

In phase 1, fish biomass production (PB) was estimated by the fish farmer according to equation (4.1), neglecting death and predation. Based on annual fish production, distributed feed (PF) was calculated assuming a feed conversion rate (FCR) of 1.1 g feed/g fish produced (Marcotte, 2008) in equation (4.2). P in feed ( $P_{pF}$ ) and P in fish ( $P_{pB}$ ) were calculated according to equations (4.13) and (4.15), respectively. Theoretical values for *P fraction* in fish ( $f_{p,B}$ ) was assumed to be 0.0042 g P/g fish (Sauvé *et al.*, 2006) and *P fraction* in feed ( $f_{p,F}$ ) was assumed to be 0,01 gP/g feed (supplier information).

$$PB = PB_s + PB_L - PB_i \quad (4.1)$$

$$PF = FCR * PB \quad (4.2)$$

where,  $PB$  = fish biomass production (kg/yr),  $PB_s$  = fish sold (kg/yr),  $PB_L$  = fish death and predation (kg/yr),  $PB_i$  = fish admitted to pond (kg/yr),  $PF$  = distributed feed (kg/yr),  $FCR$  = feed conversion rate (g feed/g fish biomass production).

In phase 2, distributed feed ( $PF$ ) and fish biomass production ( $PB$ ) were calculated from an annual register updated by the fish farmer every day. Biomass production was calculated based on equation (4.1) assuming that 10% (considered an appropriate value from an estimated range of 0 to 30% used by MAPAQ) of fish admitted died or were subject to predation and their average weight was 1/3 of gained weight (removed largest fish weight *minus* admitted smallest fish weight) (MAPAQ). Distributed feed ( $PF$ ) was calculated as the sum of daily distributed feed.

In the second phase,  $FCR$  was calculated from equation (4.2) ( $FCR = PF/PB$ ) the calculated value was 0.98 g feed/g fish biomass production in both ponds #1 and #2. In pond 3, the  $FCR$  was calculated to be 1.22 g feed/g fish produced.

*Sludge P fraction in earthen ponds:* The sludge excavation in the earthen ponds does not allow the direct measurement of the P fraction related to annual sludge production. This was mainly because some soil mass beneath the sludge was also sampled during excavation. To estimate the P fraction in sludge, the following calculations were made:

Total P mass in annual soil-sludge ( $Pp_{s+e}$ ) removed by excavation in earthen pond #3 is equal to the P mass in the “true” sludge ( $Pp_s$ ) plus the P mass in the soil (earth) ( $Pp_e$ ) as expressed in equation (4.3).

$$Pp_{s+e} = Pp_s + Pp_e \quad (4.3)$$

The sludge P mass in excavated pond sludge was calculated using the last monthly sludge characterization from concrete pond #2 (“true” sludge without soil) and the total excavated sludge-soil mixture characterization in annual removal (pond #3) as shown in the following equations:

$$PTS_{s+e} = PTS_s + PTS_e \quad (4.4)$$

$$PVS_{s+e} = PVS_s + PVS_e \quad (4.5)$$

where,  $PTS_{s+e}$  = total solids in the sludge-soil mixture (kg/yr),  $PTS_s$  = total solids in the sludge (kg/yr),  $PTS_e$  = total solids in the soil (kg/yr),  $PVS_{s+e}$  = volatile solids in the sludge-soil mixture (kg/yr),  $PVS_s$  = volatile solids in the sludge (kg/yr),  $PVS_e$  = volatile solids in the soil (kg/yr).

From equation (4.5)  $PVS_{s+e}$  can be expressed as a function of the volatile fraction of solids as follows:

$$f_{V,T(s)} = PVS_s / PTS_s \quad (4.6)$$

$$f_{V,T(e)} = PVS_e / PTS_e \quad (4.7)$$

$$PVS_{s+e} = f_{V,T(s)} * PTS_s + f_{V,T(e)} * PTS_e \quad (4.8)$$

where,  $PVS_{s+e}$  = volatile solids in the sludge-soil mixture (kg/yr),  $f_{V,T(s)}$  = volatile fraction of solids in the sludge (g VS/g TS),  $PVS_s$  = volatile solids in the sludge (kg/yr),  $PTS_s$  = total solids in the sludge

(kg/yr),  $f_{V,T(e)}$  = volatile fraction of solids in the soil (g VS/g TS),  $PVS_e$  = volatile solids in the soil (kg/yr),  $PTS_e$  = total solids in the soil (kg/yr).

Replacing  $PTS_e = PTS_{s+e} - PTS_s$  from equation (4.4) in equation (4.8) and reorganizing this equation,  $PTS_s$  is expressed as follows:

$$PTS_s = \frac{PVS_{s+e} - f_{V,T(e)} * PTS_{s+e}}{(f_{V,T(s)} - f_{V,T(e)})} \quad (4.9)$$

where,  $PTS_s$  = total solids in the sludge (kg/yr),  $PVS_{s+e}$  = volatile solids in the sludge-soil mixture (kg/yr),  $f_{V,T(e)}$  = volatile fraction of solids in the soil (g VS/g TS),  $PTS_{s+e}$  = total solids in the sludge-soil mixture (kg/yr),  $f_{V,T(s)}$  = volatile fraction of solids in the sludge (g VS/g TS).

Finally sludge P mass ( $Pp_s$ ) is calculated as follows:

$$Pp_s = f_{P,T(s)} * PTS_s \quad (4.10)$$

where,  $Pp_s$  = phosphorus in sludge (kg P/yr),  $f_{P,T(s)}$  = phosphorus fraction of solids in sludge (g P/g TS),  $PTS_s$  = total solids in the sludge (kg/yr).

P mass content in sludge of pond #3 was estimated from data obtained in situ: sludge-soil mixture (total solid mass ( $PTS_{s+e}$ ) = 8671 kg/yr; total volatile solid mass ( $PVS_{s+e}$ ) = 246 kg/yr; total phosphorus mass ( $Pp_{s+e}$ ) = 17.1 kg/yr); soil (volatile fraction ( $f_{V,T(e)}$ ) = 0.017 g VS/g TS); sludge (volatile fraction ( $f_{V,T(s)}$ ) = 0.66 g VS/g TS; phosphorus fraction of solids in sludge ( $f_{P,T(s)}$ ) = 0.0214 g P/g TS). Data was applied in equations (4.9) and (4.10), and the results are discussed in the section 4.4.3.

Annual P balances in ponds were determined based on the general equation (4.11) and assuming negligible inlet loading from upstream ponds. This enabled the determination of the direct influence of phosphorus provided by feed which represented more than 95% of the phosphorus load in production ponds (Sauvé *et al.*, 2006).

$$Pp_F + Pp_i = Pp_B + Pp_s + Pp_o \quad (4.11)$$

To calculate  $Pp_o$ , equation (4.11) can be expressed as follows:

$$Pp_o = (Pp_F + Pp_i) - (Pp_B + Pp_s) \quad (4.12)$$

where,  $Pp_F$  = P in feed (kg P/yr),  $Pp_i$  = P in pond influent (kg P/yr) (assumed to be zero),  $Pp_B$  = P in fish (kg P/yr),  $Pp_s$  = P in Sludge (kg P/yr),  $Pp_o$  = P released in the pond effluent (kg P/yr).

$$Pp_F = f_{p,F} * PF \quad (4.13)$$

$$Pp_i = Q * Cp_i * dur \quad (4.14)$$

$$Pp_B = f_{p,B} * PB \quad (4.15)$$

$$Pp_s = Q_s * Cp_s \text{ (for concrete ponds)} \quad (4.16)$$

or  $Pps$  according to eq. (4.10) (for earthen ponds)

where,  $Pp_F$  = P in distributed feed (kg P/yr),  $f_{p,F}$  = P fraction in feed (g P/g feed),  $PF$  = annual distributed feed (kg/yr);  $Ppi$  = P in pond influent (kg P/yr),  $Q$  = flow rate influent ( $m^3/d$ ),  $Cp_i$  = P concentration in the influent ( $kg/m^3$ ),  $dur$  = days of annual production (d/yr);  $Pp_B$  = P in fish (kg P/yr),  $f_{p,B}$  = P fraction in fish biomass (g P/g fish),  $PB$  = annual fish biomass production (kg/yr);  $Pp_s$  = P in Sludge (kg P/yr),  $Q_s$  = volume of annual removed sludge in concrete ponds ( $m^3$ ),  $Cp_s$  = P concentration in sludge in concrete ponds ( $kg P/m^3$ ).

P not taken up by fish: The MAPAQ defines P mass not taken up by fish as the difference between the P in distributed feed and the P digested by the fish biomass production (4.17). Thus, P mass retained in removed sludge can be expressed as a function of P not taken up by fish (4.18) as follows:

$$Pp_{nt} = Pp_F - Pp_B \quad (4.17)$$

$$f_{p,(s,nt)} = Pp_s / Pp_{nt} \quad (4.18)$$

$$E_{p/B} = (Pp_o - Pp_i) / PB \quad (4.19)$$

where,  $Pp_{nt}$  = P not taken up by fish in pond (kg P/yr),  $Pp_F$  = P in distributed feed (kg P/yr),  $Pp_B$  = P in fish production (kg P/yr),  $f_{p,(s,nt)}$  = P fraction not taken up by fish and found in removed sludge,  $Pp_s$  = P in sludge removal (kg P/yr),  $E_{p/B}$  = Efficiency of P retention in pond per mass of fish produced (kg P released /kg fish produced),  $Pp_i$  = P in pond influent (kg P/yr),  $Pp_o$  = P released in pond effluent (kg P/yr),  $PB$  = annual fish biomass production (kg/yr).

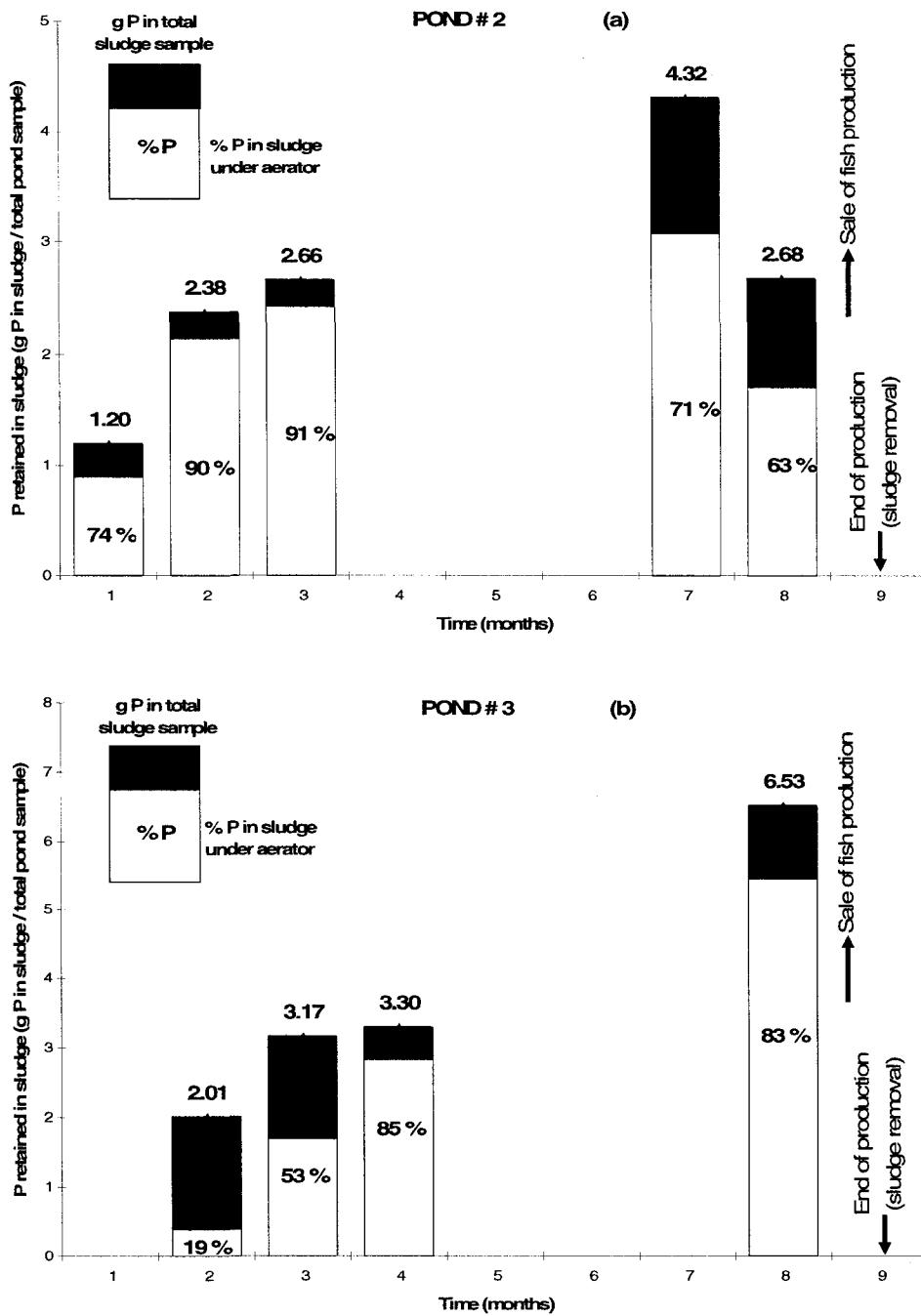
*Estimation of monthly P mass in sludge:* The total P mass retained in sludge was calculated assuming that the total mass of P in the sludge removed (in the 9<sup>th</sup> month, at the end of production season; Table 4.1) was similar to that during the 8<sup>th</sup> month when the last monthly characterization of sludge was carried out (phase 2, in ponds #2 and #3). Thus, by keeping the same proportion of monthly total P retained in sludge from Figure 4.3 it is possible to estimate the total P mass found in sludge every month. Phosphorus retained in sludge was estimated as the ratio of kg P retained in total pond sludge per kg of P not taken up by fish during phase 2 (accumulated kg of P in feed minus accumulated kg of P in fish biomass, both obtained from the fish farm records).

## 4.4 Results

### 4.4.1 Distribution of phosphorus in pond sludge

Observations by our research group and the fish farmer indicated that most of the sludge-soil in the ponds was accumulated under the surface aerator. During the annual sludge removal, the sludge-soil thickness under the aerator in the earth pond was 25 cm at the highest zone with a radius of influence of 1.0 m while in the shotcrete pond #1 the thickness was 15 cm at the highest point with a radius of influence of 0.5 m. Figure 4.3a and 4.3b show both the amount of sludge P collected during phase 2 sampling in ponds 2 and 3, respectively, and the P mass contained within the sludge collected under the line of the aerator in both ponds. As shown in Figure 4.3, the total amount of sludge P collected during the whole production season tended to increase (this is especially evident for pond 3 – Figure 4.3b). From Figure 4.3 it appears that the amount of phosphorus contained in the sludge collected under the line of the aerators represented a great extent of the total phosphorus collected. The phosphorus content of the sludge accumulated under the aerators represented between 63% to 91% and between 20% to 85% of the total phosphorus collected in

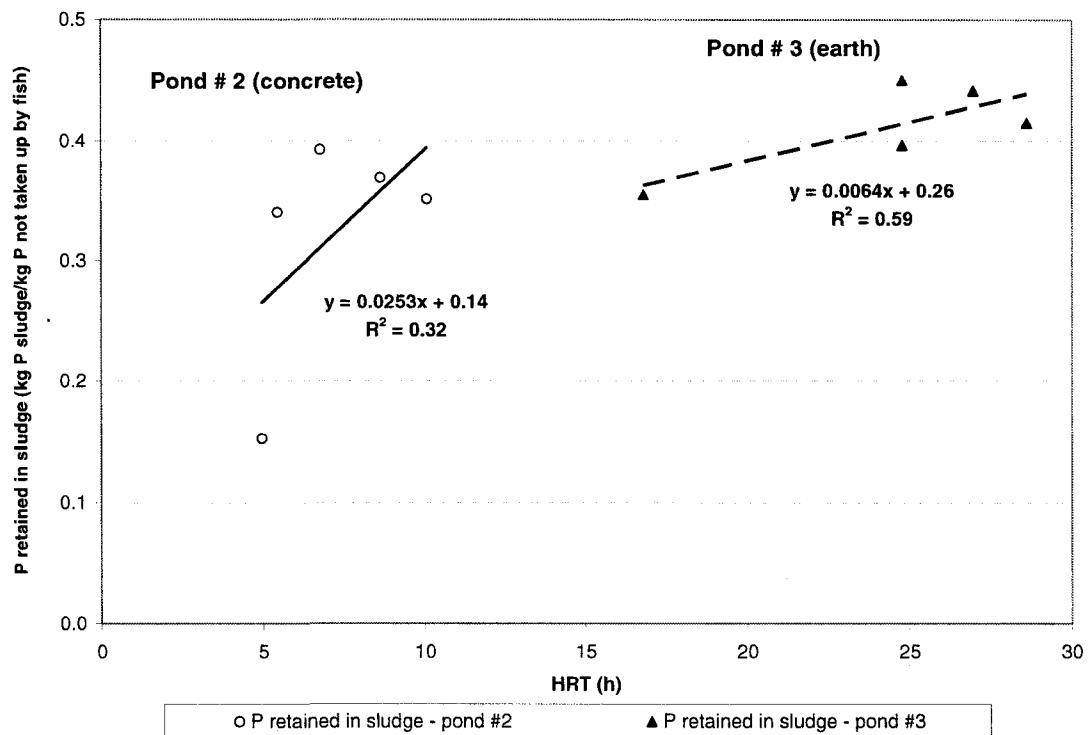
ponds 2 and 3, respectively. Furthermore, it was also noted that in pond 2 (shotcrete pond) the mass of phosphorus under the aerator was already quite significant at the beginning of the season and it increased until the 7<sup>th</sup> month after which, for some reason, some sludge was lost. In pond 3 (earthen pond), however, the mass of phosphorus under the aerator followed the same pattern as for total sludge P, increasing all along the production season. The phosphorus content in sludge was determined to be higher than 50% under the aerator from the third month until the end of the production season in pond #3 (see Figure 4.3b).



**Figure 4.3. Phosphorus accumulation trends in sludge at the bottom of ponds # 2 and # 3 based on monthly sludge characterization. Time 0 (when fish were added to ponds) corresponds to Sept. 8th, 2007 and Aug. 15th, 2007 for ponds # 2 (concrete bottom) and # 3 (earth bottom), respectively. End of production was on May 28th, 2008 and April 22nd, 2008 for ponds # 2 and # 3 respectively.**

#### 4.4.2 Influence of operational parameters on sludge phosphorus

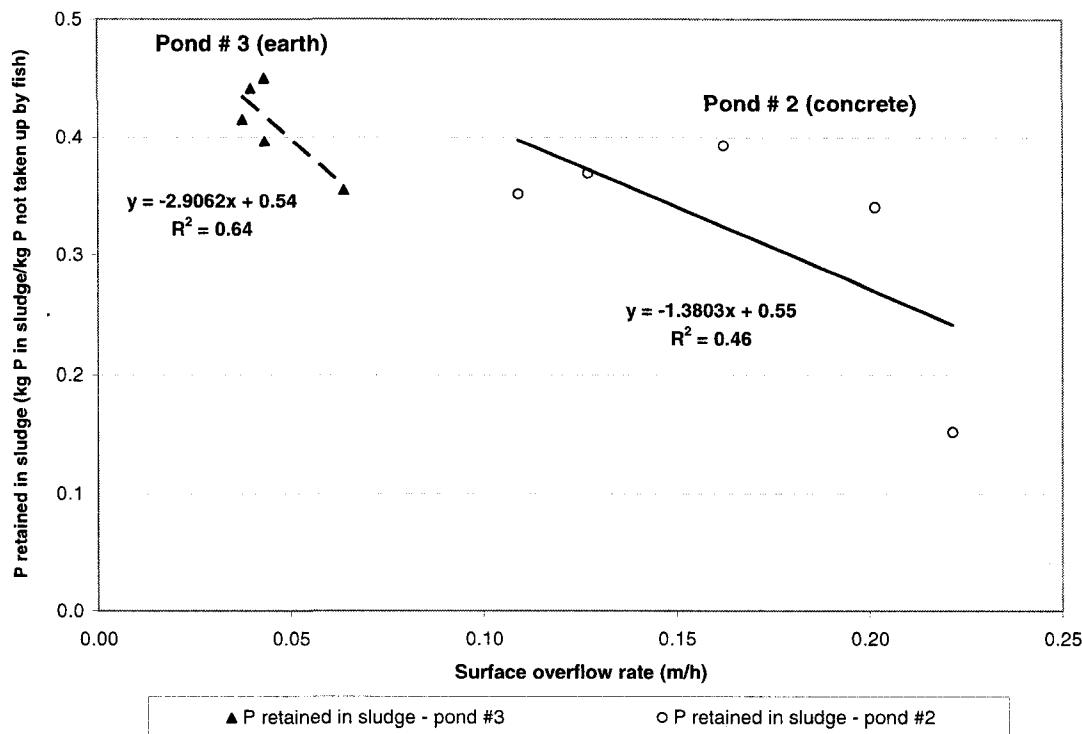
Hydraulic retention time (HRT) during phase 2 of the study ranged between 5 to 10 h and between 17 to 29 hours in ponds 2 and 3, respectively. The lower HRT in pond 2 was related to lower values of phosphorus retained in the sludge (between 0.15 and 0.40 kg P sludge/kg P not taken up by fish; Figure 4.4). Pond 3, operated at higher HRTs, however, presented higher values of P retained in the sludge, which ranged from 0.35 to 0.45 kg P sludge/kg P not taken up by fish.



**Figure 4.4. P retained in sludge in shotcrete pond #2 and in earthen pond # 3 as a function of hydraulic retention time (HRT) for the production year 2007-2008.**

Surface overflow rate (SOR), which is a parameter notably correlated with the HRT, presents an inverted pattern of that already described for the HRT (Figure 4.5). Specifically, SOR in pond 3 during the phase 2 ranged between 0.04 and 0.06 m/h, which were related to values of phosphorus in the sludge ranging between 0.35 and 0.45 kg P sludge/kg P not taken up by fish (Figure 4.5). In contrast, SOR values for

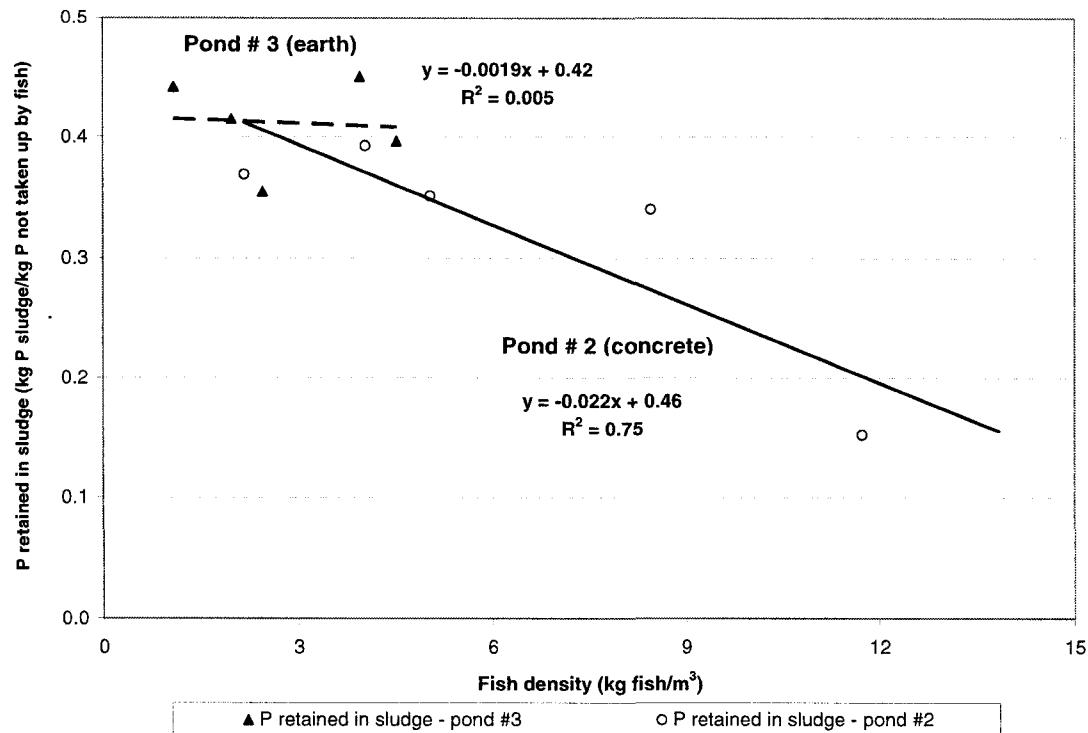
the pond 2 during the same phase were notably higher, ranging from 0.10 to 0.22 m/h. These higher SOR values recorded in pond 2 were, in turn, related to lower values of phosphorus retained in the sludge (between 0.15 and 0.40 kg P sludge/kg P not taken up by fish).



**Figure 4.5. P retained in sludge in shotcrete pond #2 and in earthen pond # 3 as a function of surface overflow rate (SOR) for the production year 2007-2008.**

Furthermore, fish density ( $f_d$ ) during the study phase was also different according to the type of pond under study. Specifically,  $f_d$  in pond 2 greatly varied from about 2 kg/m<sup>3</sup> to about 12 kg/m<sup>3</sup> (Figure 4.6). Fish density variation in pond 3 during the same study period was narrower, ranging from ca 1 kg/m<sup>3</sup> to ca 5 kg/m<sup>3</sup>. Furthermore, thanks to the greatest variation on  $f_d$  encountered in pond 2, it is possible to see that this parameter is somehow linked to the phosphorus content in the sludge (Figure 4.6). Specifically,  $f_d$  in pond 2 of around 3 kg/m<sup>3</sup> was related to values around 0.4 kg P sludge/kg P not taken up by fish, whereas higher values of  $f_d$  (up to 12 kg/m<sup>3</sup>) tended

to be related to a lower content of phosphorus in the sludge (less than 0.15 kg P sludge/kg P not taken up by fish).

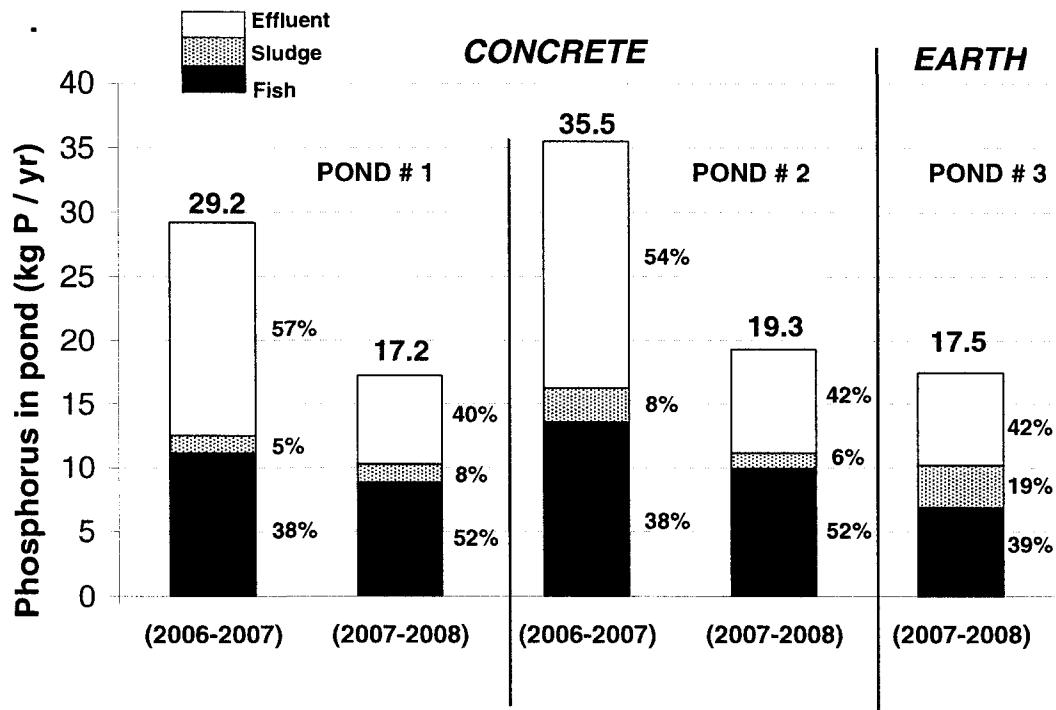


**Figure 4.6. P retained in sludge in shotcrete pond #2 and in earthen pond #3 as a function of fish density ( $f_d$ ) for the production year 2007-2008.**

#### 4.4.3 Annual P balance in ponds

Based on the periods 2006-2007 and 2007-2008, corresponding to phase 1 and phase 2 of the study, respectively, and considering that 100% of the total input phosphorus to the ponds comes from the supplied feed, the phosphorus mass balance in shotcrete pond # 1 shows that between 5 to 8% of P (representing 1.4 kg P/yr) are retained in sludge and between 40 to 57% of P (representing 6.9 to 16.7 kg P/yr) are discharged to the effluent (Figure 4.7). In shotcrete pond # 2, similar results were obtained. Specifically, for pond 2, considering the same conditions as the ones mentioned before, 6 to 8% of P (representing 1.2 to 2.7 kg P/yr) are associated to the sludge and

42 to 54% of P (representing 8.1 to 19.3 kg P/yr) are discharged to the effluent (Figure 4.7). Similar results encountered for both ponds in terms of phosphorus balance are probably due to very similar operational and design characteristics for both ponds during the study period (Table 4.1).



**Figure 4.7. Phosphorus mass balance in shotcrete ponds # 1, # 2, and earthen pond #3 as a function of phosphorus input from feed and collected phosphorus in annual sludge removal.**

The annual phosphorus balance (2007-2008) was also determined in earthen pond #3 (Figure 4.7) by estimating the phosphorus content of the sludge according to equations (4.9) and (4.10) (c.f. Material and methods). Based on this estimation, the P fraction contained in sludge from earthen ponds was calculated to be 3.27 kg P/yr (Table 4.1), which represented 19 % of the total P from feed (input). Furthermore, this value also represents 19 % of total P in the sludge-soil mixture, which indicates that the soil beneath the ponds contained a high level of P, probably due to P accumulation in soil from previous production seasons. Therefore, the phosphorus

fraction associated to soil was 13.8 kg P/yr, which represents 81 % of total P in the sludge-soil mixture. As shown in Figure 4.7, the phosphorus input (coming from feed) in pond 3 was estimated to be 17.5 kg/yr and the phosphorus contained in the fish biomass production and in the effluent was determined to be 39% and 42 %, respectively (Figure 4.7).

## 4.5 Discussion

### 4.5.1 Annual phosphorus balance in ponds

The average content of % P in feed (0.98 % of total weight) was similar to 1% P in feed mentioned by the supplier (Corey Feed Ltd.).

The P content obtained in the body of rainbow trout (0.49 % of total weight) was identical to that reported by Sugiura *et al.* (2006) in raceway rainbow trout but was higher than the 0.42 % of P measured by Sauvé *et al.* (2006) and the 0.40 % of P reported by Ouellet (1999) of the MAPAQ. This variation in P content of fishes can be attributed to several factors such as the nature of the phosphorus in the feed (Dosdat, 1992; Vandenberg, 2001) the temperature, the P content in feed and the feed conversion rate (FCR; Azevedo *et al.*, 1998). Therefore, it is advisable to regularly determine the phosphorus content of fish to minimize errors on the calculation of the P mass balance.

In shotcrete ponds, the FCR was 1 g feed/g fish and the P content in feed was 1% (g P/g total weight) giving a P retention in rainbow trout of 49% (digestibility, which is the sum of the P retained and the P digested but not retained, should be more than 49%). A typical digestibility for rainbow trout is in the range of 38 to 55% (Azevedo *et al.*, 1998), a value that is also in agreement with those reported by Dosdat *et al.* (1998) who found a maximum phosphorus retention coefficient of 50 % in rainbow trout in comparison with a lower value of 45 % found in brown trout, both species reared in fresh water

The annual P balances in all ponds (Figure 4.7) reveal that the retention of P in fish ranged from 38 to 52 % of the P added from feed by considering a 1% P content in fish (g P/g fish) and a FCR of 1.0 to 1.2 g feed/g fish. These results concur with that found by Sugiura *et al.* (2006) in rainbow trout raised in raceway systems who obtained 54% and 43% of dietary P retention in fish from low-P feed (1.0%) and regular-P feed (1.4%), respectively. Similar results were also determined by Sauvé *et al.* (2006) in a salmon pond fish farm in Quebec who reported that 40 % of P input (95% feed and 5% influent) was retained in fish.

The annual P balances in ponds also shows that values of kg P not taken up by fish ( $P_{Pn}$ = fecal and uneaten) per ton of fish produced (PB) (calculated from Table 4.1, as  $P_{Pn}/PB$ ) were between 4.6 and 6.8 in both shotcrete ponds #1 and #2 and 7.2 for earthen pond #3 in phase 2. These values are similar to those found by Boucher and Vandenberg (2005), who experimented with new and traditional Canadian feeds to determine that between 4.9 and 6.5 kg P were not taken up by fish per ton of fish produced. Similar values were also estimated by Sugiura *et al.* (2006) in trout raceway systems: 4.25 kg P excreted/t fish produced (low-P feed) and 6.7 kg P excreted/t fish produced (regular-P feed). Results are also lower than 8.7 kg P wasted/t fish produced found in a French trout farm by a nutritional method (Roque d'Orbcastel *et al.*, 2008).

The use of earthen ponds resulted in higher values of P not taken up by fish (7.2 kg P not taken up by fish /t fish produced) than shotcrete ponds (between 4.6 and 6.8 kg P not taken up by fish /t fish produced). This result, which indicates that more wasted P (uneaten feed and feces), was produced in the earthen pond, could be explained by two hypotheses: the first one, is that a part of the feed supplied to the earthen pond is not consumed by fishes because it settled with suspended soil particles (Boyd, 1998). This hypothesis is supported by the fact that fishes in the earthen pond required a higher FCR (1.22 g feed/g fish) than fishes in the shotcrete ponds (FCR of 1.0 g feed/g fish; Table 4.1). Another possible explanation is that

fishes are under greater stress in earthen than in shotcrete ponds because of suspended solids. The higher total suspended solids (TSS) concentration in the earthen pond was measured to be 63 to 200 versus 0.7 to 6.7 mg TSS/L in shotcrete ponds. Several authors (Burrows, 1964; Robbe, 1975; Braaten *et al.*, 1986) have reported that high TSS concentration may lead to fish gill disease.

The annual phosphorus removal efficiency in pond sludge in terms of kg P removed in sludge / kg P not taken up by fish (Table 4.1) was between 8 to 17% and 12 to 13% in shotcrete ponds #1 and #2, respectively. In earthen pond #3, however, the annual phosphorus removal efficiency was estimated at 31% (kg P removed in sludge/kg P not taken up by fish). Marcotte (2008) reported that P removal efficiency in sludge from earthen ponds was between 21 and 35 % (kg P removed in sludge/ kg P not taken up by fish). These values are according to the P removal of 31% estimated for the studied earthen pond. The higher P removal efficiency in sludge from earthen ponds when compared to shotcrete ponds, was probably due to combinations of higher HRT, lower surface overflow rate (SOR), lower fish density (Marcotte, 2008) as well as stronger P sorption by the soil (clay) (Hasnaoui *et al.*, 2001; Kassila *et al.*, 2001). Additionally, the higher mass of P in the earthen pond is likely to be attributed to P accumulated in soil from previous years of operation.

#### **4.5.2 Distribution of phosphorus in pond sludge**

In both studied ponds the phosphorus mass retained in the sludge was accumulated mainly under the floating aerator as shown in Figure 4.3a and b. Between 63 to 91% (pond #2) and between 19 to 83% (pond # 3) of total sludge P in the pond was accumulated under this during the production season in the phase 2. This high accumulation of sludge under the aerator can be explained by its role as vertical pump aerators (Boyd, 1998). The most commonly used aerator motor used in Quebec fish farms is the floating type for which the impeller projects water into the

air. Current lines and tangent velocity fields result in high velocities that scour settled particles and bring them under the aerator where they settle and accumulate (Metcalf & Eddy *et al.*, 2003). Particle resuspension occurs due to currents resulting from fish activity (Masaló *et al.*, 2008) or paddlewheel aerators as used in shrimp and catfish ponds to the point that the pond bottom could be free of sludge (Delgado *et al.*, 2003; Steeby *et al.*, 2004).

#### **4.5.3 Influence of operational parameters on sludge retention**

From the sludge accumulation data obtained, it can be estimated that if the total sludge mass had been removed monthly, the P removal efficiency in earthen pond #3 would have been between 35 to 45 % (kg P in sludge /kg P not taken up by fish) for a SOR between 0.04 and 0.06 m/h, an HRT between 17 and 28 h, and a fish density between 1.1 and 4.5 kg fish/m<sup>3</sup> (see section 4.4.2).

In the concrete pond #2, P removal efficiencies, a complete sludge removal would have resulted in a P removal efficiency of 13 to 40 % (kg P in sludge / kg P not taken up by fish) for a SOR between 0.11 and 0.22 m/h, a HRT between 5 and 10 h, and a fish density between 2.2 and 13.8 kg fish/m<sup>3</sup> (Figure 4.4, Figure 4.5, Figure 4.6).

Annual P removal efficiency in some Quebec earthen ponds ranged from 23 to 35 % (kg P in sludge/ kg P not taken up by fish) with SORs between 0.14 and 0.28 m/h, HRTs between 7 and 23 h, and fish densities between 2.2 and 14.6 kg fish/m<sup>3</sup> (Marcotte, 2008). These results are similar to those obtained in pond #2.

At the end of the fish production period, the P mass under the surface aerator in earthen pond #3 was much larger than that found in concrete pond # 2 (Figure 4.3a and 4.3b). This phenomenon may be explained by a higher hydraulic retention time (HRT), a lower surface overflow rate (SOR) and a lower fish density found in the earthen pond. In addition, earthen ponds have stronger physical, chemical and

biological mechanisms of phosphorus retention (Ouellet, 1999; Kassila *et al.*, 2001; Hasnaoui *et al.*, 2001; Jiménez-Montealegre *et al.*, 2002; Yuvanatemiya and Boyd, 2006). These authors reported an accumulation of organic matter and nutrients in the upper layers of soils at the bottom of ponds. Under aerobic conditions, phosphate can be adsorbed onto hydroxides or precipitate with Fe, Mn and Al present in soil.

The pH of the pond #3 effluent was 7.1 and the concentration of Fe, Al and Mn in the top sludge surface layer were 4.1, 3.2 and 0.10 g metal/kg total dry weight, respectively. With a pH between 5 and 7, precipitation of  $\text{FePO}_4$  (mainly) and  $\text{AlPO}_4$  can take place. At a pH above 7, calcium phosphate precipitation is expected and the adsorption of phosphorus by hydroxides of the above-mentioned metals is enhanced (Stumm and Morgan, 1981; Ouellet, 1999; Lospied, 2003; Bellier *et al.*, 2006). In shotcrete ponds, the pH was about 7.6 conditions favoring the formation of hydrated calcium phosphates precipitates.

#### 4.5.4 Removal frequency of sludge

In pond 2, after the seventh month of monitoring, the accumulated sludge mass in the pond decreased (Figure 4.3a), which can be explained by a change on the operational parameters (hydraulic retention times reduced to less than 5.5 h giving a surface overflow rate higher than 0.20 m/h; Table 4.2). The higher fish density and fish removal for transfer or sale could have been also causing some re-suspension of settled particles and loss of solids. Therefore, increasing the sludge removal frequency could significantly increase the P removal efficiency.

**Table 4.2. Monthly measurements of main operational parameters in ponds #2 and #3 during phase 2**

	Time (months)	HRT (h)	SOR (m/h)	Fish density (kg fish/m <sup>3</sup> )
<b>Pond # 2</b>	0	-	-	-
	1	8.6	0.13	2.2
	2	6.8	0.16	4.0
	3	10.1	0.11	5.0
	7	5.4	0.20	8.5
	8	4.9	0.22	11.7
	9	-	-	13.8
<b>Pond # 3</b>	0	-	-	-
	2	27.0	0.04	1.1
	3	28.6	0.04	2.0
	4	16.8	0.06	2.5
	8	24.8	0.04	4.0
	9	-	-	4.5

In pond #3, phosphorus retained in sludge at the pond bottom continuously increased (Figure 4.3b). In comparison with pond #2, the higher hydraulic retention times (HRT between 17 and 28 h), lower surface overflow rate (SOR between 0.04 and 0.06 m/h) and lower fish density (between 1.1 and 4.5 kg fish/m<sup>3</sup>) favored sludge and P retention in the pond. This behavior in pond # 3 indicates that, when operational parameters favor sludge retention, its removal once a year may be sufficient to minimize phosphorus loss to the effluent. In such cases, the need to implement cleaning and sludge collection and removal systems is reduced.

In pond #2, removing the sludge accumulated under the aerator at the end of the 7<sup>th</sup> month (1.4 kg P) and the sludge at the end of the production season (month 9; 1.1 kg P), as much as an additional 2.5 kg P could have been extracted from the pond, effectively doubling its P removal efficiency. Thus, cleaning a pond twice a year (every 6 to 7 months), during operation and at the end of the production season, is recommended to improve phosphorus removal. The sludge removed could be treated by extensive sludge treatment systems (artificial wetland and reactive filtration media

to trap phosphorus) as has been already proposed by other authors (Summerfelt *et al.*, 1999; Comeau and Brisson, 2000; Forget, 2001; Comeau *et al.*, 2001; 2006).

#### 4.6 Conclusions

In shotcrete ponds more than 63% of phosphorus in pond sludge was accumulated under the surface aerator. Installing sedimentation devices under the surface aerator could increase particulate phosphorus capture and removal in ponds.

In the annual sludge removal from shotcrete ponds, 8% to 17% of phosphorus not taken up by fish was recovered while 83 to 93% was discharged in the effluent. In the earthen pond, however, it was estimated as much as 31 % of phosphorus not taken up by fish was removed by the yearly sludge cleaning whereas phosphorus discharged in the effluent was 69 %.

Higher phosphorus removal efficiency from the sludge removal in ponds was related to a higher HRT, a lower SOR, a lower fish density and strong mechanisms of sorption of P in the sediment. Thus, in shotcrete ponds, P removal efficiency from the annual sludge removal was between 8 and 17% of P mass not taken up by fish when the HRT ranged from 4.5 to 11 h, the SOR from 0.10 to 0.23 m/h and the fish density from 2 to 15 kg/m<sup>3</sup>. In contrast, in earthen pond, the P removal efficiency from the annual sludge removal appeared to be higher with a value of 31% of P mass not taken up by fish when the HRT was 17 to 29 h, the SOR was 0.04 to 0.06 m/h and the fish density was 1.1 to 4.5 kg/m<sup>3</sup>, considering a possible accumulation of P in soil from previous years of operation. Therefore, in ponds with low P removal efficiency from annual sludge removal, the sludge removal frequency could be increased to twice a year (e.g. every 6 months) to increase the P removal efficiency.

## 4.7 Acknowledgements

We thank Serge Gilbert and Brigitte Martel for providing us access to their fish farm and their support during sampling campaigns. We also thank Daniel Gagnon from the Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec (MDDEP) for his advice and revision of this paper, Dominic Marcotte from the Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) for his advice and recommendations during our project. We also acknowledge Denis Bouchard for analytical assistance, Philippe Lefrançois, Majdala Mansour-Geoffrion, Marie-Laure De Boutray, Zakariae Anjab, Valerie Anne Brouillard and colleagues from École Polytechnique de Montréal for their assistance during sampling and helpful discussions. This study was financially supported by The Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC), Société de Recherche et de Développement en Aquaculture Continental (SORDAC), Réseau Aquaculture Québec (RAQ), Multiserv-Harsco and Arcelor- Mittal.

## 4.8 References

- APHA, AWWA, WEF, Eaton, A. D., Clesceri, L. S., Rice, E. W., Greenberg, A. E., and Franson, M. A. H. (2005). Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater: Centennial Edition (21 ed.). American Public Health Association (APHA), New York.
- Azevedo, P. A., Cho, C. Y., Leeson, S., and Bureau, D. P. (1998). Effects of feeding level and water temperature on growth, nutrient and energy utilization and waste outputs of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquat. Living Resour.*, 11(4), 227-238.
- Banas, D., Masson, G., Leglize, L., Usseglio-Polatera, P., and Boyd, C. E. (2008). Assessment of sediment concentration and nutrient loads in effluents drained

- from extensively managed fishponds in France. Environ. Pollut., 152(3), 679-685.
- Bellier, N., Chazarenc, F., and Comeau, Y. (2006). Phosphorus removal from wastewater by mineral apatite. Water Res., 40(15), 2965-2971.
- Bergheim, A., and Brinker, A. (2003). Effluent treatment for flow through systems and European Environmental Regulations. Aquacult. Eng., 27(1), 61-77.
- Boucher, É., and Vandenberg, G. (2005). Essais de moulée au Canada utilisation de diètes performantes afin de réduire les impacts environnementaux de l'industrie aquacole en eau douce. Société de recherche et de développement en aquaculture continental (SORDAC), Québec, Canada, 91 pp.
- Boyd, C. E. (1998). Mechanical aeration in pond aquaculture. Paper presented at the Second International Symposium on Aeration Technology, American Society of Mechanical Engineering, Washington, DC. USA, pp. 6.
- Braaten, B., Poppe, T., Jacobsen, P., and Maroni, K. (1986). Risk from self-pollution in aquaculture: evaluations and consequences. Paper presented at the Efficiency in Aquaculture Production: Disease and Control. Proceedings of the 3rd International Conference on Aquafarming 'Aquacoltura'86', Verona, Italy, Oct. 9-10, 1986, pp. 139 - 165.
- Burrows, R. E. (1964). Effects of accumulated excretory products on hatchery-reared Salmonids. Retrieved Nov. 10, 2008. from [http://training.fws.gov/library/Pubs9/tech\\_pubs\\_FTC.pdf](http://training.fws.gov/library/Pubs9/tech_pubs_FTC.pdf). U. S. Dept. of Interior , Bureau of Sport, Fisheries and Wildlife. Research Report 66.
- Comeau, Y., and Brisson, J. (2000). Utilisation de marais artificiels avec substrat calcaire pour l'épuration d'eaux de rejets de pisciculture : rapport final. Société de recherche et développement en aquaculture continentale (SORDAC) Inc., Montréal (Québec), Canada.

- Comeau, Y., Brisson, J., and Chazarenc, F. (2006). Traitement de boues piscicoles par marais artificiel et lit filtrant de déphosphatation Société de recherche et développement en aquaculture continentale (SORDAC) Inc., Montréal (Québec), Canada.
- Comeau, Y., Brisson, J., Reville, J. P., Forget, C., and Drizo, A. (2001). Phosphorus removal from trout farm effluents by constructed wetlands. *Water Sci. Technol.*, 44(11-12), 55-60.
- Cripps, S. J., and Bergheim, A. (2000). Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems. *Aquacult. Eng.*, 22(1), 33-56.
- Delgado, P. C., Avnimelech, Y., McNeil, R., Bratvold, D., Browdy, C. L., and Sandifer, P. (2003). Physical, chemical and biological characteristics of distinctive regions in paddlewheel aerated shrimp ponds. *Aquaculture*, 217(1-4), 235-248.
- Dosdat, A. (1992). L'excrétion chez le poissons téléostéens: II. Le phosphore. *La pisciculture française* (109), 18-29.
- Dosdat, A., Métailler, R., Desbruyères, E., and Huelvan, C. (1998). Comparison of brown trout (*Salmo trutta*) reared in fresh water and sea water to freshwater rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): II. Phosphorus balance. *Aquat. Living Resour.*, 11(1), 21-28.
- Forget, C. (2001). Élimination du phosphore dissous des effluents piscicoles a l'aide de matériaux granulaires réactifs. M.Sc.A. thesis, Ecole Polytechnique, Montreal (Quebec), Canada.
- Foy, R. H., and Rosell, R. (1991). Fractionation of phosphorus and nitrogen loadings from a Northern Ireland fish farm. *Aquaculture*, 96(1), 31-42.
- Hasnaoui, M., Kassila, J., Loudiki, M., Droussi, M., Balvay, G., and Barroin, G. (2001). Relargage du phosphore a l'interface eau-sediment dans des etangs de pisciculture de la station Deroua (Beni Mellal, Maroc) Title of translation:

- Phosphate release at the water-sediment interface in a fisheries pond of the Deroua fish farm (Beni Mellal, Morocco). Rev. Sci. Eau, 14(3), 307-322.
- Jiménez-Montealegre, R., Verdegem, M., Zamora, J. E., and Verreth, J. (2002). Organic matter sedimentation and resuspension in tilapia (*Oreochromis niloticus*) ponds during a production cycle. Aquacult. Eng., 26(1), 1-12.
- Kassila, J., Hasnaoui, M., Droussi, M., Loudiki, M., and Yahyaoui, A. (2001). Relation between phosphate and organic matter in fish-pond sediments of the Deroua fish farm (Beni-Mellal, Morocco): Implications for pond management. Hydrobiologia, 450, 57-70.
- Lospied, C. (2003). Évaluation des capacités et des conditions d'enlèvement du phosphore dissous par les scories d'aciéries. M.A.Sc. thesis, Ecole Polytechnique, Montreal (Quebec), Canada.
- Marcotte, D. (2008). Évaluation de la proportion du phosphore récupéré par l'enlèvement des boues des étangs d'élevage. Retrieved August 2008. from [http://www.mapaq.gouv.qc.ca/NR/rdonlyres/CD915015-7FBE-4502-95F3-AAE87137DD59/15277/dtt2008\\_1.pdf](http://www.mapaq.gouv.qc.ca/NR/rdonlyres/CD915015-7FBE-4502-95F3-AAE87137DD59/15277/dtt2008_1.pdf). Société de recherche et de développement en aquaculture continental (SORDAC) Inc.
- Masaló, I., Guadayol, Ò., Peters, F., and Oca, J. (2008). Analysis of sedimentation and resuspension processes of aquaculture biosolids using an oscillating grid. Aquacult. Eng., 38(2), 135-144.
- Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, G., Burton, F. L., and Stensel, H. D. (2003). Wastewater engineering : treatment and reuse (4<sup>th</sup> ed.). McGraw-Hill, New York.
- Morin, R. (2007). La production piscicole au Québec. Retrieved July 2003. from [http://www.mapaq.gouv.qc.ca/NR/rdonlyres/431C7688-A79A-4595-A16B-004354AC96A7/0/02prod\\_pisc.pdf](http://www.mapaq.gouv.qc.ca/NR/rdonlyres/431C7688-A79A-4595-A16B-004354AC96A7/0/02prod_pisc.pdf). Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ).

- Ouellet, G. (1999). Les rejets des stations piscicoles et leurs impacts environnementaux., from [http://www.mapaq.gouv.qc.ca/NR/rdonlyres/4088F847-77D9-448B-9DE2-9F1A5674C3B8/0/t99\\_05.pdf](http://www.mapaq.gouv.qc.ca/NR/rdonlyres/4088F847-77D9-448B-9DE2-9F1A5674C3B8/0/t99_05.pdf). Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), Direction générale des pêches et de l'aquaculture commerciales, Direction de l'innovation et des technologies, Station technologique piscicole des eaux douces.
- Pillay, T. V. R. (1992). Aquaculture and the Environment. Fishing News Book, Oxford.
- Robbe, D. (1975). Influence des matières minérales en suspension sur la qualité des eaux de surface. Report of Laboratoire des Ponts et Chaussées, Paris, 123 pp.
- Roque d'Orbcastel, E., Blancheton, J.-P., Boujard, T., Aubin, J., Moutounet, Y., Przybyla, C., and Belaud, A. (2008). Comparison of two methods for evaluating waste of a flow through trout farm. *Aquaculture*, 274(1), 72-79.
- Sauvé, S., Donisa, C., Roy, A. G., Courchesne, F., Boyer, C., Turmel, M.-C., and François, M. (2006). Caractérisation de la dynamique du phosphore dans une pisciculture de salmonidés en étangs (Rapport final: Société de recherche et de développement en aquaculture continentale [SORDAC]). Université de Montréal, Québec, 144 pp.
- Steeby, J. A., Hargreaves, J. A., Tucker, C. S., and Kingsbury, S. (2004). Accumulation, organic carbon and dry matter concentration of sediment in commercial channel catfish ponds. *Aquacult. Eng.*, 30(3-4), 115-126.
- Stumm, W., and Morgan, J. J. (1981). Aquatic Chemistry - An Introduction Emphasizing Chemical Equilibria in Natural Waters (2 ed.). John Wiley & Sons, Inc., 627-635, New York.

- Sugiura, S. H., Marchant, D. D., Kelsey, K., Wiggins, T., and Ferraris, R. P. (2006). Effluent profile of commercially used low-phosphorus fish feeds. *Environ. Pollut.*, 140(1), 95-101.
- Summerfelt, R. C., and Penne, C. R. (2005). Solids removal in a recirculating aquaculture system where the majority of flow bypasses the microscreen filter. *Aquacult. Eng.*, 33(3), 214-224.
- Summerfelt, S. T., Adler, P. R., Glenn, D. M., and Kretschmann, R. N. (1999). Aquaculture sludge removal and stabilization within created wetlands. *Aquacult. Eng.*, 19(2), 81-92.
- True, B., Johnson, W., and Chen, S. (2004). Reducing phosphorus discharge from flow-through aquaculture I: Facility and effluent characterization. *Aquacult. Eng.*, 32(1), 129-144.
- USEPA. (1983). Methods for chemical analysis of water and wastes. USEPA-600/4-79-020. Total phosphorous, Method 365.4. Retrieved Oct. 11, 2008. from [http://www.epa.gov/waterscience/methods/method/files/365\\_4.pdf](http://www.epa.gov/waterscience/methods/method/files/365_4.pdf). U.S. Environmental Protection Agency (U.S.EPA).
- Vandenberg, G. W. (2001). Encapsulation de phytase microbienne: L'influence sur la disponibilité de nutriments chez la truite arc-en-ciel. Ph.D. thesis, Laval University, Quebec.
- Yuvanatemiya, V., and Boyd, C. E. (2006). Physical and chemical changes in aquaculture pond bottom soil resulting from sediment removal. *Aquacult. Eng.*, 35(2), 199-205.

## CHAPITRE 5

### RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES

Les principaux résultats de l'étude ont été décrits et discutés au Chapitre 4, présenté sous forme d'article scientifique. Le présent chapitre contient des résultats complémentaires, utiles pour la compréhension et l'intégration des mécanismes de rétention du phosphore dans les étangs d'élevage.

#### 5.1 Concentration du volume des boues sous l'aérateur

La boue et son contenu de phosphore ont été accumulés principalement sous l'aire de l'aérateur de surface (Tableau 5.1). Le pourcentage de boues sous la ligne de l'aérateur a varié entre 47% et 80% et entre 17 et 73% du volume total de boue des étangs 2 et 3 respectivement. Ainsi, l'accumulation de boues sous la ligne de l'aérateur a été important et présente une tendance similaire à celle de l'accumulation du P sous la ligne de l'aérateur. Cependant, le pourcentage de P sous l'aérateur a été plus élevé que celui du volume de boue dans chaque étang indiquant que la capacité de rétention de P a été plus élevée où l'accumulation de boue a été plus importante.

Le volume de boue sous la ligne de l'aérateur de surface dans l'étang 3 semble être plus élevé que celui de l'étang 2 à la fin de la période de production. Ces résultats montreraient une efficacité de rétention de boue plus élevée dans l'étang 3 lorsque celle est comparée avec l'étang 2 durant la vidange annuelle (fin de production). Ainsi, cette efficacité a aussi présenté une relation directe avec un plus grand temps de rétention hydraulique, une plus petite charge superficielle et une plus petite densité de poissons maintenus dans l'étang 3. Par contre, le contenu minéral enlevé dans le boues indique que les argiles du sol de l'étang se sont mélangées avec la boue et cela pourrait surestimé la quantité de boue trouvée sous la ligne de l'aérateur.

**Tableau 5.1. Caractérisation mensuelle de boue et sa relation avec les paramètres opérationnels de l'étang**

Date	Temps (mois)	Échantillon total pompé	Volume de boue échantillonné (L boue / étang)	P total dans le volume échantillonné (g P dans la boue/étang)	Boue et P contenus dans 10L d'échantillon sous l'aérateur superficiel				Temps de rétention hydraulique (h)	Charge superficielle (m/h)	Densité de poissons (kg /m <sup>3</sup> )
					(L boue)	(% boue de la boue total dans l'étang)	(g P dans la boue)	(% P du P total de la boue de l'étang)			
<b>Étang # 2</b>											
2007-09-08	0										
		<b>Début de production</b>									
2007-10-12	1	100	0.98	1.2	0.46	47%	0.9	74%	8.6	0.13	2.2
2007-11-09	2	100	1.00	2.4	0.70	70%	2.1	90%	6.8	0.16	4.0
2007-12-01	3	100	1.62	2.7	1.30	80%	2.4	91%	10.1	0.11	5.0
2008-04-11	7	101	4.53	4.3	2.71	60%	3.1	71%	5.4	0.20	8.5
2008-05-09	8	98	2.38	2.7	1.33	56%	1.7	63%	4.9	0.22	11.7
2008-05-28	9								-	-	13.8
<b>Étang # 3</b>											
2007-08-15	0										
		<b>Début de production</b>									
2007-10-12	2	100	1.75	2.0	0.31	17%	0.4	19%	27.0	0.04	4.1
2007-11-09	3	100	2.16	3.2	1.02	47%	1.7	53%	28.6	0.04	2.0
2007-12-01	4	100	2.02	3.3	1.60	79%	2.8	85%	16.8	0.06	2.5
2008-04-11	8	113	3.83	6.5	2.80	73%	5.5	83%	24.8	0.04	4.0
2008-04-22	9								-	-	4.5
<b>Fin de production</b>											

## 5.2 Distribution du phosphore dans la boue des étangs

La distribution de phosphore dans la boue des étangs a été déterminée en fonction de la caractérisation mensuelle de la boue des étangs 2 et 3, dans l'étape 2 du projet. Les valeurs de la masse de phosphore estimée dans chaque sous-section échantillonnée de l'étang sont montrées dans la Figure 5.1. Pendant la période de production le phosphore s'accumulait principalement sous la ligne de l'aérateur de surface en comparaison aux autres sous-sections des étangs 2 et 3.

Par ailleurs, dans l'étang 2, l'aérateur a été éteint pendant la période hivernale (déc. 2007 à mars 2008), cette action a fait que la vitesse d'écoulement moyen de l'étang ainsi que celle générée par les diffuseurs de fond aient déplacé la boue (et son contenu de P) dans la ligne « 13 m », pendant l'échantillonnage de décembre 2007 (Figure 5.1). Lorsque l'aérateur a été mis en fonctionnement, dans le même étang, il a créé des champs de vitesse qui ont entraîné à nouveau la boue sous cet aérateur (avril 2008). De plus, le mouvement de l'aérateur vers la sous-section « 9 m » (en mai 2008) a également entraîné la boue sous cet aérateur (Figure 5.1, étang 2).

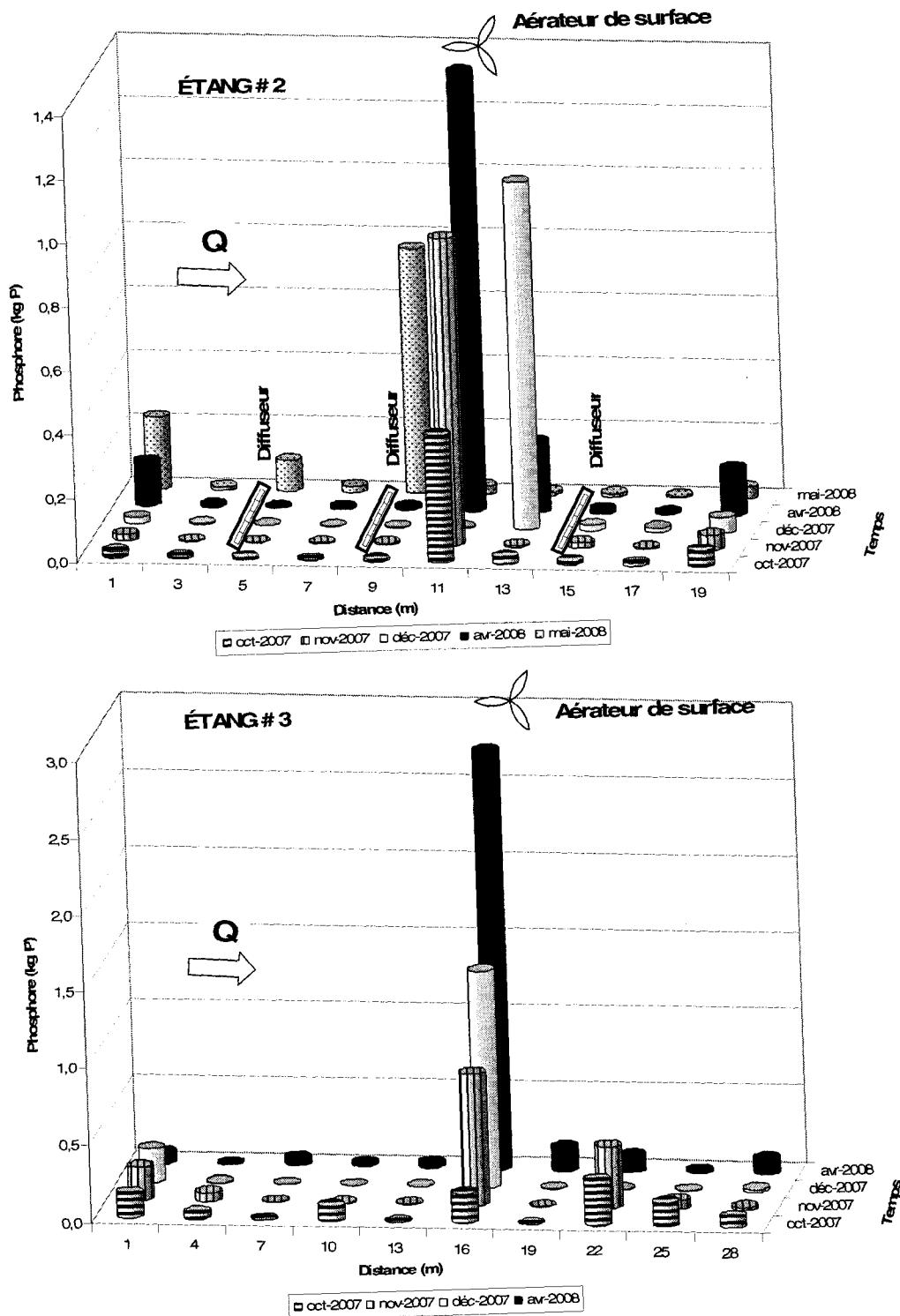
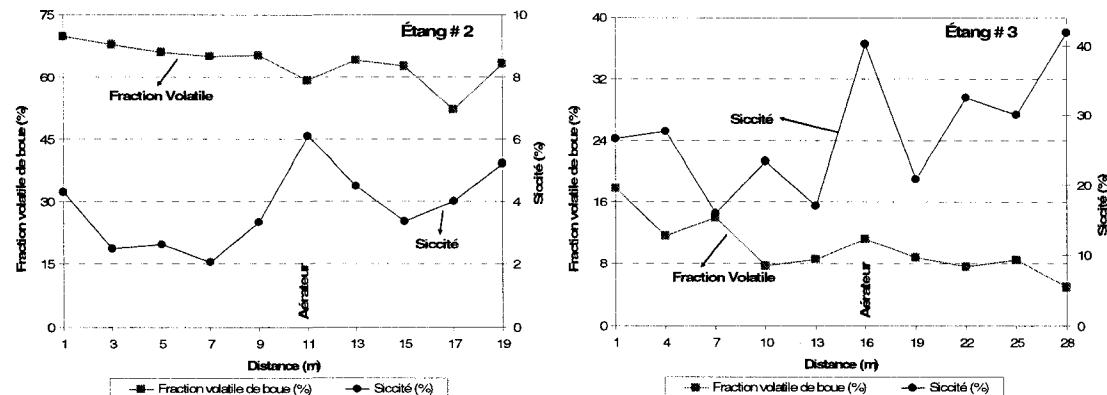


Figure 5.1. Distribution de P dans la boue des étangs 2 et 3 pendant octobre 2007 à mai 2008 et octobre 2007 et avril 2008, respectivement.

### 5.3 Caractéristiques complémentaires des boues

La siccité et la fraction volatile de boue ont été déterminées dans chaque sous-section des étangs #2 et # 3 pendant l'étape 2 du projet. La fraction volatile de boues a été en moyenne de 63% dans l'étang #2 et de 9% dans l'étang #3. La siccité de boue a montré des valeurs moyennes de 4% pour l'étang #2 et de 28% pour l'étang #3 (Figure 5.2)



**Figure 5.2. Valeurs moyennes de fraction volatile et siccité des boues dans chaque sous-section (10) des étangs #2 et #3.**

Dans les sections de l'étang en terre #3, la siccité a été plus élevée que dans la section de l'étang bétonné #2. Cela explique que la boue pompée de l'étang #3 a été toujours mélangée avec les argiles du fond de l'étang. En effet, pendant nos essais de laboratoire, les observations d'une boue plus dense de couleur brune pâle ont été constatées dans la boue provenant de l'étang en terre. Les valeurs de fraction volatile plus basses dans l'étang en terre confirment la présence de matériau minéral, tel que l'argile.

Selon nos résultats du chapitre 4, l'étang en terre semble accumuler plus de phosphore que les étangs en béton. Une des hypothèses est que, sous conditions aérobies, et pH entre 4,0 et 7,5, une partie significative de P reste piégée par sorption dans les argiles, soit comme précipités de phosphates (de Fe, Al et Mn), soit comme

des phosphates adsorbés dans les hydroxydes (de Fe, Al et Mn) existants dans la couche superficielle du sol de l'étang en terre (Stumm et Morgan, 1981; Sposito, 1989; Ouellet, 1999; Sposito, 2007).

La fraction volatile de la boue de l'étang bétonné est élevée. Cette valeur indique que la proportion organique est élevée et confirme les affirmations de Hasnaoui *et al.* (2001) : « dans un étang de fond recouvert, l'accumulation de matière organique est plus élevée, favorisant des conditions anaérobies favorables au relargage du phosphore . Ainsi, le phosphore relargué explique le développement d'algues et les niveaux élevés de chlorophylle *a* ». Ces algues constituent la majeure partie de la matière organique dans les sédiments. Ces constats, ont été confirmés par la couleur verte des boues échantillonnées dans les étangs bétonnés.

#### **5.4 Entrainement de particules de boues**

Les vitesses d'entraînement des particules de boue ont été calculées à partir de l'équation (2.5). Parce que les boues et les conditions d'opération des étangs en terre et des étangs bétonnés sont différentes, deux valeurs ont été déterminées. Ces vitesses d'entraînement ont été ensuite comparées avec les vitesses d'écoulement moyen causées par les débits maximaux des étangs (Tableau 5.2).

Selon les travaux de Maillard *et al.* (2005), 85% des particules des boues des systèmes « raceways » avaient diamètres entre 1,5 et 30  $\mu\text{m}$ . Alors, la vitesse entraînement minimale des particules sera celle des particules de 1,5  $\mu\text{m}$  tel comme calculée dans le tableau 5.2.

**Tableau 5.2. Comparaison de la vitesse d'écoulement moyenne et la vitesse d'entraînement de particules dans les étangs #2 et #3**

Paramètres	Unités	Étang 2 (béton)	Étang 3 (terre)
<b>Vitesse d'écoulement moyen (<math>V_H</math>)</b>			
Forme aire transversale	-	moitié d'une ellipse	
Rayon mineur (hauteur d'eau)	m	1,45	1,40
Rayon majeur (moitié de largeur d'eau)	m	3,60	3,85
Aire transversale	$m^2$	8,2	8,5
Débit maximal (annexe 9)	$m^3/d$	716	351
Facteur de réduction de l'aire	-	0,9	0,9
Vitesse d'écoulement moyen	m/s	0,0011	0,0005
	m/h	4,0	1,9
<b>Vitesse d'entraînement de particules (<math>V_h</math>)</b>			
Constante $k$ (cohésion de part.)	-	0,05	0,06
Accélération gravitationnelle (g)	$m/s^2$	9,81	9,81
Densité relative ( $s_r$ )	-	1,05	1,20
Facteur de friction ( $f$ )	-	0,025	0,03
Diamètre minimal des particules	$\mu m$	1,5	1,5
Vitesse d'entraînement de particules	m/s	0,003	0,007
	m/h	12,4	24,7

Les vitesses pour entraîner les particules sédimentées (diamètre minimal = 1,5  $\mu m$ ) des étangs #2 et #3 sont de 12,4 et 24,7 m/h, respectivement. La vitesse d'entraînement des particules de l'étang en terre est plus élevée parce ses particules sont plus denses et cohésives que celles de l'étang à fond bétonné. Les vitesses d'écoulement moyen (4,0 et 1,9 m/h) des étangs sont plus faibles que les vitesses d'entraînement des étangs #2 et #3 (Tableau 5.2). Ces estimations font présumer que les particules devraient rester sédimentées dans les étangs #2 et #3. Toutefois, la plupart des particules s'est accumulée sous l'aérateur de surface. Ainsi, ce constat nous fait établir comme hypothèse que les champs de vitesses tangentiels aux lignes de courants causés par cet aérateur sont probablement les raisons de l'entraînement de particules vers l'aire sous l'aérateur de surface. De plus, il est possible que l'énergie de l'aérateur de surface dans sa zone d'influence ait été assez élevée pour entraîner

des particules. Les caractéristiques des aérateurs de surface ainsi que des diffuseurs du fond sont présentés dans le tableau 12.

**Tableau 5.3. Caractéristiques des aérateurs de surface et des diffuseurs du fond des étangs**

Paramètres	Unités	Étang 1 (béton)	Étang 2 (béton)	Étang 3 (terre)
<i>Caractéristiques des étangs d'élevage</i>				
Volume d'eau de l'étang	m <sup>3</sup>	115	148	246
Hauteur d'eau de l'étang	m	1,40	1,45	1,40
<i>Aérateurs de surface (annexe 10)</i>				
Nombre par étang	nb	1	1	1
Rotation du moteur	rpm	3450	3450	3450
Puissance totale	HP	0,5	0,5	0,5
Hauteur du jet d'eau	m	0,90	0,87	0,90
Rayon du jet d'eau	m	1,65	1,25	1,65
Énergie fournie par étang	W/m <sup>3</sup>	3,2	2,5	1,5
<i>Diffuseurs du fond de l'étang</i>				
Nombre par étang	nb	3	3	0
Puissance par diffuseur	HP	0,3	0,3	-
Puissance totale	HP	0,9	0,9	-
Énergie fournie par étang	W/m <sup>3</sup>	5,8	4,5	-

Des études plus approfondies pourraient être réalisées pour vérifier cette hypothèse par exemple, l'installation de caméras aquatiques pour surveiller le comportement de sédimentation et entraînement des particules lorsque les aérateurs sont en fonctionnement ou lorsque ils sont éteints. De même, des études des mouvements de boues lorsque l'étangs sont sans poissons et les aérateurs en fonctionnement.

D'autres études pourraient se faire en utilisant des traceurs (non toxiques pour les poissons) et une caméra pour étudier le comportement de lignes de courants causées par des aérateurs.

## CHAPITRE 6

### DISCUSSION GÉNÉRALE

#### 6.1 Mécanismes de rétention de P dans la boue des étangs

Les essais ont montré que la capacité de rétention du P dans la boue de vidange d'étangs d'élevage est influencée par des facteurs liés aux conditions d'élevage (alimentation, pH, aération, enlèvement de poissons, densité de poissons, cycles de production), le mode de fonctionnement de l'étang (temps de rétention (HRT), charge superficielle (SOR), et la sorption du P par le type de matériau du fond de l'étang en terre ou recouvert).

Le potentiel de récupération de P dans l'étang en terre s'est avéré supérieur à celui des étangs bétonnés. Cette différence pourrait s'expliquer par les variations de conditions mentionnées ci-dessus, entre un étang et l'autre. Toutefois, cette affirmation devrait être prise avec prudence parce que certaines incertitudes obtenues à partir des hypothèses et conditions sur le terrain pourraient surestimé la valeur du P accumulé dans le sol des étangs en terre.

L'alimentation du poisson avec une moulée de nouvelle génération (par exemple, P= 1% poids humide, FCR = 1 kg moulée/kg poisson, digestibilité de P entre 38 et 55%, selon Azevedo *et al.*, 1998) permet une meilleure décantation et une plus grande cohésion des fèces (Brinker *et al.*, 2005). Cette affirmation n'a pas été testée pendant nos essais de façon directe, toutefois, elle influence la proportion de P retenu dans la boue. En effet, lorsque la moulée non consommée et les fèces décantent, la boue et sa teneur en P resteront ou non dépendantes de l'application des paramètres d'opération de l'étang.

Le pH de l'eau, la présence de métaux (Fe, Al, Mn et Ca) et les conditions aérobies ont une influence sur la présence et la forme de P dans la boue. Ainsi, un pH basique (par exemple, pH > 7,5) permettrait l'adsorption du P avec les hydroxydes (Fe, Al, Mn) des sédiments de l'étang en terre ainsi que la formation de précipités de calcium amorphes dans l'étang recouvert. Par contre si le pH est neutre ou légèrement acide, comme c'est le cas de la pisciculture étudiée (pH entre 7,1 et 7,5), des précipités de phosphates (pH entre 5 et 7) seraient majoritaires dans l'étang en terre. Par contre, dans les étangs bétonnés, si le pH diminue, le P sera relargué des précipités de calcium ( $\text{Ca}_x(\text{PO}_4)_y(\text{OH})_z$ ) pour encourager la production de phytoplancton responsable du renouvellement de la matière organique de la boue (Kassila *et al.*, 2001; Hasnaoui *et al.*, 2001).

La densité de la biomasse de poisson produite dans les étangs a semblé influencer la capacité de récupération du P dans la boue. En effet, lorsque la densité était faible, la récupération du P de la boue était plus élevée (tendance observée aussi par Marcotte, 2008). Cette hypothèse confirmerait une des raisons pour lesquelles l'étang en terre serait plus efficace pour la récupération du P. Selon Chen *et al.* (1993), plus la densité est élevée et plus la turbulence augmente, plus les matières seront en suspension. Ainsi, la turbulence peut être suffisante pour maintenir ou remettre en suspension les solides même si la vitesse du courant est nulle. L'étang en terre étudié a montré des densités de poisson inférieures à celles des étangs bétonnés. Les raisons de cette densité faible seraient probablement la présence de matières en suspension produites par l'érosion des berges et du fond de l'étang, une aération moins efficace par un seul aérateur, la présence d'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) toxique en équilibre avec l'ion ammonium à une concentration plus élevée. De plus, la présence de matières en suspension et d'ammoniac peuvent être les causes de maladies au niveaux de branchies du poisson (Burrows, 1964; Robbe, 1975; Braaten *et al.*, 1986).

Les manipulations lors de l'enlèvement de poisson pour la vente ou le transfert pourraient faire perdre une quantité significative de boues. Normalement, cette action est réalisée les jours précédant la vidange annuelle, lorsque le pisciculteur capture les poissons avec des filets. Les solides peuvent alors être mis en suspension puis entraînés par l'eau entrant dans l'étang et les aérateurs en fonctionnement.

Le temps de rétention hydraulique (HRT) et la charge superficielle (SOR) sont des paramètres qui peuvent aussi avoir une influence sur l'enlèvement du P dans la boue récupérée. La tendance a indiqué que lorsque le HRT est élevé et la SOR est faible, la récupération de P dans la boue de vidange est élevée. Cette tendance a été constatée en comparant l'étang en terre et les étangs bétonnés analysés : les étangs bétonnes ont été moins efficace, parce que le HRT a été plus faible et la SOR plus élevée. Ce résultat a aussi été mis en évidence par Marcotte (2008).

## 6.2 Bilan annuel de P dans les étangs d'élevage

Le bilan annuel de P, intégré à partir des études dans les étangs bétonnés et l'étang en terre, est illustré à la Figure 6.1. Ce bilan révèle que sur 100 % du phosphore provenant de la moulée (1% de P poids humide et un FCR variant de 1,0 à 1,2), 40 à 52 % du P sont retenus dans la chair de poisson, 5 à 19% de P peuvent être récupérés par la vidange annuelle de boue et finalement 40 à 57% du phosphore restant sortent à l'effluent de l'étang qui est traité par l'étang de sédimentation situé en aval.

Les bilans annuels du phosphore par vidange annuelle de boues semblent montrer que l'étang en terre a été plus efficace que les étangs en béton. En effet 31 % du phosphore non retenu par le poisson a été récupéré dans la boue de vidange de l'étang en terre tandis que dans les étangs bétonnés, l'efficacité maximale de rétention du P obtenue a été de 17% du P non retenu par les poissons. La raison de cette efficacité plus élevée dans l'étang en terre serait due à une combinaison des mécanismes

favorables (expliqués à la section 6.1) : le HRT plus élevé, la SOR et la densité de poissons plus faibles et les conditions de pH et l'aération permettant une sorption plus efficace du P avec les cations (Fe, Al, Mn) présents dans la terre. De plus, il est possible qu'une fraction élevée de P dans l'étang en terre pourrait provenir des années d'opération précédentes et que la masse totale de P déterminé soit surestimée.

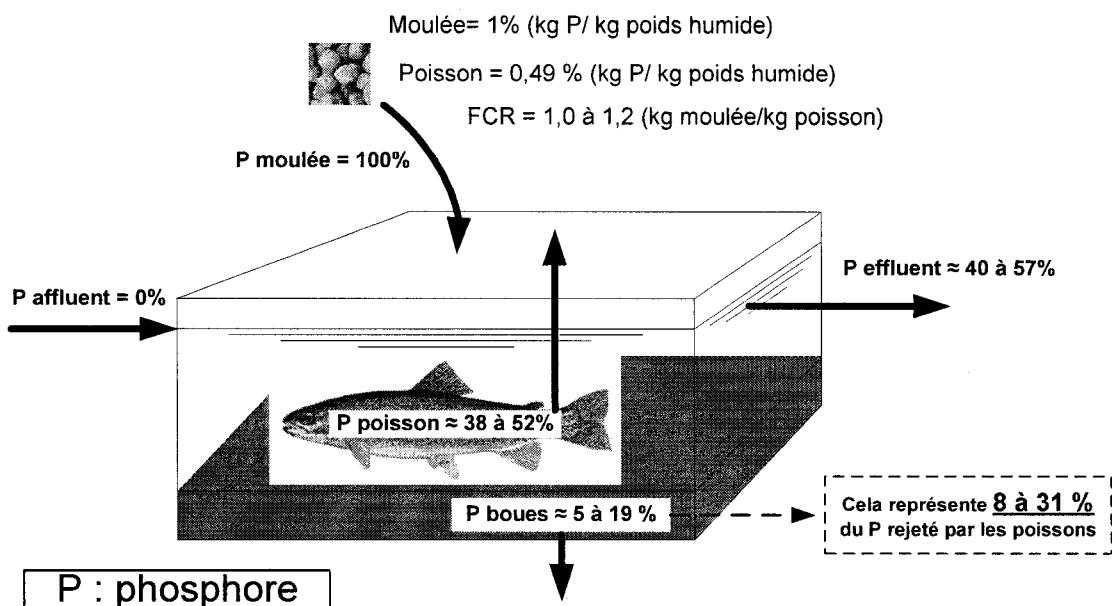


Figure 6.1. Intégration des bilans annuels de P dans les étangs d'élevage mesurés, dont quatre bilans pour les étangs bétonnés et un bilan pour l'étang en terre.

Les conditions existantes dans les étangs en terre ne peuvent pas s'appliquer aux étangs bétonnés pour des raisons économiques. En effet, la construction des étangs bétonnés avec un temps de rétention (HRT) élevé et une charge superficielle (SOR) faible nécessitent des volumes importants d'où un coût élevé pour les pisciculteurs. De plus, une faible densité de poissons diminuerait la production et les profits des pisciculteurs. La recommandation d'enlever les boues deux fois par année permettrait d'améliorer les rendements de récupération de P des étangs bétonnés.

Un autre constat déduit des essais a été la difficulté de réaliser un bilan de P dans les étangs excavés en terre. Pour ce faire une procédure de calculs a été développée. De plus, une série de caractérisations de la boue avant la vidange, et du sol restant après la vidange, ainsi que la caractérisation et la détermination du volume de la masse enlevée par excavation, devraient être réalisées.

Finalement, du bilan de la Figure 6.1 et des conclusions de l'article, pour une tonne de poisson produit dans les étangs étudiés, entre 3,8 et 6,3 kg de phosphore devraient sortir des étangs. Cette charge peut être diminuée significativement par une fréquence d'enlèvement des boues d'au moins deux fois par année.

### **6.3 Distribution de P dans le fond des étangs et fréquence de vidange des boues**

Les résultats ont montré que les boues s'accumulent principalement sous la ligne de l'aérateur de surface situé au milieu des étangs, soit en terre soit en béton. Selon les observations mensuelles de notre équipe de recherche lors des échantillonnages et par le pisciculteur une quantité significative des boues s'accumulaient exactement sous l'aérateur de surface. De plus, lors de vidange annuelle une mesure de l'accumulation des boues sous l'aérateur de surface a été effectue après l'enlèvement de l'eau. Dans l'étang en terre, l'accumulation sous l'aérateur a été d'environ 25 cm dans la zone plus haute et le diamètre d'influence de 2,0 m tandis que pour les étangs bétonnés l'accumulation des boues sous l'aérateur a été de 15 cm dans la zone plus haute et d'un diamètre d'influence de 1 m.

Alors, sur la masse de phosphore retenu dans la boue, un pourcentage très significatif de boue et de phosphore s'est concentré sous l'aérateur. Ainsi, le phosphore mesuré sous la ligne de l'aérateur a été de 63 à 91% (étang bétonné) et de 19 à 83 % (étang en

terre) du phosphore total mesuré dans la masse de la boue de l'étang durant la période de production.

L'hypothèse qui expliquerait l'accumulation élevée de P sous les aérateurs serait la vitesse d'entraînement de particules sédimentées de l'étang causé par les aérateurs superficiels. Ainsi, la vitesse de circulation générée par ces aérateurs, plus élevée que d'autres vitesses existant dans l'étang (e.g. vitesse d'écoulement moyen), pourrait entraîner des particules sédimentées et les maintenir sous l'aire de l'aérateur de surface.

Par rapport aux résultats obtenus avec les étangs bétonnés, l'étang en terre semble accumuler plus de phosphore dans la boue au fond et plus de phosphore sous l'aérateur de surface à la fin de la campagne de production. Ainsi, à cause des mécanismes de rétention de P plus favorables (HRT, SOR et  $f_d$ ), l'étang en terre semble avoir accumulé au moins 3 fois plus de P sous l'aérateur que sous celui de l'étang bétonné (Figure 4.3). Toutefois, une fraction significative de P dans la boue de l'étang en terre pourrait provenir du phosphore accumulé dans le sol des années d'opération antérieures.

Selon cette étude, une stratégie pour augmenter l'efficacité de récupération de phosphore des étangs, dont les conditions sont limitées (par exemple HRT < 6 h; SOR > 0,2 m/h et densité > 12 kg poisson/m<sup>3</sup>), serait d'effectuer la vidange des boues deux fois par année, premièrement dans le 6<sup>ème</sup> ou 7<sup>ème</sup> mois sans arrêter la production et puis à la fin de la production. En effet, selon les observations dans la pisciculture étudiée, le débit d'eau dans les étangs, dans le 6<sup>ème</sup> ou 7<sup>ème</sup> mois, était encore faible et à évité un « entraînement » des boues vers l'effluent. Cette boue de volume maximale devrait être récupérée pour augmenter la capacité de rétention de boues et leur contenu de P dans les étangs. Cette recommandation pourrait être accompagnée de l'installation de trappes à sédiments sous l'aérateur de surface et isolée de la zone

d'élevage pour augmenter la fréquence d'enlèvement des boues et du phosphore. Finalement, la boue enlevée des vidanges pourrait être épandue, disposée dans un site d'ensouflement ou traitée par un système extensif (Comeau *et al.*, 2006).

## CHAPITRE 7

### CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Afin de réduire les impacts sur l'environnement causé par les rejets en phosphore des stations piscicoles, cette étude avait pour objectif d'établir un bilan de phosphore des étangs piscicoles et d'identifier les facteurs influençant les rejets en phosphore de piscicultures en étangs, en se basant sur la masse de phosphore retenue dans la boue de la vidange annuelle. La démarche poursuivie a permis dégager les éléments suivants :

Le potentiel de récupération de P dans la boue de l'étang en terre semble supérieur à celui des étangs bétonnés. Cette différence est expliquée par les variations de conditions d'élevage et de fonctionnement entre ces deux types d'étangs. Ainsi, le rendement de récupération de P de boue d'étangs d'élevage est élevé quand le HRT est élevé, la SOR et la densité de poisson faibles et les mécanismes de sorption du P dans le fond de l'étang importants.

Dans les étangs étudiés, sur 100% de P ajouté par la moulée distribuée, entre 5 et 19 % ont été récupérés dans la boue des vidanges annuelles. La proportion de phosphore qui sortait de ces étangs d'élevage a été de 40 à 57% du phosphore total apporté par la moulée. Ceci s'est traduit par une charge de P à la sortie des étangs variant de 3,8 à 6,3 kg de phosphore rejeté par tonne de poisson produit. Ce rejet chargé peut être diminué significativement par une fréquence d'enlèvement des boues d'au moins deux fois par année.

Dans les étangs d'élevage, les boues, et donc, leur contenu en phosphore se sont accumulées principalement sous la ligne de l'aérateur de surface situé au milieu de l'étang. Durant la période de production, les pourcentages de P trouvés sous les

aérateurs ont été de 63 à 91% et de 19 à 83 % du P total des boues des étangs #2 et #3, respectivement. Les conditions d'élevage et d'opération plus favorables à la récupération de P dans la boue sous l'aérateur de l'étang en terre, ont engendré une masse de P plus de trois fois plus élevée que celle des étangs bétonnés à la fin de la production.

Le protocole de mesure et les calculs appliqués, afin de trouver la proportion de P dans la vidange de boues d'étangs excavés en terre, montre la difficulté de réaliser un bilan de P dans ces étangs. L'inconvénient de cette méthode est le calcul de facteurs inconnus à partir de la caractérisation des boues, du sol et de la masse excavée, qui pourrait générer des erreurs plus élevées que une mesure directe (par exemple, celle appliquée dans les étangs bétonnés) .

Finalement, les facteurs temps de rétention hydraulique (HRT : *hydraulic retention time*), charge superficielle (SOR : *surface overflow rate*), densité de poisson ( $f_d$  : *fish density*) et sorption du P sont les plus importants pour déterminer l'efficacité de récupération du phosphore d'étangs d'élevage. Ainsi, des études plus approfondies de ces paramètres doivent être réalisées afin de minimiser les rejets en phosphore de ces étangs, et de la pisciculture en général.

## Recommandations

Une fréquence d'enlèvement de boues d'au moins deux fois par année améliorerait les rendements de récupération de P d'étangs peu efficaces. L'enlèvement de boues pourrait être réalisé, sans arrêter l'élevage, entre le 6<sup>e</sup> et le 7<sup>e</sup> mois de la campagne de production où le débit d'entrée d'eau est encore suffisant pour maintenir la plus grande masse de boues dans les étangs. À cet effet, l'installation de trappes à sédiments isolés de la zone d'élevage et sous l'aérateur de surface est recommandée dans ces étangs.

Afin de diminuer les erreurs de détermination de P récupéré dans la boue lors de vidanges annuelles, une caractérisation de boues préalable et juste avant la vidange est recommandée. De plus, pour les étangs excavés, une caractérisation du sol après la vidange ainsi que la caractérisation et la détermination du volume enlevé par excavation, devraient être réalisées.

Des essais d'absorption de phosphore par la terre vierge d'une pisciculture en laboratoire pourront aider mieux à comprendre les mécanismes de sorption du P par le sol d'un étang d'élevage. En effet, à partir de solutions saturées en oxygène contenant concentrations entre 5 à 50 mg P/L, des essais d'adsorption en cuvée pourraient se réaliser en ajoutant quantités connues d'un sol vierge d'une pisciculture.

Lorsque le pisciculteur enlève les poissons pour la vente ou le transfert, il serait préférable d'éviter toute remise en suspension des boues sédimentées dans le fond. Pour ce faire, certaines recommandations, pourront être applicables en fonction de chaque étang et les conditions de la pisciculture. Par exemple : couper le débit d'eau, éteint l'(es) aérateur(s) s'il cause une remise en suspension, dévier l'eau vers l'aval, baisser le niveau d'eau, etc. Si finalement, l'activité cause une remise en suspension des boues il faudrait considérer une technique pour refaire sédimentier ou traiter les matières suspendues. Par exemple: baisser le niveau d'eau ou couper débit pour laisser le temps au matières de sédimentier à nouveau. Si c'est le cas d'un remplissage d'un étang vide contenant la boue sédimentée, il faudrait attendre lorsqu'il est plein avant d'ouvrir le débit de sortie, envoyer les eaux dans un étang temporaire de sédimentation, filtrer les eaux de cet étang avec système portatif de filtration, etc.

## RÉFÉRENCES

- AAQ, MAPAQ, MDDEP, et Table filière de l'aquaculture en eau douce du Québec. (2003). *Stratégie de développement durable de l'aquaculture en eau douce du Québec*. Association des aquaculteurs du Québec avec la participation de [i.e. du] Ministère de l'environnement, Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation. tiré de Bibliothèque nationale du Québec: <http://catalogue.banq.qc.ca:4400/cgi-bin/bestnstatus?rec=142279007>
- Association des aquaculteurs du Québec avec la participation de [i.e. du] Ministère de l'environnement, Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation.
- Ackefors, H., et Enell, M. (1994). The release of nutrients and organic matter from aquaculture systems in Nordic countries. *Journal of Applied Ichthyology*, 10, 225-241.
- AIR-O-LATOR. (2008). AQUARIAN Aquaculture. Floating aerators for aquaculture applications. Consulté le 1 nov. 2008, tiré de <http://www.airolator.com/aquaculture.pdf>. AIR-O-LATOR Corporation.
- APHA, AWWA, WEF (2005). *Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater: Centennial Edition* (21<sup>e</sup> éd.). American Public Health Association (APHA), Washington, D.C.
- Azevedo, P. A., Cho, C. Y., Leeson, S., et Bureau, D. P. (1998). Effects of feeding level and water temperature on growth, nutrient and energy utilization and waste outputs of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquatic Living Resources*, 11(4), 227-238.

- Banas, D., Masson, G., Leglize, L., Usseglio-Polatera, P., et Boyd, C. E. (2008). Assessment of sediment concentration and nutrient loads in effluents drained from extensively managed fishponds in France. *Environmental Pollution*, 152(3), 679-685.
- Bellier, N., Chazarenc, F., et Comeau, Y. (2006). Phosphorus removal from wastewater by mineral apatite. *Water Research*, 40(15), 2965-2971.
- Bergheim, A., et Brinker, A. (2003). Effluent treatment for flow through systems and European Environmental Regulations. *Aquacultural Engineering*, 27(1), 61-77.
- Boaventura, R., Pedro, A. M., Coimbra, J., et Lencastre, E. (1997). Trout farm effluents: Characterization and impact on the receiving streams. *Environmental Pollution*, 95(3), 379-387.
- Boucher, É., et Vandenberg, G. (2005). *Essais de moulée au Canada utilisation de diètes performantes afin de réduire les impacts environnementaux de l'industrie aquacole en eau douce*. Québec, Canada: Société de recherche et de développement en aquaculture continental (SORDAC) Inc.
- Boucher, É., et Vandenberg, G. (2007). *Étude des performances commerciales, environnementales et physiologiques des Omble de fontaine nourris avec de nouvelles moulées canadiennes à faible teneur en phosphore et à haute énergie*. Québec, Canada: Société de recherche et de développement en aquaculture continental (SORDAC) Inc.

Boyd, C. E. (1998). Mechanical aeration in pond aquaculture. *Second International Symposium on Aeration Technology*, American Society of Mechanical Engineering. Washington, DC. USA (pp. 6)

Braaten, B., Poppe, T., Jacobsen, P., et Maroni, K. (1986). Risk from self-pollution in aquaculture: evaluations and consequences. Paper presented at the Efficiency in Aquaculture Production: Disease and Control. Proceedings of the 3rd International Conference on Aquafarming 'Aquacoltura'86', Verona, Italy, Oct.9-10, 1986, pp. 139 - 165.

Brinker, A., Koppe, W., et Rosch, R. (2005). Optimised effluent treatment by stabilised trout faeces. *Aquaculture*, 249(1-4), 125-144.

Burrows, R. E. (1964). Effects of accumulated excretory products on hatchery-reared Salmonids. U. S. Dept. of Interior , Bureau of Sport, Fisheries and Wildlife. Research Report 66.

Chambers, P. A., Guy, M., Roberts, E. S., Charlton, M. N., Kent, R., Gagnon, C., G., G., et N., F. (2001). *Les éléments nutritifs et leurs effets sur l'environnement au Canada* Environnement Canada, Ottawa (Ont.).

Chen, S., Timmons, M. B., Aneshansley, D. J., et Bisogni, J. J. (1993). Suspended solids characteristics from recirculating aquacultural systems and design implications. *Aquaculture*, 112(2-3), 143-155.

Cho, C. Y., Hynes, J. D., Wood, K. R., et Yoshida, H. K. (1994). Development of high-nutrient-dense, low-pollution diets and prediction of aquaculture wastes using biological approaches. *Aquaculture*, 124(1-4), 293-305.

- Comeau, Y., et Brisson, J. (2000). *Utilisation de marais artificiels avec substrat calcaire pour l'épuration d'eaux de rejets de pisciculture : rapport final.* Montréal (Québec), Canada: Société de recherche et développement en aquaculture continentale (SORDAC) Inc.
- Comeau, Y., Brisson, J., et Chazarenc, F. (2006). *Traitemennt de boues piscicoles par marais artificiel et lit filtrant de déphosphatation* Montréal (Québec): Société de recherche et développement en aquaculture continentale (SORDAC) Inc. .
- Comeau, Y., Brisson, J., Reville, J. P., Forget, C., et Drizo, A. (2001). Phosphorus removal from trout farm effluents by constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 44(11-12), 55-60.
- Cripps, S. J., et Bergheim, A. (2000). Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems. *Aquacultural Engineering*, 22(1), 33-56.
- Delgado, P. C., Avnimelech, Y., McNeil, R., Bratvold, D., Browdy, C. L., et Sandifer, P. (2003). Physical, chemical and biological characteristics of distinctive regions in paddlewheel aerated shrimp ponds. *Aquaculture*, 217(1-4), 235-248.
- Dosdat, A. (1992). L'excretion chez le poissons téléostéens: II. Le phosphore. *La pisciculture française* (109), 18-29.
- Dosdat, A., Méttailler, R., Desbruyères, E., et Huelvan, C. (1998). Comparison of brown trout (*Salmo trutta*) reared in fresh water and sea water to freshwater rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): II. Phosphorus balance. *Aquatic Living Resources*, 11(1), 21-28.

Forget, C. (2001). *Elimination du phosphore dissous des effluents piscicoles a l'aide de materiaux granulaires reactifs*. Mémoire de M.Sc.A., École Polytechnique, Montréal (Québec). Canada

Foy, R. H., et Rosell, R. (1991). Fractionation of phosphorus and nitrogen loadings from a Northern Ireland fish farm. *Aquaculture*, 96(1), 31-42.

Hasnaoui, M., Kassila, J., Loudiki, M., Droussi, M., Balvay, G., et Barroin, G. (2001). Relargage du phosphore a l'interface eau-sediment dans des etangs de pisciculture de la station Deroua (Beni Mellal, Maroc) Title of translation:Phosphate release at the water-sediment interface in a fisheries pond of the Deroua fish farm (Beni Mellal, Morocco). *Revue des Sciences de l'Eau*, 14(3), 307-322.

Jiménez-Montealegre, R., Verdegem, M., Zamora, J. E., et Verreth, J. (2002). Organic matter sedimentation and resuspension in tilapia (*Oreochromis niloticus*) ponds during a production cycle. *Aquacultural Engineering*, 26(1), 1-12.

Johnson, W., et Chen, S. (2006). Performance evaluation of radial/vertical flow clarification applied to recirculating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 34(1), 47-55.

Kassila, J., Hasnaoui, M., Droussi, M., Loudiki, M., et Yahyaoui, A. (2001). Relation between phosphate and organic matter in fish-pond sediments of the Deroua fish farm (Beni-Mellal, Morocco): Implications for pond management. *Hydrobiologia*, 450, 57-70.

- Lall, S. P. (1991). Digestibility, metabolism and excretion of dietary phosphorus in fish. In: Cowey, C.B. and Cho, C.Y. (Editors). Nutritional Strategies and Management of Aquaculture Waste. *Proceedings of the First International Symposium on Nutritional Strategies and Management of Aquaculture Waste.* Univ. of Guelph, Guelph, Ontario, Canada pp. 21–36.
- Lospied, C. (2003). *Évaluation des capacités et des conditions d'enlèvement du phosphore dissous par les scories d'aciéries.* Mémoire de M.Sc.A., École Polytechnique, Montréal (Québec).
- MacMillan, J. R., Huddleston, T., Woolley, M., et Fothergill, K. (2003). Best management practice development to minimize environmental impact from large flow-through trout farms. *Aquaculture*, 226(1-4), 91-99.
- Maillard, V. M., Boardman, G. D., Nyland, J. E., et Kuhn, D. D. (2005). Water quality and sludge characterization at raceway-system trout farms. *Aquacultural Engineering*, 33(4), 271-284.
- MAPAQ. (2005). *Portrait aquaenvironnemental, phase 1 - Rapport global.* Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ).
- MAPAQ, MDDEP, et AAQ. (2005). *Portrait aquaenvironnemental, phase 1 - Rapport global.* Direction générale des pêches et de l'aquaculture commerciales. Direction de l'innovation et des technologies, MAPAQ.
- Marcotte, D. (2007). *Évaluation et optimisation des performances des technologies de traitement des rejets piscicoles.* Société de recherche et de développement en aquaculture continental (SORDAC) Inc.

- Marcotte, D. (2008). *Évaluation de la proportion du phosphore récupéré par l'enlèvement des boues des étangs d'élevage*. Société de recherche et de développement en aquaculture continental (SORDAC) Inc.
- Masaló, I., Guadayol, Ò., Peters, F., et Oca, J. (2008). Analysis of sedimentation and resuspension processes of aquaculture biosolids using an oscillating grid. *Aquacultural Engineering*, 38(2), 135-144.
- MDDEP. (1998). *Guide d'aménagement des lieux d'élimination de neige et mise en oeuvre du Règlement sur les lieux d'élimination de neige. Annexe E: Techniques d'élimination de la neige*. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec (MDDEP).
- Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, G., Burton, F. L., et Stensel, H. D. (2003). *Wastewater engineering: treatment and reuse* (4th<sup>e</sup> éd.). New York, McGraw-Hill.
- Morin, R. (2007). *La production piscicole au Québec. Document d'information*. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ).
- Morin, R., et Direction de l'aquaculture et du développement durable (Québec). (2006). *Lois et règlements relatifs à l'aquaculture en eau douce*. Document d'information. Consulté le 30 juin 2008, tiré de MAPAQ, [http://www.mapaq.gouv.qc.ca/NR/rdonlyres/1FE2D67F-DA4B-4370-8DC5-3601CE4AFF05/0/04lois\\_reglements.pdf](http://www.mapaq.gouv.qc.ca/NR/rdonlyres/1FE2D67F-DA4B-4370-8DC5-3601CE4AFF05/0/04lois_reglements.pdf). Agriculture, pêches et alimentation Québec, Direction de l'aquaculture et du développement durable.

Ouellet, G. (1999). *Les rejets des stations piscicoles et leurs impacts environnementaux*. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), Direction générale des pêches et de l'aquaculture commerciales, Direction de l'innovation et des technologies, Station technologique piscicole des eaux douces., tiré de Bibliothèque nationale du Québec: [http://www.mapaq.gouv.qc.ca/NR/rdonlyres/4088F847-77D9-448B-9DE2-9F1A5674C3B8/0/t99\\_05.pdf](http://www.mapaq.gouv.qc.ca/NR/rdonlyres/4088F847-77D9-448B-9DE2-9F1A5674C3B8/0/t99_05.pdf). Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), Direction générale des pêches et de l'aquaculture commerciales, Direction de l'innovation et des technologies, Station technologique piscicole des eaux douces.

Papatryphon, E., Petit, J., Van der Werf, H. M. G., Sadasivam, K. J., et Claver, K. (2005). Nutrient-balance modeling as a tool for environmental management in aquaculture : The case of trout farming in France. *Environmental management*, 35(2), 161-174.

Patterson, R. N., Watts, K. C., et Gill, T. A. (2003). Micro-particles in recirculating aquaculture systems: determination of particle density by density gradient centrifugation. *Aquacultural Engineering*, 27(2), 105-115.

Pillay, T. V. R. (1992). *Aquaculture and the Environment*. Oxford: Fishing News Book.

Porrello, S., Lenzi, M., Persia, E., Tomassetti, P., et Finoia, M. G. (2003a). Reduction of aquaculture wastewater eutrophication by phytotreatment ponds system: I. Dissolved and particulate nitrogen and phosphorus. *Aquaculture*, 219(1-4), 515-529.

- Porrello, S., Lenzi, M., Tomassetti, P., Persia, E., Finoia, M. G., et Mercatali, I. (2003b). Reduction of aquaculture wastewater eutrophication by phytotreatment ponds system: II. Nitrogen and phosphorus content in macroalgae and sediment. *Aquaculture*, 219(1-4), 531-544.
- Robbe, D. (1975). *Influence des matières minérales en suspension sur la qualité des eaux de surface*. Rapport du Laboratoire des Ponts et Chaussées, Paris, 123 pp.
- Roberson, J. A., J., C. J., et Hanif, C. M. (1998). *Hydraulic Engineering* (2<sup>e</sup> éd.). New York, John Wiley & Sons, Inc.
- Roque d'Orbcastel, E., Blancheton, J.-P., Boujard, T., Aubin, J., Moutounet, Y., Przybyla, C., et Belaud, A. (2008). Comparison of two methods for evaluating waste of a flow through trout farm. *Aquaculture*, 274(1), 72-79.
- Saraiva Gomes, F. B. (2003). *Developing a protocol for bottom soil and water quality management in ponds for semi-intensive culture of black tiger prawn Penaeus monodon*. Mémoire de Ph.D., Auburn University, Alabama.
- Sauvé, S., Donisa, C., Roy, A. G., Courchesne, F., Boyer, C., Turmel, M.-C., et François, M. (2006). *Caractérisation de la dynamique du phosphore dans une pisciculture de salmonidés en étangs* (Rapport final: Société de recherche et de développement en aquaculture continentale [SORDAC] Inc.). Québec: Université de Montréal.
- Schulz, C., Gelbrecht, J., et Rennert, B. (2003). Treatment of rainbow trout farm effluents in constructed wetland with emergent plants and subsurface horizontal water flow. *Aquaculture*, 217(1-4), 207-221.

- Seo, J., et Boyd, C. E. (2001). Effects of bottom soil management practices on water quality improvement in channel catfish *Ictalurus punctatus* ponds. *Aquacultural Engineering*, 25(2), 83-97.
- Sposito, G. (1989). *The Chemistry of Soils*. New York: Oxford University Press.
- Sposito, G. (2007). *The Chemistry of Soils* (2<sup>e</sup> éd.). New York: Oxford University Press.
- Steeby, J. A., Hargreaves, J. A., Tucker, C. S., et Kingsbury, S. (2004). Accumulation, organic carbon and dry matter concentration of sediment in commercial channel catfish ponds. *Aquacultural Engineering*, 30(3-4), 115-126.
- Stumm, W., et Morgan, J. J. (1981). *Aquatic Chemistry - An Introduction Emphasizing Chemical Equilibria in Natural Waters* (2<sup>e</sup> éd.). New York, John Wiley & Sons, Inc., 627-635.
- Sugiura, S. H., Marchant, D. D., Kelsey, K., Wiggins, T., et Ferraris, R. P. (2006). Effluent profile of commercially used low-phosphorus fish feeds. *Environmental Pollution*, 140(1), 95-101.
- Sugiura, S. H., Raboy, V., Young, K. A., Dong, F. M., et Hardy, R. W. (1999). Availability of phosphorus and trace elements in low-phytate varieties of barley and corn for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*, 170(3-4), 285-296.
- Summerfelt, R. C., et Penne, C. R. (2005). Solids removal in a recirculating aquaculture system where the majority of flow bypasses the microscreen filter. *Aquacultural Engineering*, 33(3), 214-224.

- Summerfelt, S. T., Adler, P. R., Glenn, D. M., et Kretschmann, R. N. (1999). Aquaculture sludge removal and stabilization within created wetlands. *Aquacultural Engineering*, 19(2), 81-92.
- Thomas, B.-M. (1997). L'utilisation des filtres à tambour devrait se généraliser. *Aqua-Revue*, 70, 29-31.
- Timmons, M. B., Ebeling, J. M., Wheaton, F., Summerfelt, S. T., et Vinci, B. J. (2002). *Recirculating Aquaculture Systems* (2<sup>e</sup> éd.): Northeastern Regional Aquaculture Center. NRAC Publication No. 01-002. Cayuga Aqua Ventures. Ithaca, NY.
- True, B., Johnson, W., et Chen, S. (2004a). Reducing phosphorous discharge from flow-through aquaculture: II: Hinged and moving baffles to improve waste transport. *Aquacultural Engineering*, 32(1), 145-160.
- True, B., Johnson, W., et Chen, S. (2004b). Reducing phosphorus discharge from flow-through aquaculture I: Facility and effluent characterization. *Aquacultural Engineering*, 32(1), 129-144.
- USEPA. (1983). *Methods for chemical analysis of water and wastes. USEPA-600/4-79-020. Total phosphorous, Method 365.4.* U.S. Environmental Protection Agency (U.S.EPA).
- Vandenberg, G. W. (2001). *Encapsulation de phytase microbienne: L'influence sur la disponibilité de nutriments chez la truite arc-en-ciel.* Mémoire de Ph.D., Université Laval (Canada)

Yuvanatemiya, V., et Boyd, C. E. (2006). Physical and chemical changes in aquaculture pond bottom soil resulting from sediment removal. *Aquacult. Eng.*, 35(2), 199-205.

## **ANNEXES**

**ANNEXE 1. Caractérisation mensuelle des boues de l'étang #2 (en béton)**

Distance (m)	12.Oct.2007							
	Volume d'échantillon pompé (L)	Volume de boue récupérée (mL)	P récupéré dans la boue (mg P)	P récupéré par étang (%)	Matières totales (MT) récupérées dans la boue (g MT)	Matières volatiles totales (MVT) récupérées dans la boue (g MVT)	Siccité de boue (%)	Fraction volatile de boue (MVT/MT) (%)
1	10	80	46	4%	2,91	2,09	3,7	72
3	10	35	14	1%	0,85	0,60	2,4	71
5	10	35	16	1%	0,89	0,60	2,6	67
7	10	28	8	1%	0,46	0,32	1,6	69
9	10	35	18	2%	0,96	0,63	2,7	66
11 Aérateur	10	460	888	74%	29,9	17,2	6,7	57
13	10	60	50	4%	2,37	1,56	4,0	66
15	10	40	24	2%	1,27	0,80	3,1	63
17	10	40	22	2%	1,19	0,82	3,0	68
19	10	170	117	10%	7,61	5,52	4,6	73
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>983</b>	<b>1203</b>	-	<b>48</b>	<b>30</b>	-	-
Concentration moyenne de P dans la boue				24,9	(g P/kg MT)			

Distance (m)	9.Nov.2007							
	Volume d'échantillon pompé (L)	Volume de boue récupérée (mL)	P récupéré dans la boue (mg P)	P récupéré par étang (%)	Matières totales (MT) récupérées dans la boue (g MT)	Matières volatiles totales (MVT) récupérées dans la boue (g MVT)	Siccité de boue (%)	Fraction volatile de boue (MVT/MT) (%)
1	10	55	43	2%	2,26	1,54	4,1	68
3	10	12	7	0%	0,21	0,14	1,7	68
5	10	8	4	0%	0,13	0,08	1,6	66
7	10	12	7	0%	0,25	0,16	2,0	63
9	10	15	11	0%	0,33	0,22	2,2	67
11 Aérateur	10	700	2144	90%	75,9	37,7	11,7	50
13	10	20	10	0%	0,39	0,26	2,0	66
15	10	40	40	2%	1,86	1,08	4,6	58
17	10	15	12	0%	0,65	0,30	4,2	46
19	10	120	108	5%	5,59	3,71	4,7	66
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>997</b>	<b>2384</b>	-	<b>88</b>	<b>45</b>	-	-
Concentration moyenne de P dans la boue				27,2	(g P/kg MT)			

### Caractérisation mensuelle des boues de l'étang #2 (suite)

Distance (m)	30.Nov.2007							
	Volume d'échantillon pompé (L)	Volume de boue récupérée (mL)	P récupéré dans la boue (mg P)	P récupéré par étang (%)	Matières totales (MT) récupérées dans la boue (g MT)	Matières volatiles totales (MVT) récupérées dans la boue (g MVT)	Siccité de boue (%)	Fraction volatile de boue (MVT/MT) (%)
1	10	55	43	2%	2,52	1,41	-	56
3	10	19	6,7	0%	0,44	0,28	2,3	64
5	10	8	3,5	0%	0,21	0,12	-	56
7	10	9	2,5	0%	0,13	0,08	1,5	62
9	10	12	3,6	0%	0,22	0,14	1,9	63
11	10	20	6,9	0%	0,39	0,2	1,9	62
13 Aérateur	10	1300	2418	91%	109	61,8	9,0	57
15	10	40	39,8	1%	2,35	1,31	-	56
17	10	35	30,0	1%	2,61	0,86	7,3	33
19	10	120	108	4%	6,35	3,55	-	56
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>1618</b>	<b>2661</b>	-	<b>124</b>	<b>70</b>	-	-
Concentration moyenne de P dans la boue				21,5	(g P/kg MT)			

Distance (m)	11.Avril.2008							
	Volume d'échantillon pompé (L)	Volume de boue récupérée (mL)	P récupéré dans la boue (mg P)	P récupéré par étang (%)	Matières totales (MT) récupérées dans la boue (g MT)	Matières volatiles totales (MVT) récupérées dans la boue (g MVT)	Siccité de boue (%)	Fraction volatile de boue (MVT/MT) (%)
1	9,6	563	309	7%	22,8	16,2	4,2	71
3	10	34	15	0%	0,97	0,7	2,8	68
5	10	23	9	0%	0,50	0,3	2,2	66
7	10	32	16	0%	0,65	0,4	2,0	66
9	10,4	48	28	1%	1,64	1,1	3,4	65
11 Aérateur	10,3	2712	3075	71%	176	113	7,2	64
13	10,3	546	494	11%	29,4	19,0	5,7	65
15	10	60	30	1%	2,01	1,3	3,3	67
17	10	50	17	0%	1,24	0,8	2,4	62
19	10	460	333	8%	25,3	16,1	5,9	64
<b>TOTAL</b>	<b>101</b>	<b>4528</b>	<b>4325</b>	-	<b>261</b>	<b>169</b>	-	-
Concentration moyenne de P dans la boue				16,6	(g P/kg MT)			

### Caractérisation mensuelle des boues de l'étang #2 (suite)

Distance (m)	9.Mai.2008							
	Volume d'échantillon pompé (L)	Volume de boue récupérée (mL)	P récupéré dans la boue (mg P)	P récupéré par étang (%)	Matières totales (MT) récupérées dans la boue (g MT)	Matières volatiles totales (MVT) récupérées dans la boue (g MVT)	Siccité de boue (%)	Fraction volatile de boue (MVT/MT) (%)
1	9,8	582	500	12%	29,5	20,0	5,3	68
3	10	32	22	1%	1,0	0,71	3,2	68
5	9,8	148	214	5%	6,2	4,1	4,2	66
7	9,8	36	42	1%	1,2	0,7	3,2	64
9 Aérateur	9,7	1330	1702	39%	80	52,2	6,5	65
11	9,9	53	60	1%	1,6	1,0	3,0	63
13	9,7	31	25	1%	0,6	0,4	1,9	66
15	9,7	22	23	1%	0,5	0,3	2,4	63
17	10	14	13	0%	0,4	0,2	3,0	51
19	10	135	80	2%	7,5	3,8	5,7	50
<b>TOTAL</b>	98	2381	2682	-	129	83	-	-
Concentration moyenne de P dans la boue				20,8	(g P/kg MT)			

## ANNEXE 2: Caractérisation mensuelle des boues de l'étang #3 (en terre)

Distance (m)	12.Oct.2007							
	Volume d'échantillon pompé (L)	Volume de boue récupérée (mL)	P récupéré dans la boue (mg P)	P récupéré par étang (%)	Matières totales (MT) récupérées dans la boue (g MT)	Matières volatiles totales (MVT) récupérées dans la boue (g MVT)	Siccité de boue (%)	Fraction volatile de boue (MVT/MT) (%)
1	10	225	317	16%	170	8,95	-	5,3
4	10	60	81	4%	44	2,30	-	5,3
7	10	7	3	0%	1,48	0,08	-	5,3
10	10	205	195	10%	111	5,62	44,6	5,1
13	10	11	6	0%	3,4	0,18	-	5,3
16 Aérateur	10	305	380	19%	158	11,8	44,3	7,4
19	10	6	3	0%	1,8	0,09	-	5,3
22	10	435	582	29%	312	16,4	-	5,3
25	10	320	306	15%	194	7,29	47,1	3,7
28	10	175	139	7%	80,2	4,23	38,7	5,3
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>1749</b>	<b>2013</b>	-	<b>1075</b>	<b>57</b>	-	-
Concentration moyenne de P dans la boue				1,9	(g P/kg MT)			

Distance (m)	9.Nov.2007							
	Volume d'échantillon pompé (L)	Volume de boue récupérée (mL)	P récupéré dans la boue (mg P)	P récupéré par étang (%)	Matières totales (MT) récupérées dans la boue (g MT)	Matières volatiles totales (MVT) récupérées dans la boue (g MVT)	Siccité de boue (%)	Fraction volatile de boue (MVT/MT) (%)
1	10	300	423	13%	130	13,3	38,5	10,2
4	10	80	109	3%	68,1	2,29	59,2	3,4
7	10	9	4	0%	0,73	0,10	7,8	14,1
10	10	9,0	5	0%	1,29	0,11	13,2	8,7
13	10	15,0	8	0%	2,01	0,19	12,4	9,4
16 Aérateur	10	1020	1692	53%	446	52,6	38,5	11,8
19	10	8	4	0%	1,13	0,11	13,0	9,7
22	10	580	777	25%	315	21,1	45,1	6,7
25	10	100	114	4%	62,3	2,81	48,5	4,5
28	10	35	34	1%	13,3	0,77	31,8	5,8
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>2156</b>	<b>3169</b>	-	<b>1040</b>	<b>93</b>	-	-
Concentration de P moyenne dans la boue				3,0	(g P/kg MT)			

### Caractérisation mensuelle des boues de l'étang #3 (suite)

Distance (m)	30.Nov.2007							
	Volume d'échantillon pompé (L)	Volume de boue récupérée (mL)	P récupéré dans la boue (mg P)	P récupéré par étang (%)	Matières totales (MT) récupérées dans la boue (g MT)	Matières volatiles totales (MVT) récupérées dans la boue (g MVT)	Siccité de boue (%)	Fraction volatile de boue (MVT/MT) (%)
1	10	300	423	13%	112	11,18	-	9,9
4	10	20	10,6	0%	2,3	0,36	10,9	15,7
7	10	9	3,7	0%	0,98	0,10	-	9,9
10	10	4	1,0	0%	0,27	0,03	6,4	9,8
13	10	15	5,5	0%	1,5	0,13	9,5	8,9
16 Aérateur	10	1600	2809	85%	791	84	44,7	10,6
19	10	7	2,0	0%	0,56	0,06	7,6	10,0
22	10	15	9,3	0%	2,7	0,19	16,4	6,9
25	10	11	3,6	0%	0,96	0,10	8,3	10,2
28	10	35	34	1%	9,1	0,90	-	9,9
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>2016</b>	<b>3302</b>	<b>-</b>	<b>922</b>	<b>97</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
Concentration moyenne de P dans la boue			3,6	(g P/kg MT)				

Distance (m)	11.Avril.2008							
	Volume d'échantillon pompé (L)	Volume de boue récupérée (mL)	P récupéré dans la boue (mg P)	P récupéré par étang (%)	Matières totales (MT) récupérées dans la boue (g MT)	Matières volatiles totales (MVT) récupérées dans la boue (g MVT)	Siccité de boue (%)	Fraction volatile de boue (MVT/MT) (%)
1	11,5	174	144	2%	24,8	6,3	14,7	25,4
4	11,5	22	17	0%	3,0	0,5	12,9	15,9
7	11,8	82	98	1%	20,7	2,9	24,1	14,0
10	11,8	53	50	1%	18,6	1,4	29,3	7,4
13	12,0	50	65	1%	16,8	1,2	29,5	7,4
16 Aérateur	11,8	2800	5446	83%	963	143	33,0	14,8
19	10,8	195	289	4%	94,5	6,3	42,2	6,7
22	10,5	238	206	3%	96,4	8,7	35,9	9,1
25	10,8	39	30	0%	6,9	1,1	16,5	15,3
28	10,3	176	188	3%	131,4	5,0	55,0	3,8
<b>TOTAL</b>	<b>113</b>	<b>3828</b>	<b>6533</b>	<b>-</b>	<b>1377</b>	<b>176</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
Concentration moyenne de P dans la boue			4,7	(g P/kg MT)				

### ANNEXE 3: Résultats de la vidange annuelle 2006-2007

#### Résultats de la vidange annuelle de boue - Étang # 1

Période de production: 2006 - 2007  
Date: 2007-08-22

##### Caractérisation des échantillons de boue de vidange:

Identification	Siccité (%)	Matières totales (MT) (mg/L)	Matières volatiles totales (MVT) (mg/L)	Phosphore (Pt) (mg P/L)	Pt/ MT (g P/kg MT)	MVT/MT (%)
Échantillon de boue 1	2,04	20 413	12 140	265	13,0	59%
Échantillon de boue 2	1,98	19 500	12 227	295	15,1	63%
Échantillon de boue 3	2,08	20 460	12 480	288	14,1	61%
Échantillon de boue 4	2,07	20 453	12 480	334	16,3	61%
Valeur moyenne	2,04	20 207	12 332	295	14,6	61%

Paramètre	Unité	Valeurs
<b>Quantité récupérée dans la vidange annuelle:</b>		
Volume de boue	m <sup>3</sup>	4,6
Phosphore total (Pt)	kg	1,4
Matières totales (MT)	kg	93,3
Matières volatiles totales (MVT)	kg	56,9
<b>Production annuelle dans l'étang:</b>		
Production de biomasse	tonne	2,66
Quantité de moulée	tonne	2,92

#### Résultats de la vidange annuelle de boue - Étang #2

Période de production: 2006 - 2007  
Date: 2007-09-03

##### Caractérisation des échantillons de boue de vidange:

Identification	Siccité (%)	Matières totales (MT) (mg/L)	Matières volatiles totales (MVT) (mg/L)	Phosphore (Pt) (mg P/L)	Pt/ MT (g P/kg MT)	MVT/MT (%)
Échantillon de boue 1	5,68	55 713	32 433	1 176	21,1	58%
Échantillon de boue 2	5,92	56 733	32 000	982	17,3	56%
Échantillon de boue 3	5,84	55 493	31 867	948	17,1	57%
Échantillon de boue 4	5,78	55 587	31 913	912	16,4	57%
Valeur moyenne	5,81	55 882	32 053	1 004	18,0	57%

Paramètre	Unité	Valeurs
<b>Quantité récupérée dans la vidange annuelle:</b>		
Volume de boue	m <sup>3</sup>	2,6
Phosphore total (Pt)	kg	2,7
Matières totales (MT)	kg	147,9
Matières volatiles totales (MVT)	kg	84,8
<b>Production annuelle dans l'étang:</b>		
Production de biomasse	tonne	3,23
Quantité de moulée	tonne	3,55

## ANNEXE 4: Résultats de la vidange annuelle 2007-2008

### Résultats de la vidange annuelle de boue - Étang # 1

Période de production: 2007 - 2008  
Date: 2008-05-16

#### Caractérisation des échantillons de boue de vidange:

Identification	Siccité (%)	Matières totales (MT) (mg/L)	Matières volatiles totales (MVT) (mg/L)	Phosphore (Pt) (mg P/L)	Pt/ MT (g P/kg MT)	MVT/MT (%)
Echantillon de boue 1	2,96	27 513	19 127	605	22,0	70%
Echantillon de boue 2	3,04	30 430	20 940	623	20,5	69%
Echantillon de boue 3	3,04	29 513	20 440	615	20,8	69%
Echantillon de boue 4	3,08	30 887	21 253	620	20,1	69%
Valeur moyenne	3,03	29 586	20 440	616	20,8	69%

Paramètre	Unité	Valeurs
<b>Quantité récupérée dans la vidange annuelle:</b>		
Volume de boue	m <sup>3</sup>	2,3
Phosphore total (Pt)	kg	1,4
Matières totales (MT)	kg	68,1
Matières volatiles totales (MVT)	kg	47,1
<b>Production annuelle dans l'étang:</b>		
Production de biomasse	tonne	1,82
Quantité de moulée	tonne	1,77

### Résultats de la vidange annuelle de boue - Étang # 2

Période de production: 2007 - 2008  
Date: 2008-06-05

#### Caractérisation des échantillons de boue de vidange:

Identification	Siccité (%)	Matières totales (MT) (mg/L)	Matières volatiles totales (MVT) (mg/L)	Phosphore (Pt) (mg P/L)	Pt/ MT (g P/kg MT)	MVT/MT (%)
Echantillon de boue 1	2,44	24 427	15 487	515	21,1	63%
Echantillon de boue 2	2,62	26 267	16 320	572	21,8	62%
Echantillon de boue 3	2,54	25 653	16 000	573	22,3	62%
Echantillon de boue 4	2,69	27 080	16 833	605	22,3	62%
Valeur moyenne	2,57	25 857	16 160	566	21,9	63%

Paramètre	Unité	Valeurs
<b>Quantité récupérée dans la vidange annuelle:</b>		
Volume de boue	m <sup>3</sup>	2,1
Phosphore total (Pt)	kg	1,2
Matières totales (MT)	kg	55,2
Matières volatiles totales (MVT)	kg	34,5
<b>Production annuelle dans l'étang:</b>		
Production de biomasse	tonne	2,04
Quantité de moulée	tonne	1,98

## Résultats de la vidange annuelle 2007-2008 (suite)

### Résultats de la vidange annuelle de (boue + sol) - Étang # 3

**Période de production:** 2007 - 2008  
**Date:** 2008-05-03

#### Caractérisation des échantillons de (boue + sol) de vidange:

Identification	Siccité (%)	Matières totales (MT) (mg/g boue) *	Matières volatiles totales (MVT) (mg/g boue) *	Phosphore (Pt) (g P/kg boue) *	Pt / MT (g P /kg MT)	MVT/MT (%)	densité moyen de boue+sol (g/mL)
Échantillon de boue+sol 1	73,2	732	17	1,215	1,7	2,3%	1,8
Échantillon de boue+sol 2	76,4	764	13	0,8	1,0	1,7%	1,8
Échantillon de boue+sol 3	76,7	767	13	1,8	2,4	1,7%	1,9
Échantillon de boue+sol 4	59,5	595	29	1,7	2,9	5,0%	1,5
Échantillon de boue+sol 5	59,8	598	30	1,8	3,0	5,0%	1,5
Échantillon de boue+sol 6	60,7	607	33	2,1	3,5	5,4%	1,5
Échantillon de boue+sol 7	71,8	718	17	1,4	2,0	2,4%	1,8
Échantillon de boue+sol 8	79,5	795	14	1,2	1,5	1,7%	1,9
Échantillon de boue+sol 9	74,4	744	21	1,0	1,3	2,8%	1,8
<b>Valeur moyenne</b>	<b>70,2</b>	<b>702</b>	<b>21</b>	<b>1,5</b>	<b>2,2</b>	<b>3,1%</b>	<b>1,7</b>

\* g boue = g (boue + sol)

Paramètre	Unité	Valeurs
<b>Quantité récupérée dans la vidange annuelle:</b>		
Volume de (boue +sol)	m <sup>3</sup>	7,0
Masse de (boue + sol)	kg	12 210
Phosphore total (Pt)	kg	17,1
Matières totales (MT)	kg	8 671
Matières volatiles totales (MVT)	kg	246
<b>Production annuelle dans l'étang:</b>		
Production de biomasse	tonne	1,11
Quantité de moulée	tonne	1,36

**ANNEXE 5: Registre de moulée par étang 2007-2008**

Mois	Date	Jour	Étang 1		Étang 2		Étang 3	
			Moulée (kg)	Type de moulée	Moulée (kg)	Type de moulée	Moulée (kg)	Type de moulée
août-07	2007-08-14	Mardi						vidange 2007
	2007-08-15	Mercredi					4	poisson 3-5"
	2007-08-16	Jeudi					4	optimum #3
	2007-08-17	Vendredi					4	optimum #3
	2007-08-18	Samedi					4	optimum #3
	2007-08-19	Dimanche					4	optimum #3
	2007-08-20	Lundi					4	optimum #3
	2007-08-21	Mardi					4	optimum #3
	2007-08-22	Mercredi		vidange 2007			4	optimum #3
	2007-08-23	Jeudi					4	optimum #3
	2007-08-24	Vendredi					4	optimum #3
	2007-08-25	Samedi					4	optimum #3
	2007-08-26	Dimanche					5	optimum #3
	2007-08-27	Lundi		poisson 6"			0	optimum #3
sept-07	2007-08-28	Mardi	5	optimum #3			0	optimum #3
	2007-08-29	Mercredi	5	optimum #3			5	optimum #3
	2007-08-30	Jeudi	5	optimum #3			5	optimum #3
	2007-08-31	Vendredi	5	optimum #3			5	optimum #3
	2007-09-01	Samedi	5	optimum #3			5	optimum #3
	2007-09-02	Dimanche	5	optimum #3			5	optimum #3
	2007-09-03	Lundi	5	optimum #3		vidange 2007	0	optimum #3
	2007-09-04	Mardi	5	optimum #3			0	optimum #3
	2007-09-05	Mercredi	5	optimum #3			5	optimum #3
	2007-09-06	Jeudi	5	optimum #3			5	optimum #3
	2007-09-07	Vendredi	5	optimum #3			5	optimum #3
	2007-09-08	Samedi	8	optimum #3	8	poisson 5"	5	optimum #3
	2007-09-09	Dimanche	8	optimum #3	8	optimum #3	8	optimum #3
	2007-09-10	Lundi	8	optimum #3	8	optimum #3	0	optimum #3
	2007-09-11	Mardi	8	optimum #3	8	optimum #3	0	optimum #3
	2007-09-12	Mercredi	8	optimum #3	8	optimum #3	8	optimum #3
	2007-09-13	Jeudi	8	optimum #3	8	optimum #3	8	optimum #3
	2007-09-14	Vendredi	0	optimum #3	0	optimum #3	0	optimum #3
	2007-09-15	Samedi	8	optimum #3	8	optimum #3	8	optimum #3
	2007-09-16	Dimanche	8	optimum #3	8	optimum #3	8	optimum #3
	2007-09-17	Lundi	8	optimum #3	8	optimum #3	0	optimum #3
	2007-09-18	Mardi	8	optimum #3	8	optimum #3	0	optimum #3
	2007-09-19	Mercredi	8	optimum #3	8	optimum #3	8	optimum #3
	2007-09-20	Jeudi	12	optimum #3	12	optimum #3	12	optimum #3
	2007-09-21	Vendredi	12	optimum #3	12	optimum #3	12	optimum #3
	2007-09-22	Samedi	12	optimum #3	12	optimum #3	12	optimum #3
	2007-09-23	Dimanche	12	optimum #3	12	optimum #3	12	optimum #3

Mois	Date	Jour	Étang 1		Étang 2		Étang 3	
			Moulée (kg)	Type de moulée	Moulée (kg)	Type de moulée	Moulée (kg)	Type de moulée
oct-07	2007-09-24	Lundi	12	optimum #3	12	optimum #3	0	optimum #3
	2007-09-25	Mardi	12	optimum #3	12	optimum #3	0	optimum #3
	2007-09-26	Mercredi	12	optimum #3	12	optimum #3	6	optimum #3
	2007-09-27	Jeudi	6	optimum #3	6	optimum #3	12	optimum #3
	2007-09-28	Vendredi	12	optimum #3	12	optimum #3	12	optimum #3
	2007-09-29	Samedi	6	optimum #3	6	optimum #3	6	optimum #3
	2007-09-30	Dimanche	12	optimum #3	12	optimum #3	12	optimum #3
	2007-10-01	Lundi	12	optimum #3	12	optimum #3	0	optimum #3
	2007-10-02	Mardi	12	optimum #3	12	optimum #3	0	optimum #3
	2007-10-03	Mercredi	6	optimum #3	6	optimum #3	6	optimum #3
	2007-10-04	Jeudi	6	optimum #3	6	optimum #3	12	optimum #3
	2007-10-05	Vendredi	12	optimum #3	12	optimum #3	12	optimum #3
	2007-10-06	Samedi	6	optimum #3	6	optimum #3	6	optimum #3
	2007-10-07	Dimanche	16	optimum #3	16	optimum #3	16	optimum #3
	2007-10-08	Lundi	0	optimum #3	0	optimum #3	0	optimum #3
	2007-10-09	Mardi	0	optimum #3	0	optimum #3	0	optimum #3
	2007-10-10	Mercredi	0	optimum #3	0	optimum #3	0	optimum #3
	2007-10-11	Jeudi	16	optimum #3	16	optimum #3	16	optimum #3
	2007-10-12	Vendredi	16	optimum #3	16	optimum #3	16	optimum #3
	2007-10-13	Samedi	16	optimum #3	16	optimum #3	16	optimum #3
	2007-10-14	Dimanche	16	optimum #3	16	optimum #3	16	optimum #3
	2007-10-15	Lundi	16	optimum #3	16	optimum #3	16	optimum #3
	2007-10-16	Mardi	16	optimum #3	16	optimum #3	16	optimum #3
	2007-10-17	Mercredi	0	optimum #3	0	optimum #3	0	optimum #3
	2007-10-18	Jeudi	0	optimum #3	0	optimum #3	0	optimum #3
	2007-10-19	Vendredi	0	optimum #3	0	optimum #3	0	optimum #3
	2007-10-20	Samedi	0	optimum #3	0	optimum #3	0	optimum #3
	2007-10-21	Dimanche	16	optimum #3	16	optimum #3	16	optimum #3
	2007-10-22	Lundi	16	optimum #3	16	optimum #3	16	optimum #3
	2007-10-23	Mardi	16	optimum #3	16	optimum #3	16	optimum #3
	2007-10-24	Mercredi	16	optimum #3	16	optimum #3	16	optimum #3
	2007-10-25	Jeudi	16	optimum #3	16	optimum #3	16	optimum #3
	2007-10-26	Vendredi	16	optimum #3	16	optimum #3	16	optimum #3
	2007-10-27	Samedi	0	optimum #3	0	optimum #3	0	optimum #3
	2007-10-28	Dimanche	10	optimum #4	10	optimum #4	10	optimum #4
	2007-10-29	Lundi	10	optimum #4	10	optimum #4	10	optimum #4
	2007-10-30	Mardi	10	optimum #4	10	optimum #4	10	optimum #4
	2007-10-31	Mercredi	10	optimum #4	10	optimum #4	10	optimum #4
nov-07	2007-11-01	Jeudi	10	optimum #4	10	optimum #4	10	optimum #4
	2007-11-02	Vendredi	10	optimum #4	10	optimum #4	10	optimum #4
	2007-11-03	Samedi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2007-11-04	Dimanche	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4

Mois	Date	Jour	Étang 1		Étang 2		Étang 3	
			Moulée (kg)	Type de moulée	Moulée (kg)	Type de moulée	Moulée (kg)	Type de moulée
déc- 2007	2007-11-05	Lundi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-11-06	Mardi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-11-07	Mercredi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-11-08	Jeudi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-11-09	Vendredi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-11-10	Samedi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2007-11-11	Dimanche	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-11-12	Lundi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-11-13	Mardi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-11-14	Mercredi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-11-15	Jeudi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-11-16	Vendredi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-11-17	Samedi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2007-11-18	Dimanche	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-11-19	Lundi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-11-20	Mardi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-11-21	Mercredi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-11-22	Jeudi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-11-23	Vendredi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-11-24	Samedi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2007-11-25	Dimanche	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-11-26	Lundi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-11-27	Mardi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-11-28	Mercredi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-11-29	Jeudi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-11-30	Vendredi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-12-01	Samedi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2007-12-02	Dimanche	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-12-03	Lundi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-12-04	Mardi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-12-05	Mercredi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-12-06	Jeudi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-12-07	Vendredi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2007-12-08	Samedi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2007-12-09	Dimanche	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-12-10	Lundi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-12-11	Mardi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-12-12	Mercredi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-12-13	Jeudi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-12-14	Vendredi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2007-12-15	Samedi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2007-12-16	Dimanche	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4

Mois	Date	Jour	Étang 1		Étang 2		Étang 3	
			Moulée (kg)	Type de moulée	Moulée (kg)	Type de moulée	Moulée (kg)	Type de moulée
	2007-12-17	Lundi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-12-18	Mardi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-12-19	Mercredi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-12-20	Jeudi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-12-21	Vendredi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2007-12-22	Samedi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2007-12-23	Dimanche	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-12-24	Lundi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-12-25	Mardi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-12-26	Mercredi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-12-27	Jeudi	8	optimum #4	8	optimum #4	8	optimum #4
	2007-12-28	Vendredi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2007-12-29	Samedi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2007-12-30	Dimanche	5	optimum #4	5	optimum #4	5	optimum #4
	2007-12-31	Lundi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
janv-08	2008-01-01	Mardi	5	optimum #4	5	optimum #4	5	optimum #4
	2008-01-02	Mercredi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-01-03	Jeudi	5	optimum #4	5	optimum #4	5	optimum #4
	2008-01-04	Vendredi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-01-05	Samedi	5	optimum #4	5	optimum #4	5	optimum #4
	2008-01-06	Dimanche	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-01-07	Lundi	5	optimum #4	5	optimum #4	5	optimum #4
	2008-01-08	Mardi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-01-09	Mercredi	5	optimum #4	5	optimum #4	5	optimum #4
	2008-01-10	Jeudi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-01-11	Vendredi	5	optimum #4	5	optimum #4	5	optimum #4
	2008-01-12	Samedi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-01-13	Dimanche	5	optimum #4	5	optimum #4	5	optimum #4
	2008-01-14	Lundi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-01-15	Mardi	5	optimum #4	5	optimum #4	5	optimum #4
	2008-01-16	Mercredi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-01-17	Jeudi	5	optimum #4	5	optimum #4	5	optimum #4
	2008-01-18	Vendredi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-01-19	Samedi	5	optimum #4	5	optimum #4	5	optimum #4
	2008-01-20	Dimanche	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-01-21	Lundi	5	optimum #4	5	optimum #4	5	optimum #4
	2008-01-22	Mardi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-01-23	Mercredi	5	optimum #4	5	optimum #4	5	optimum #4
	2008-01-24	Jeudi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-01-25	Vendredi	5	optimum #4	5	optimum #4	5	optimum #4
	2008-01-26	Samedi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-01-27	Dimanche	5	optimum #4	5	optimum #4	5	optimum #4

Mois	Date	Jour	Étang 1		Étang 2		Étang 3	
			Moulée (kg)	Type de moulée	Moulée (kg)	Type de moulée	Moulée (kg)	Type de moulée
janvier 2008	2008-01-28	Lundi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-01-29	Mardi	5	optimum #4	5	optimum #4	5	optimum #4
	2008-01-30	Mercredi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-01-31	Jeudi	5	optimum #4	5	optimum #4	5	optimum #4
fevrier 2008	2008-02-01	Vendredi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-02-02	Samedi	5	optimum #4	5	optimum #4	5	optimum #4
	2008-02-03	Dimanche	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-02-04	Lundi	5	optimum #4	5	optimum #4	5	optimum #4
	2008-02-05	Mardi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-02-06	Mercredi	5	optimum #4	5	optimum #4	5	optimum #4
	2008-02-07	Jeudi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-02-08	Vendredi	5	optimum #4	5	optimum #4	5	optimum #4
	2008-02-09	Samedi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-02-10	Dimanche	5	optimum #4	5	optimum #4	0	optimum #4
	2008-02-11	Lundi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-02-12	Mardi	5	optimum #4	5	optimum #4	0	optimum #4
	2008-02-13	Mercredi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-02-14	Jeudi	5	optimum #4	5	optimum #4	0	optimum #4
	2008-02-15	Vendredi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-02-16	Samedi	5	optimum #4	5	optimum #4	0	optimum #4
	2008-02-17	Dimanche	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-02-18	Lundi	5	optimum #4	5	optimum #4	0	optimum #4
	2008-02-19	Mardi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-02-20	Mercredi	5	optimum #4	5	optimum #4	0	optimum #4
	2008-02-21	Jeudi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-02-22	Vendredi	5	optimum #4	5	optimum #4	0	optimum #4
	2008-02-23	Samedi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-02-24	Dimanche	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-02-25	Lundi	5	optimum #4	5	optimum #4	5	optimum #4
	2008-02-26	Mardi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-02-27	Mercredi	5	optimum #4	5	optimum #4	5	optimum #4
	2008-02-28	Jeudi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-02-29	Vendredi	5	optimum #4	5	optimum #4	5	optimum #4
mars-08	2008-03-01	Samedi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-03-02	Dimanche	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-03-03	Lundi	5	optimum #4	5	optimum #4	5	optimum #4
	2008-03-04	Mardi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-03-05	Mercredi	5	optimum #4	5	optimum #4	5	optimum #4
	2008-03-06	Jeudi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-03-07	Vendredi	5	optimum #4	5	optimum #4	5	optimum #4
	2008-03-08	Samedi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-03-09	Dimanche	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4

Mois	Date	Jour	Étang 1		Étang 2		Étang 3	
			Moulée (kg)	Type de moulée	Moulée (kg)	Type de moulée	Moulée (kg)	Type de moulée
avr-08	2008-03-10	Lundi	5	optimum #4	5	optimum #4	5	optimum #4
	2008-03-11	Mardi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-03-12	Mercredi	5	optimum #4	5	optimum #4	5	optimum #4
	2008-03-13	Jeudi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-03-14	Vendredi	5	optimum #4	5	optimum #4	5	optimum #4
	2008-03-15	Samedi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-03-16	Dimanche	7	optimum #4	7	optimum #4	7	optimum #4
	2008-03-17	Lundi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-03-18	Mardi	7	optimum #4	7	optimum #4	7	optimum #4
	2008-03-19	Mercredi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-03-20	Jeudi	7	optimum #4	7	optimum #4	7	optimum #4
	2008-03-21	Vendredi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-03-22	Samedi	7	optimum #4	7	optimum #4	7	optimum #4
	2008-03-23	Dimanche	7	optimum #4	7	optimum #4	7	optimum #4
	2008-03-24	Lundi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-03-25	Mardi	12	optimum #4	12	optimum #4	12	optimum #4
	2008-03-26	Mercredi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-03-27	Jeudi	12	optimum #4	12	optimum #4	12	optimum #4
	2008-03-28	Vendredi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-03-29	Samedi	12	optimum #4	12	optimum #4	12	optimum #4
	2008-03-30	Dimanche	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-03-31	Lundi	12	optimum #4	12	optimum #4	12	optimum #4
	2008-04-01	Mardi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-04-02	Mercredi	12	optimum #4	12	optimum #4	12	optimum #4
	2008-04-03	Jeudi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-04-04	Vendredi	12	optimum #4	12	optimum #4	12	optimum #4
	2008-04-05	Samedi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-04-06	Dimanche	12	optimum #4	12	optimum #4	12	optimum #4
	2008-04-07	Lundi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-04-08	Mardi	12	optimum #4	12	optimum #4	12	optimum #4
	2008-04-09	Mercredi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-04-10	Jeudi	12	optimum #4	12	optimum #4	12	optimum #4
	2008-04-11	Vendredi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-04-12	Samedi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-04-13	Dimanche	10	optimum #4	10	optimum #4	10	optimum #4
	2008-04-14	Lundi	20	optimum #4	20	optimum #4	20	optimum #4
	2008-04-15	Mardi	20	optimum #4	20	optimum #4	20	optimum #4
	2008-04-16	Mercredi	20	optimum #4	20	optimum #4	20	optimum #4
	2008-04-17	Jeudi	20	optimum #4	20	optimum #4	20	optimum #4
	2008-04-18	Vendredi	20	optimum #4	20	optimum #4	20	optimum #4
	2008-04-19	Samedi	0	optimum #4	0	optimum #4	0	optimum #4
	2008-04-20	Dimanche	20	optimum #4	20	optimum #4	20	optimum #4

Mois	Date	Jour	Étang 1		Étang 2		Étang 3	
			Moulée (kg)	Type de moulée	Moulée (kg)	Type de moulée	Moulée (kg)	Type de moulée
mai-08	2008-04-21	Lundi	20	optimum #4	20	optimum #4	20	optimum #4
	2008-04-22	Mardi	20	optimum #4	20	optimum #4	20	optimum #4
	2008-04-23	Mercredi	20	optimum #4	20	optimum #4	0	optimum #5
	2008-04-24	Jeudi	20	optimum #4	20	optimum #4		poisson 6", 9"
	2008-04-25	Vendredi	20	optimum #4	20	optimum #4		
	2008-04-26	Samedi	20	optimum #4	20	optimum #4		
	2008-04-27	Dimanche	0	optimum #4	0	optimum #4		
	2008-04-28	Lundi	20	optimum #4	20	optimum #4		
	2008-04-29	Mardi	20	optimum #4	20	optimum #4		
	2008-04-30	Mercredi	20	optimum #4	20	optimum #4		
mai-08	2008-05-01	Jeudi	20	optimum #4	20	optimum #4		
	2008-05-02	Vendredi	20	optimum #4	20	optimum #4		
	2008-05-03	Samedi	20	optimum #4	20	optimum #4		
	2008-05-04	Dimanche	0	optimum #4	0	optimum #4		vidange boues
	2008-05-05	Lundi	20	optimum #4	20	optimum #4		
	2008-05-06	Mardi	20	optimum #4	20	optimum #4		
	2008-05-07	Mercredi	20	optimum #4	20	optimum #4		
	2008-05-08	Jeudi	20	optimum #4	20	optimum #4		
	2008-05-09	Vendredi	20	optimum #4	20	optimum #4		
	2008-05-10	Samedi	20	optimum #4	20	optimum #4		
	2008-05-11	Dimanche	0	optimum #4	0	optimum #4		
	2008-05-12	Lundi	0	optimum #4	20	optimum #4		
	2008-05-13	Mardi	10	optimum #4	20	optimum #4		
	2008-05-14	Mercredi		poisson 7", 8", 11"	20	optimum #4		
	2008-05-15	Jeudi			20	optimum #4		
	2008-05-16	Vendredi		vidange boues	20	optimum #4		
	2008-05-17	Samedi			0	optimum #4		
	2008-05-18	Dimanche			20	optimum #4		
	2008-05-19	Lundi			20	optimum #4		
	2008-05-20	Mardi			20	optimum #4		
	2008-05-21	Mercredi			0	optimum #4		
	2008-05-22	Jeudi			20	optimum #4		
	2008-05-23	Vendredi			20	optimum #4		
	2008-05-24	Samedi			20	optimum #4		
	2008-05-25	Dimanche			0	optimum #4		
	2008-05-26	Lundi			20	optimum #4		
	2008-05-27	Mardi			20	optimum #4		
	2008-05-28	Mercredi			20	optimum #4		
	2008-05-29	Jeudi				poisson 10", 11"		
	2008-05-30	Vendredi						
	2008-05-31	Samedi						

Mois	Date	Jour	Étang 1		Étang 2		Étang 3	
			Moulée (kg)	Type de moulée	Moulée (kg)	Type de moulée	Moulée (kg)	Type de moulée
<b>juin-08</b>	2008-06-01	Dimanche						
	2008-06-02	Lundi						
	2008-06-03	Mardi						
	2008-06-04	Mercredi						
	2008-06-05	Jeudi				vidange boues		
	2008-06-06	Vendredi						
	2008-06-07	Samedi						
<b>TOTAL MOULÉE (kg)</b>			<b>Étang 2</b>		<b>Étang 6</b>		<b>Étang 9</b>	
			<b>1 765</b>	opt. #3 & #4	<b>1 980</b>	opt. #3 & #4	<b>1 360</b>	opt. #3 & #4

**ANNEXE 6: Registre de poissons dans l'étang #1 (2007-2008)**
**Espèce: Truite arc-en-ciel**

Mois	Date	Jour	Entrée de poissons (nombre)	Sortie de poissons (nombre)	Inventaire de poissons (nombre)	grandeur moyen (po)	poids de poisson (g)	période (jours)	Kg accumulés de poissons ajouté	Kg accumulés de poissons enlevé	Kg de poisson produit
<b>août-07</b>	2007-08-26	Dimanche									
	2007-08-27	Lundi	1900		1900	6	45,1	1	86	0	-86
	2007-08-28	Mardi	500		2400	6	45,1	2	108	0	-108
	2007-08-29	Mercredi			2400			3	108	0	-108
	2007-09-06	Jeudi			2400			11	108	0	-108
	2007-09-07	Vendredi	2400		4800	6	45,1	12	216	0	-216
	2007-09-08	Samedi	2600		7400	6	45,1	13	334	0	-334
	2007-09-09	Dimanche			7400			14	334	0	-334
	2007-09-18	Mardi			7400			23	334	0	-334
	2007-09-19	Mercredi	4000		11400	6	45,1	24	514	0	-514
	2007-09-20	Jeudi	1140 (*)		12540	6	45,1	25	566	0	-566
	2007-09-21	Vendredi		11400			79,5	26	566	91	-475
	2007-09-22	Samedi		11400				27	566	91	-475
	2007-10-02	Mardi		11400				37	566	91	-475
<b>sept-07</b>	2007-10-03	Mercredi		400	11000	7,3	82,9	38	566	124	-442
	2007-10-04	Jeudi		1000	10000	7,3	82,9	39	566	207	-359
	2007-10-05	Vendredi			10000			40	566	207	-359
	2007-10-25	Jeudi			10000			60	566	207	-359
	2007-10-26	Vendredi			10000	7,4	87,0	61	566	207	-359
	2007-10-27	Samedi			10000			62	566	207	-359
	2008-04-24	Jeudi			10000			242	566	207	-359
	2008-04-25	Vendredi		300	9700	11	283,5	243	566	292	-274
	2008-04-26	Samedi			9700			244	566	292	-274
	2008-05-11	Dimanche			9700			259	566	292	-274
<b>mai-08</b>	2008-05-12	Lundi		1000	8700	8	109,1	260	566	401	-165
	2008-05-13	Mardi		3000	5700	11	283,5	261	566	1251	686
	2008-05-14	Mercredi		1500	4200	11	283,5	262	566	1677	1111
	2008-05-15	Jeudi		1500	2700	11	283,5	263	566	2102	1536
	2008-05-16	Vendredi		2300	400	8	109,1	264	566	2353	1787
	2008-05-17	Samedi		400	0	7	73,1	265	566	2382	1817
	<b>TOTAL</b>		12540	12540				<b>265</b>	<b>566</b>	<b>2382</b>	<b>1817</b>
								<b>semaines</b>	<b>38</b>		

(\*) Représente 10% du nombre de poissons d'entrée qui ont été perdu par mortalité et prédatation. Cette quantité a été ajoutée au nombre de poissons enregistrés par le pisciculteur

### ANNEXE 7: Registre de poissons dans l'étang # 2 (2007-2008)

#### Espèce: Truite arc-en-ciel

Mois	Date	Jour	Entrée de poissons (nombre)	Sortie de poissons (nombre)	Inventaire de poissons (nombre)	grandeur moyen (po)	poids de poisson (g)	période (jours)	Kg accumulés de poissons ajouté	Kg accumulés de poissons enlevé	Kg de poisson produit
sept-07	2007-09-06	Jeudi			4700	5	27	1	125	0	-125
	2007-09-07	Vendredi	4700		8700	5	27	2	232	0	-232
	2007-09-08	Samedi	4000		8700			12	232	0	-232
	2007-09-18	Mardi			9700						
	2007-09-19	Mercredi	1000		9700	5,8	40	13	272	0	-272
	2007-09-20	Jeudi			9700			14	272	0	-272
	2007-09-21	Vendredi	970 (*)		10670	5	27	15	298	0	-298
	2007-09-22	Samedi		970 (*)	9700		86	16	298	83	-215
	2007-09-23	Dimanche			9700			17	298	83	-215
	2007-10-02	Mardi			9700			26	298	83	-215
	2007-10-03	Mercredi	400		9300	6,8	66	27	298	109	-189
	2007-10-04	Jeudi	400		8900	6,8	66	28	298	135	-163
	2007-10-05	Vendredi			8900			29	298	135	-163
	2007-10-25	Jeudi			8900			49	298	135	-163
	2007-10-26	Vendredi			8900	7	80	50	298	135	-163
	2007-10-27	Samedi			8900			51	298	135	-163
oct-07	2008-05-11	Dimanche			8900			248	298	135	-163
	2008-05-12	Lundi	1000		9900	8	109	249	407	135	-272
	2008-05-13	Mardi			9900			250	407	135	-272
	2008-05-27	Mardi			9900			264	407	135	-272
	2008-05-28	Mercredi	1500		8400	10	213	265	407	455	48
	2008-05-29	Jeudi	2000		6400	10	213	266	407	881	474
	2008-05-30	Vendredi	600		5800	10	213	267	407	1009	602
	2008-05-31	Samedi			5800			268	407	1009	602
	2008-06-01	Dimanche	1400		4400	11	284	269	407	1406	999
	2008-06-02	Lundi	2900		1500	10	213	270	407	2024	1617
	2008-06-03	Mardi	1500	0	0	11	284	271	407	2449	2042
<b>TOTAL</b>			11670	11670				<b>271</b>	<b>407</b>	<b>2449</b>	<b>2042</b>
								<b>semaines</b>	<b>39</b>		

(\*) Représente 10% du nombre de poissons d'entrée qui ont été perdu par mortalité et prédatation. Cette quantité a été ajoutée au nombre de poissons enregistrés par le pisciculteur

**ANNEXE 8: Registre de poissons dans l'étang # 3 (2007-2008)**

**Espèce: Truite arc-en-ciel**

Mois	Date	Jour	Entrée de poissons (nombre)	Sortie de poissons (nombre)	Inventaire de poissons (nombre)	grandeur moyen (po)	poids de poisson (g)	période (jours)	Kg accumulés de poissons ajouté	Kg accumulés de poissons enlevé	Kg de poisson produit
août-07	2007-08-15	Mercredi	10000		10000	3	5,8	1	58	0	-58
	2007-08-16	Jeudi			10000			2	58	0	-58
	2007-08-17	Vendredi	1500 (*)		11500	3	5,8	3	66	0	-66
	2007-08-18	Samedi			10000		49,8	4	66	75	9
	2007-08-19	Dimanche			10000			5	66	75	9
	2007-10-05	Vendredi			10000			52	66	75	9
oct-07	2007-10-06	Samedi			9250	5	26,6	53	66	95	29
	2007-10-07	Dimanche			9250			54	66	95	29
	2007-10-12	Vendredi			9250			59	66	95	29
	2007-10-13	Samedi			9000	5	26,6	60	66	101	35
	2007-10-14	Dimanche			9000			61	66	101	35
	2007-10-25	Jeudi			9000			72	66	101	35
	2007-10-26	Vendredi			9000			79,0	73	101	35
	2007-10-27	Samedi			9000			74	66	101	35
	2008-04-22	Mardi			9000			252	66	101	35
	2008-04-23	Mercredi			6000	6	48,4	253	66	246	180
	2008-04-24	Jeudi			0	9	155	254	66	1178	1112
		TOTAL		11500	11500			254	66	1178	1112
								semaines	36		

(\*) Représente 10% du nombre de poissons d'entrée qui ont été perdu par mortalité et prédatation. Cette quantité a été ajoutée au nombre de poissons enregistrés par le pisciculteur

**ANNEXE 9: Registre de poissons dans l'étang géniteur (2007-2008)**

**Espèce: Omble de fontaine**

Étang	Espèce	Entrée de poissons (nombre)	Sortie de poissons (nombre)	Inventaire de poissons (nombre)	grandeur moyen (po)	poids de poisson (g)	période (jours)	Kg accumulés de poissons ajouté	Kg accumulés de poissons enlevé	Kg de poisson produit
Étang géniteur (en terre)	Omble de fontaine	550	550	550	15,0 0	619 1 259	0 270	341 341	0 692	352
<b>TOTAL</b>		<b>550</b>	<b>550</b>				<b>270</b>	<b>341</b>	<b>692</b>	<b>352</b>
						semaines	<b>39</b>			

Poisson produit dans l'étang géniteur	352 kg/a
Concentration de P dans le poisson	4,2 g P/kg poisson
Phosphore dans le poisson	1,48 kg P/a
Taux conversion alimentaire	1,22 g moulée/g poisson
Moulée ajouté dans l'étang géniteur	430 kg/a
% de P dans la moulée	0,98 %
Phosphore dans la moulée distribuée (période 2007-2008)	4,19 kg P/a

**ANNEXE 10: Mesures de débit dans les étangs**

Étang	Surface d'eau de l'étang (m <sup>2</sup> )	Volume d'eau de l'étang (m <sup>3</sup> )	Débit (m <sup>3</sup> /d)					
			2006 - 2007		2007 - 2008			
			08-jun-07	13-oct-07	10-nov-07	30-nov-07	11-avr-08	09-mai-08
Étang 1	109	115	399	258	613	343	399	428
Étang 2	135	148	-	411	524	352	651	716
Étang 3	229	246	-	219	206	351	238	Vide

**ANNEXE 11: Caractéristiques des aérateurs de surface des étangs d'élevage**

Nom: *Floating aerators for aquaculture applications* (Air-o-lator, 2008)

Moteur submersible :*Franklin Electric motor*

Rotation du moteur: 3450 rpm

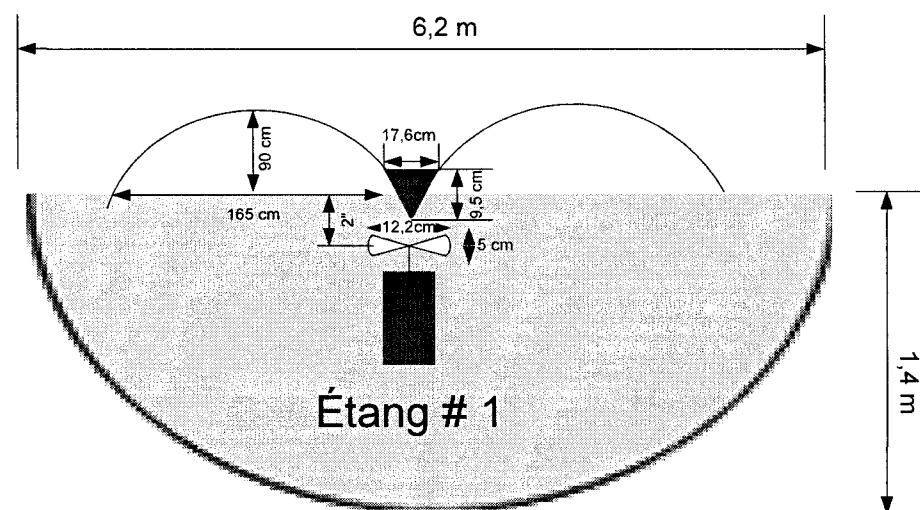
Puissance : 0,5 HP

Voltage : 230 volts

Débit de refoulement : 500 GPM (1890 LPM)

**Étang #1 :**

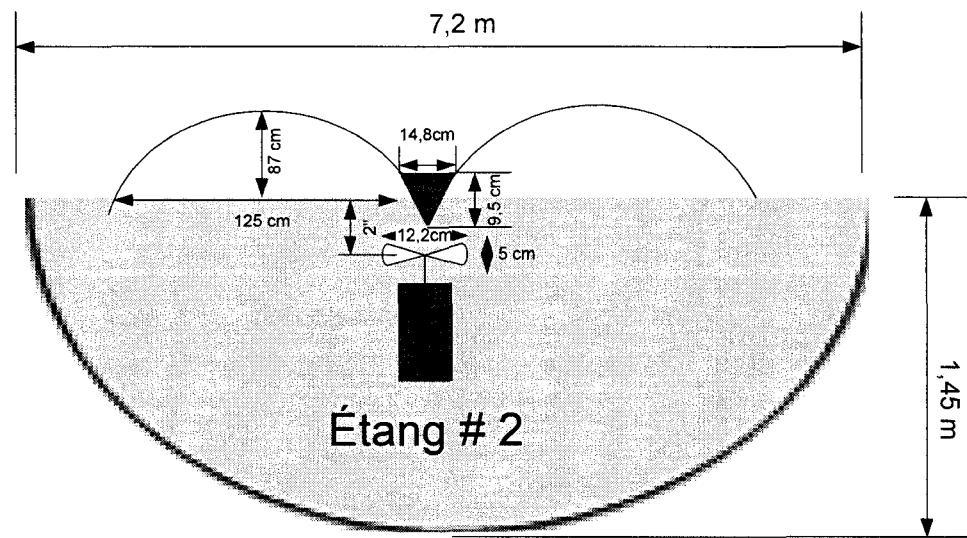
Volume total d'eau : 115 m<sup>3</sup>



### Caractéristiques des aérateurs de surface des étangs d'élevage (suite)

#### Étang #2 :

Volume total d'eau :  $148 \text{ m}^3$



#### Étang #3 :

Volume total d'eau :  $246 \text{ m}^3$

