



HAL
open science

Mise en place expérimentale d'une intensification écologique de la pisciculture d'étang

Matthieu Adam

► **To cite this version:**

Matthieu Adam. Mise en place expérimentale d'une intensification écologique de la pisciculture d'étang. Sciences agricoles. 2013. dumas-01071988

HAL Id: dumas-01071988

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01071988>

Submitted on 7 Oct 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



AGROCAMPUS OUEST
CFR Rennes
65 rue de Saint-Brieuc
CS 84215
35 042 Rennes Cedex
02.23.48.50.00

ENSAIA
Université de Lorraine
2 avenue de la Forêt de Haye
54 505 Vandœuvre-lès-Nancy
03.83.44.32.60

ITAVI
Service aquaculture
28 rue du Rocher
75 008 Paris
01.45.22.62.40

INRA
UMR SAS
65 Rue de Saint-Brieuc
35 000 Rennes
02.23.48.54.22

Mémoire de Fin d'Etudes

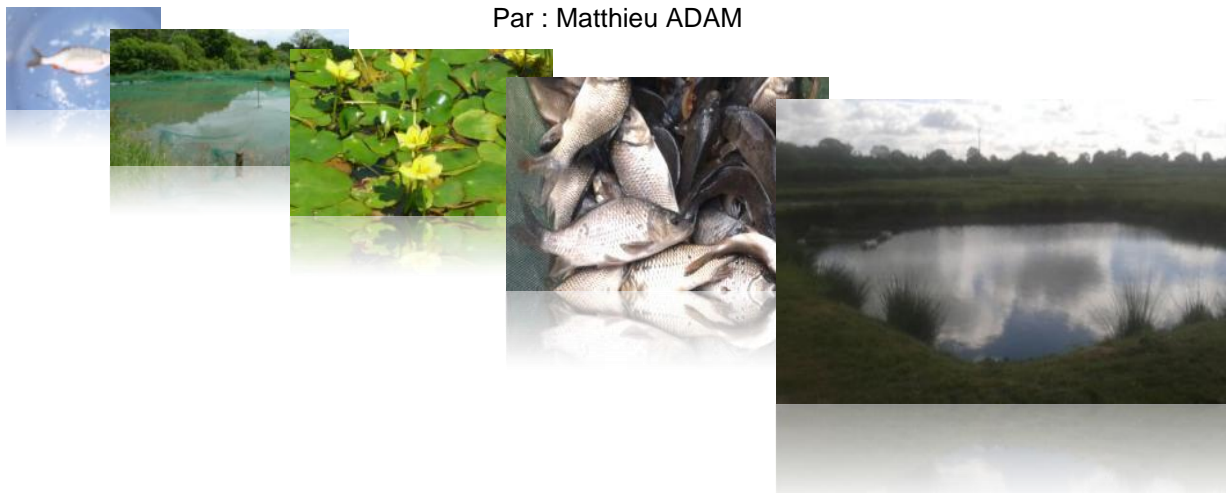
Diplôme d'Ingénieur Agronome

Année universitaire : 2012 – 2013

Spécialisation : Halieutique - Aquaculture

Mise en place expérimentale d'une intensification écologique de la pisciculture d'étang

Par : Matthieu ADAM



Bon pour dépôt (version définitive)

Date : 30/09/2013 Signature :

Autorisation de diffusion : Oui Non

Devant le jury :

Soutenu à Rennes

Sous la présidence de : Pr. Hervé LE BRIS

Maître de stage : M. Aurélien TOCQUEVILLE

Enseignant référent : Pr. Hervé LE BRIS, Enseignant-Chercheur Agrocampus Ouest

Autres membres du jury :

- Pr. Dominique OMBREDANE, Enseignant-Chercheur Agrocampus Ouest
- M. Pascal TRINTIGNAC, Conseiller aquacole régional Pays de la Loire (SMIDAP)

"Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST".

Fiche de diffusion du mémoire

A remplir par l'auteur⁽¹⁾ avec le maître de stage.

Aucune confidentialité ne sera prise en compte si la durée n'en est pas précisée.

Préciser les limites de la confidentialité⁽²⁾ :

➤ Confidentialité absolue : oui non
(ni consultation, ni prêt)
↳ Si oui 1 an 5 ans 10 ans

➤ A l'issue de la période de confidentialité **ou** si le mémoire n'est pas confidentiel, merci de renseigner les éléments suivants :

Référence bibliographique diffusable⁽³⁾ : oui non
Résumé diffusable : oui non
Mémoire consultable sur place : oui non
Reproduction autorisée du mémoire : oui non
Prêt autorisé du mémoire : oui non

.....
Diffusion de la version numérique : oui non

↳ Si oui, l'auteur⁽¹⁾ complète l'autorisation suivante :

Je soussigné Matthieu ADAM, propriétaire des droits de reproduction dudit résumé, autorise toutes les sources bibliographiques à le signaler et le publier.

Date : 30/09/2013

Signature :

Rennes, le

Le maître de stage⁽⁴⁾,

L'auteur⁽¹⁾,

L'enseignant référent,

(1) auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études

(2) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation d'AGROCAMPUS OUEST s'engagent à respecter cette confidentialité.

(3) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé.

(4) Signature et cachet de l'organisme.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon maître de stage, Aurélien Tocqueville, ainsi que mes encadrants, Joël Aubin qui m'a accueilli au sein de son laboratoire, ainsi que Pascal Fontaine. Ils m'ont apporté leur soutien, leurs conseils ainsi que leur aide tout au long de ce stage, de l'élaboration des protocoles jusqu'à la rédaction de ce mémoire. Merci également à Arnaud Lefèvre, Directeur de la pisciculture du Lycée Agricole du Haut-Anjou, pour m'avoir accueilli sur le site à Château-Gontier ainsi que pour m'avoir lui aussi soutenu et aidé.

Ensuite, je tiens à attirer l'attention sur l'ensemble des techniciens qui m'ont largement aidé dans la mise en place et pendant le suivi des deux expériences. A Rennes, merci à l'équipe de l'U3E (Unité Expérimentale d'Ecologie et d'Ecotoxicologie aquatique), et notamment à Antoine, Bernard, Cédric, Yohann ainsi qu'à Maïra. A Château-Gontier, merci à Damien, technicien passionné, et à Sandrine Lucas, enseignante en aquaculture qui m'a aussi beaucoup aidé.

Bien évidemment, je tiens aussi à dire merci à toute l'équipe ASAE pour sa bonne humeur, et au laboratoire de l'UMR SAS (Sol Agro et hydrosystème Spatialisation) pour avoir analysé mes (très) nombreux échantillons.

Enfin, je tiens à remercier tout le bureau « stagiaires », mais aussi le thésard qui s'y trouve, pour leur avoir fait soulever des cailloux, porter des sacs d'aliments, pêcher, anesthésier, peser et mesurer des poissons : merci à Killian, Mathieu, Céline et Jean.

Liste des abréviations

- ANR : Agence Nationale de la Recherche
- CIRAD : Centre de coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement
- EH : Equivalent Habitant
- FAO : Food and Agriculture Organisation
- IFREMER : Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER
- INRA : Institut National de la Recherche Agronomique
- IRD : Institut de Recherche pour le Développement
- ITAVI : Institut Technique de l'AViculture
- MEA : Millennium Ecosystem Assessment
- PISCEnLIT : PISCiculture Ecologiquement InTensive
- SEPB : Syndicat des Exploitants Piscicoles de Brenne
- TGC : Thermal Growth Coefficient
- UA : Unité Arbitraire
- UMR SAS : Unité Mixte de Recherche Sol Agro-hydrosystème Spatialisation
- VR : Vésicule résorbée

Liste des Figures

- Fig. 1 Interactions entre les différents compartiments faunistiques et floristiques d'un étang (d'après Bachasson, 2012).
- Fig. 2 Schéma du fonctionnement de l'autoépuration d'un étang (d'après Pochon et De Barjac, 1958 et Arrignon, 1998).
- Fig. 3 Schéma des compartiments d'un étang intervenant dans la production de poissons (d'après Schlumberger et Elie, 2012).
- Fig. 4 Schéma du cycle de production d'un étang (d'après Banas, 1997 et Adam et al., 2010).
- Fig. 5 Schéma du système de couplage entre les bassins « production » et « épuration ».
- Fig. 6 Schéma des systèmes intensifs et non-nourris ainsi que du « témoin macrophytes » (de gauche à droite).
- Fig. 7 Courbe de croissance prévisionnelle des carpes nourries d'après le modèle d'Augustyn – Szumiec ; $Poids = G_0 + 1,53810 \times (\sum \vartheta e)^{1,16864} \times d^{-0,55190} \times v^{0,27330} \times G_0^{0,51793}$; G_0 : Poids initial (g/individu), ϑe : Température moyenne journalière, d : densité d'élevage finale (individu/ha), v : Teneur protéique des aliments (%) (d'après Billard, 1995).
- Fig. 8 Photos de l'empeisonnement des étangs.
- Fig. 9 Photos de la mise en place des plantes dans les bassins.
- Fig. 10 Schéma du système innovant (coupe transversale de l'étang).
- Fig. 11 Evolution prévisionnelle du poids P ($P = P_i^{\frac{1}{3}} + \frac{P_f^{\frac{1}{3}} \times P_i^{\frac{1}{3}}}{\sum T} \times \sum T_i$ (G, R et T) avec P_f (g) : Poids final, P_i (g) : Poids initiale, T_i (°C): Température moyenne du jour i et T (°C) : Somme des température sur toute la période de croissance) et de la longueur L ($L = (\frac{P}{0,0108})^{\frac{1}{3,036}}$) des juvéniles de sandres entre mai et octobre (d'après Dumas et al., 2007 et Schneider et al., 2000).
- Fig. 12 Evolution de la consommation journalière C ($C = 0,05 \times B$, B : Biomasse en sandres) en poissons fourrages d'un bassin de 200 juvéniles de sandres, entre mai et octobre (d'après Popova et al., 1977).
- Fig. 13 Evolution chez le gardon, la tanche et le rotengle du poids P (a.) : $P = P_i^{\frac{1}{3}} + \frac{P_f^{\frac{1}{3}} \times P_i^{\frac{1}{3}}}{\sum T} \times \sum T_i$ (G, R et T) avec P_f (g) : Poids final, P_i (g) : Poids initiale, T_i (°C): Température moyenne du jour i et T (°C) : Somme des température sur toute la période de croissance (d'après Dumas et al., 2007) ; de la longueur L (c.) : $L = (\frac{P}{0,0056})^{\frac{1}{3,33}} \times 10$ (G), $L = (\frac{P}{0,0116})^{\frac{1}{3,02}} \times 10$ (R), $L = (\frac{P}{0,0372})^{\frac{1}{2,74}} \times 10$ (T) (d'après Tarkan et

al., 2006) ; de la hauteur H (b.) : $H = 0,257 \times L - 0,306$ (G), $H = 0,258 \times L + 0,1$ (R), $H = 0,198 \times L + 0,3$ (T) (d'après Schlumberger et Elie, 2008 et Freyheit, 2012).

- Fig. 14 Evolution du poids moyen des carpes élevées en système couplé, intensif (Int.) et non-nourri (Nn-nour.).
- Fig. 15 Evolution de la taille moyenne des carpes élevées en système couplé, intensif (Int.) et non-nourri (Nn-nour.).
- Fig. 16 Comparaison de l'évolution des paramètres physiques des systèmes couplés (bassin « production ») et non-nourris.
- Fig. 17 Comparaison de l'évolution des paramètres physiques des systèmes couplés (bassin « production ») et intensifs.
- Fig. 18 Comparaison de l'évolution du taux de dioxygène des systèmes couplés (bassin « épuration »), non-nourris et intensifs.
- Fig. 19 Evolution chimique et du taux d'O₂ sur 24h de l'ensemble des étangs entre le 24 et le 25/06/2013 ou le 25 et le 26/06/2013.
- Fig. 20 Evolution du poids (a.) et de la taille (b.) des juvéniles de sandre entre leur introduction à cinq semaines et début août.
- Fig. 21 Croissance hypothétique des différentes cohortes de gardons (G), de rotengles (R) et d'alevins à vésicules résorbées (VR) de tanches (T) (d'après Dumas et al., 2007).
- Fig. 22 Evolution possible du phytoplancton et du zooplancton dans les étangs non-nourris (508, 509).
- Fig. 23 Schéma d'un système de traitement amélioré d'un élevage intensif de carpes.
- Fig. 24 Photo de différentes tailles d'alevins de poissons fourrages issus de l'étang témoin B11.

Liste des Tableaux

- Tab. 1 Estimation des rejets de phosphore (P) et d'azote (N) journaliers moyens par mois (Annexe 8) (D'après Gross et al., 2000 et Schreckenbach et al., 2000).
- Tab. 2 Caractéristiques générales sur la reproduction du gardon, du rotengle et de la tanche (d'après Bruslé et Quignard, 2001 ; Schlumberger et Girard, 2013 ; Jobling et al., 2002 ; Rodriguez, 2004 ; Keith et al., 2011 ; Gillet, 1989).
- Tab. 3 Analyses chimiques de l'eau et des boues des neuf étangs lors de la mise en eau.
- Tab. 4 Recouvrement des bassins « épuration » des systèmes couplés et du « témoin macrophytes » par les plantes introduites.
- Tab. 5 Recouvrement des bassins « épuration » des systèmes couplés et du « témoin macrophytes » par les plantes non-désirées.
- Tab. 6 Evaluation des rejets de phosphore (P) et d'azote (N) journaliers moyens par mois via un bilan de masse (D'après Gross et al., 2000 et Schreckenbach et al., 2000).

Table des matières

| | |
|--|----|
| Introduction | 1 |
| I. La pisciculture d'étang, une pratique ancestrale | 2 |
| 1. Un système d'élevage basé sur l'interaction entre les différents compartiments trophiques..... | 2 |
| 2. Une gestion traditionnelle | 6 |
| 3. Une production limitée | 8 |
| 4. Le projet PISCEnLIT, vers une aquaculture écologiquement intensive | 9 |
| II. Matériels et méthodes | 10 |
| 1. Augmentation de la productivité et traitements des effluents piscicoles par une individualisation du compartiment « macrophytes » (Projet 1)..... | 10 |
| 1- Présentation générale de l'expérimentation..... | 10 |
| 2- Evaluation de la taille et de la configuration de la lagune de macrophytes pour un traitement efficace des effluents piscicoles..... | 11 |
| a. Mise en charge et circulation de l'eau | 11 |
| b. Choix des espèces de macrophytes | 12 |
| c. Evaluation des rejets potentiels | 12 |
| d. Détermination du nombre de plantes | 14 |
| 3- Empoissonnement et installation de la lagune..... | 14 |
| 4- Suivis zootechniques et physico-chimiques..... | 15 |
| 2. Production de sandres par une utilisation maximale du zooplancton (Projet 2) | 16 |
| 1- Présentation de l'expérimentation | 16 |
| 2- Mise en charge en sandres et en poissons fourrages..... | 17 |
| a. Mise en charge en carnassiers | 17 |
| b. Besoins alimentaires du sandre | 17 |
| c. Choix des poissons fourrages..... | 18 |
| d. Frayères : matériaux et taille..... | 20 |
| 3- Empoissonnement et installation des cages..... | 20 |
| 4- Suivis zootechniques et physico-chimiques..... | 20 |
| III. Résultats | 21 |
| 1. Croissance des carpes et traitement des effluents (Projet 1) | 21 |
| 1- Croissance observée..... | 21 |
| 2- Evolution physico-chimique de l'eau sur trois mois..... | 22 |
| 3- Evolution physico-chimique sur 24h | 25 |
| 4- Recouvrement en plantes des lagunes et du « témoin macrophytes » | 28 |
| 2. Résultats intermédiaires de la production de sandre d'un été (Projet 2)..... | 28 |
| 1- Croissance observée..... | 28 |

| | | |
|-----|--|----|
| 2- | Evolution prévisionnelle de la taille des alevins de poissons fourrages..... | 30 |
| IV. | Discussion..... | 31 |
| 1. | Augmentation de la productivité et traitement des effluents piscicoles par une individualisation du compartiment « macrophytes » (Projet 1) : un système à améliorer ... | 31 |
| 1- | Analyse des résultats | 31 |
| a. | Bilan de croissance dans les différents systèmes | 31 |
| b. | Efficacité de la lagune de macrophytes..... | 33 |
| c. | Effets des systèmes hydrauliques..... | 33 |
| 2- | Propositions d'amélioration | 34 |
| a. | Modifications du protocole initial | 34 |
| b. | Amélioration de la lagune | 35 |
| c. | Amélioration hydraulique | 36 |
| d. | Système final | 36 |
| 2. | Production de sandres par une utilisation maximale du zooplancton (Projet 2) : un départ plutôt réussi | 38 |
| 1- | Analyse des résultats | 38 |
| a. | Bilan de croissance des différents systèmes..... | 38 |
| 2- | Propositions d'amélioration | 39 |
| b. | Modifications du protocole initial | 39 |
| a. | Mise en charge | 39 |
| b. | Gestion des apports et support de ponte | 39 |
| c. | Amélioration de la productivité primaire | 39 |
| | Conclusion | 40 |
| | Bibliographie | 41 |

Introduction

Depuis quelques années, le monde agronomique a pleinement pris conscience de l'impact de l'agriculture intensive, développée après-guerre, sur l'environnement. S'est alors posée la question de la durabilité de telles pratiques. En parallèle l'augmentation de la population mondiale et le changement du comportement alimentaire des pays en voie de développement, nous oblige à maintenir un niveau de production suffisant voire même à l'augmenter. C'est ainsi que la notion nouvelle de l'écologiquement intensif est apparue, énoncée pour la première fois en France au moment du Grenelle de l'Environnement. Reprenant les idées générales de l'agroécologie, elle cherche à « accroître la production par une hausse des rendements à l'hectare, avec des coûts beaucoup plus bas [...], en utilisant au maximum les ressources locales, sans atteindre l'environnement, sur une base soutenable. » (Griffon, 2013). Elle a donc pour objectif de concilier production et respect de l'environnement, ce qui est encore aujourd'hui difficilement concevable pour beaucoup de professionnels. En somme, l'intensification écologique des agrosystèmes consiste en « l'augmentation des rendements tout en réduisant l'empreinte écologique de l'agriculture » (Bonny 2011).

Cette nouvelle notion a été définie pour l'agriculture mais n'a que peu été appliquée à un système aquacole. Plusieurs systèmes, parfois très anciens, répondent pourtant à la définition précédemment énoncée. Depuis des millénaires, des systèmes de polyculture utilisent les synergies entre les différentes espèces pour augmenter la production. Plus récemment, en s'inspirant de ces pratiques ancestrales, des chercheurs français, canadiens ou israéliens ont développé des systèmes dit multi-trophiques intégrés (Neori et al., 2004 ; Blancheton et al., 2009 ; Blachier et al., 2009). Ils consistent en la production de plusieurs espèces en maximisant certains services qu'ils peuvent rendre par leur interaction (approvisionnement de nourriture, épuration...). Ainsi, en Israël, l'eau issue de bassins de daurades et d'ormeaux passe dans des cultures d'algues qui permettent de l'épurer et qui servent, par la suite, de base alimentaire aux gastéropodes brouteurs (Hussenot, 2004). Mais l'écologiquement intensif ne doit pas se limiter à l'amplification de quelques fonctions de la polyculture. C'est un principe qui cherche à valoriser les services rendus par les écosystèmes, en utilisant les qualités de chaque espèce, leurs interactions entre elles ainsi que les mécanismes mis en œuvre.

Le projet PISCEnLIT (PISCiculture Ecologiquement InTensive), dans lequel s'inscrit ce stage, cherche justement à appliquer l'écologiquement intensif à l'aquaculture. Plusieurs laboratoires, de trois pays différents (France, Indonésie et Brésil), ont étudié différents systèmes en utilisant une approche écosystémique. Les objectifs étaient non seulement de redéfinir cette notion mais également de proposer des améliorations techniques ou organisationnelles aux élevages existants.

L'étude qui suit cherche donc à tester une partie de ces améliorations. Durant six mois, et afin d'augmenter la productivité des étangs tout en conservant leur haute valeur écologique, nous avons expérimenté deux systèmes innovants :

- Le traitement des effluents d'un élevage de carpes par une individualisation du compartiment « macrophytes »
- La production de juvéniles de sandres par une utilisation maximale du zooplancton.

Après une présentation générale des étangs piscicoles et de leur exploitation en France, nous présenterons le dimensionnement ainsi que la mise en place de ces deux expériences et les premiers résultats obtenus. Enfin, nous discuterons des points de blocage et nous chercherons des alternatives aux systèmes testés.

I. La pisciculture d'étang, une pratique ancestrale

Les étangs sont des plans d'eau lentique continentaux, artificiels et à vocation piscicole (Touchart et al., 2007). Bien qu'aujourd'hui faisant partie du patrimoine naturel, ces ouvrages ont été créés, aménagés, entretenus et gérés par l'homme. Ce type d'élevage en milieu fermé est une pratique ancestrale, apparue en France dès le VII^{ème} siècle (Bédoucha, 2011). Elle fut introduite par les moines qui, très tôt, comprirent l'intérêt de ces retenues d'eau pour garantir aux régions situées loin du littoral (Brenne, Dombes, Lorraine) un apport de poissons les vendredis et pendant le carême (Bédoucha, 2011). Depuis, la pisciculture d'étang a peu évolué et repose aujourd'hui davantage sur un savoir-faire millénaire que sur une réelle recherche d'optimisation du système d'élevage.

1. Un système d'élevage basé sur l'interaction entre les différents compartiments trophiques

Classiquement la pisciculture d'étang s'appuie sur un équilibre créé par les différentes interactions entre la faune et la flore aquatique. En effet, afin de produire du poisson, les pisciculteurs se basent sur l'écosystème naturel, à savoir un système formé par un environnement (biotope) et par l'ensemble des espèces (biocénose) qui y vivent, s'y nourrissent et s'y reproduisent (Larousse, 2013). Pour simplifier, un étang est donc composé d'un ensemble de compartiments qui sont reliés les uns aux autres (Fig. 1).

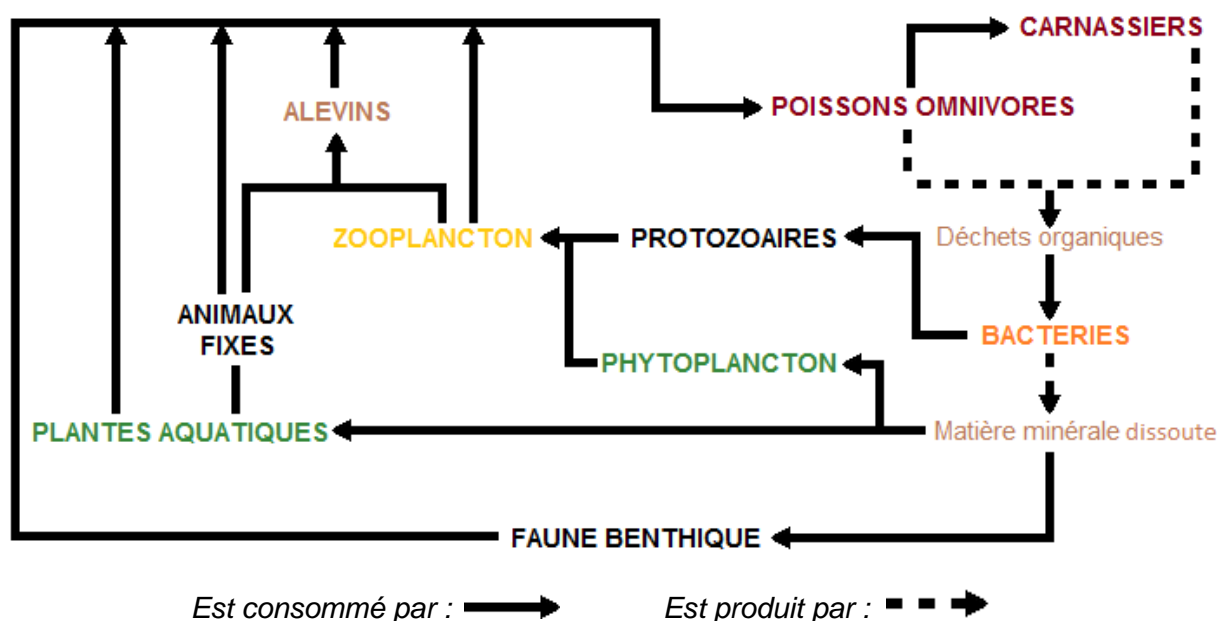


Fig. 1 Interactions entre les différents compartiments faunistiques et floristiques d'un étang (d'après Bachasson, 2012).

Par ces interactions l'étang rend à l'homme de nombreux services écosystémiques (MEA, 2005). L'étude qui suit s'appuie sur deux d'entre eux : le pouvoir auto-épurateur et la production piscicole.

- Rôle auto-épurateur

Le rôle auto-épurateur des étangs est dû à trois principaux compartiments : les plantes aquatiques, le phytoplancton et la boucle bactérienne (Triponel, 2007). Ils interviennent aussi bien au niveau des sédiments que dans la colonne d'eau.

Dans les systèmes en eau close, il y a une forte production de déchets organiques, composés d'éléments azotés. Ils proviennent, d'une part, des sécrétions et déjections de poissons et autres animaux aquatiques (zooplancton, faune benthique, protozoaire, etc.), et, d'autre part, des organismes non consommés qui meurent et sédimentent sur le fond (Bachasson, 2012).

Cette matière organique est dans un premier temps majoritairement dégradée par la flore bactérienne. Ces organismes minéralisent les déchets, c'est-à-dire les font passer d'un état organique à un état minéral (Arrignon et al., 2002).

L'azote organique est présent dans le milieu sous différentes formes : corps protéiques, sucres aminés, acides nucléiques, bases puriques, amides, phosphatides, alcaloïdes, amines, etc. (Pochon et De Barjac, 1957). Ces molécules vont subir une première transformation, l'ammonification, dont le produit principal est l'ammoniaque (NH_3). Les plus grosses d'entre elles subissent une scission sous l'action des enzymes exocellulaires des bactéries ammonifiantes (Pochon et De Barjac, 1957). Les molécules plus simples ainsi formées pénètrent dans ces micro-organismes par osmose et sont de nouveau coupées, cette fois par des endoenzymes (Pochon et De Barjac, 1957). S'ensuit une désamination selon plusieurs procédés (hydrolytique, réductrice, etc.), aérobie ou anaérobie si le milieu est privé d'oxygène (Pochon et De Barjac, 1957). A la fin de cette étape, l'ammoniaque produit est émis dans le milieu. Même si plusieurs bactéries interviennent ici, le genre *Pseudomonas* semble être plus répandu (Voets et al., 1955). La composition de la flore reste néanmoins dépendante des conditions du milieu ainsi que de la nature du substrat azoté. En outre, le rendement de cette réaction est conditionné par l'abondance relative des substances hydrocarbonées associées aux substances azotées : plus le rapport C/N est faible, plus l'ammonification est efficace (Pochon et De Barjac, 1957). En parallèle à cela, les poissons émettent également dans le milieu de l'ammonium (NH_4^+). Par une simple réaction acido-basique il va être transformé en ammoniaque. Ce composé va ensuite soit être fixé dans le sol, soit émis dans le milieu sous forme dissoute soit subir une nitrification. Cette réaction peut être décomposée en deux phases : une nitritation et une nitratisation, correspondant successivement à la formation de nitrites, réutilisés pour produire des nitrates. Elles sont effectuées en majorité par deux genres de bactéries, *Nitrosomonas* et *Nitrobacter*. Le rendement de la nitrification dépend surtout de la teneur en dioxygène, étant donné que la flore concernée est composée d'aérobies stricts, mais également d'autres facteurs : pH (optimal = 8,5 – 8,8), obscurité, température (optimal = 28°C). Cependant, des sédiments, support principale de la flore bactérienne, riches en ammoniaque (Allison, 1954), associés à une température élevée et à un rapport C/N faible (Martin et Chapman, 1951), entraînent de grandes pertes de NH_3 dans le milieu, et donc moins de nitrates produits.

En ce qui concerne le phosphore organique, ce sont des eubactéries qui le transforment en phosphate (PO_4^{2-}) (Pochon et De Barjac, 1958). Les sédiments agissent comme un véritable piège à phosphore. Ils reçoivent essentiellement les formes particulières (non-apatitique lié au fer et à l'aluminium, apatitique lié au calcium, résiduelle) mais également une partie des éléments dissouts (Pourriot et al., 1995). En revanche, le phosphore présent dans l'eau représente moins de 1 % de celui stocké dans les sédiments (Pourriot et al., 1995). Les cycles brièvement décrits précédemment vous présentent les deux nutriments primordiaux, qui constituent, en pisciculture d'étang, à la fois les facteurs limitants de la production mais aussi les principales causes de nuisance à l'environnement.

Les éléments nutritifs ainsi libérés se retrouvent piégés dans les vases, dissouts dans la colonne d'eau ou libre dans l'atmosphère. En effet, une partie non négligeable des nitrates peut subir une dénitrification. Cette réaction, qui les fait passer successivement à l'état de nitrites, de monoxyde d'azote (NO), d'oxyde nitreux (N_2O) et enfin de diazote (N_2), entraîne une perte de matière pour le système étang : le diazote produit se retrouve dans l'atmosphère (Germon J.C. et Couton Y., 1999). Pour ce qui est des nitrates restant, ils vont

être utilisés pour leur croissance à la fois par le phytoplancton (ensemble d'algues microscopiques) et par les macrophytes, végétaux supérieurs qui se développent en eaux stagnantes (Boutin, 1983).

En effet, les végétaux ne peuvent pas assimiler directement la matière organique qui doit être préalablement minéralisée. Bien que les minéraux libres dans l'eau soient principalement consommés par le phytoplancton, il est également prouvé que la majeure partie de la nutrition des plantes aquatiques est extraite du milieu ambiant. Le prélèvement d'éléments azotés ou phosphorés a aussi lieu dans les boues de l'étang via les systèmes racinaires, mais cette absorption reste minoritaire (Arrignon, 1998) (**Fig. 2**). Les sédiments constituent donc un réservoir nutritif, rarement mobilisé. Reste tout de même les poissons fouisseurs (carpes, tanches, etc.) ou certaines larves d'insectes qui remettent en suspension cette matière sédimentée et minéralisée.

L'homme a depuis longtemps pris conscience de ce service rendu par les étangs. Effectivement, de nombreux pays asiatiques, africains ou sud-américains exploitent pleinement ce pouvoir épurateur depuis des centaines d'années dans des systèmes dits aujourd'hui d'agriculture-aquaculture intégrés (Costa-Pierce, 2002). Ils consistent en un apport de fumier ou de lisier d'animaux terrestres afin qu'ils soient assimilés par l'étang et donc recyclés. En France, les systèmes d'épuration par zones humides artificielles, mis en place à partir des années 1970-1980, reproduisent les processus épuratoires des écosystèmes (Wetzel, 1993).

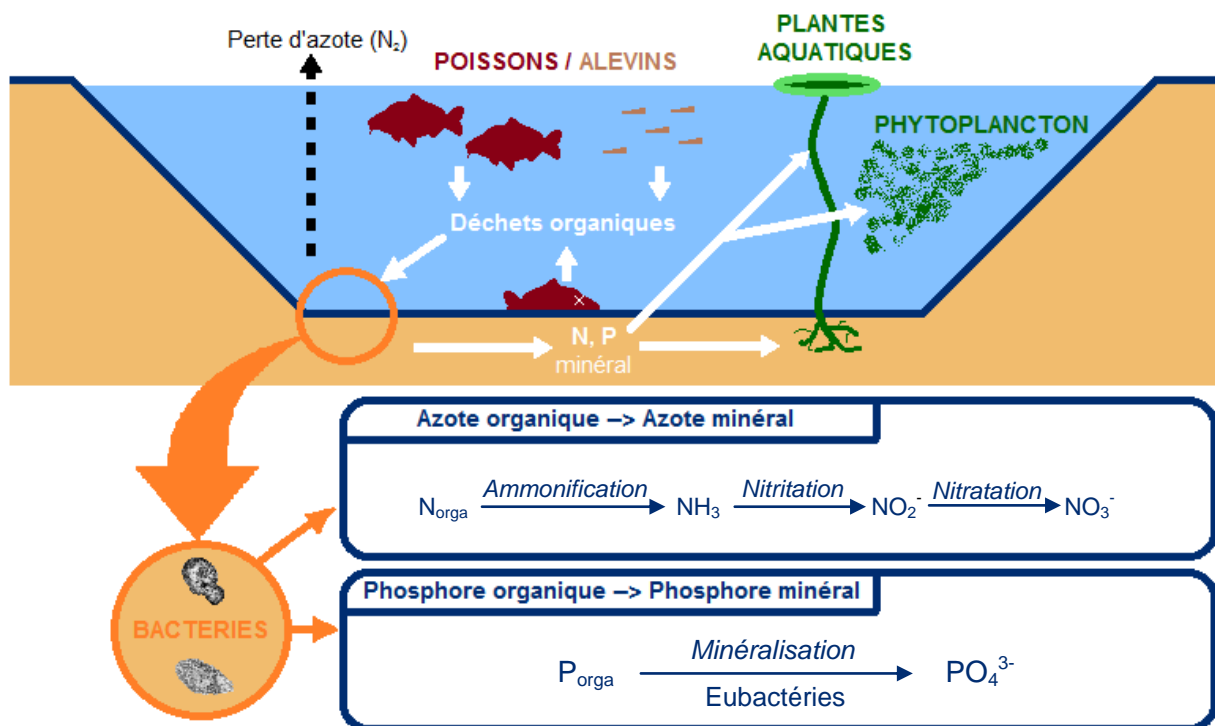


Fig. 2 Schéma du fonctionnement de l'autoépuration d'un étang (d'après Pochon et De Barjac, 1958 et Arrignon, 1998).

- Production piscicole

Comme nous l'avons précisé précédemment, la vocation piscicole de l'étang est à la base de sa définition. Ainsi, l'un des principaux services rendus par ce plan d'eau reste bien évidemment la production de protéines. Les poissons d'intérêt commercial, pour la consommation humaine ou pour le repeuplement, sont situés en bout de chaîne alimentaire :

ce sont soit des poissons omnivores (carpes, gardons, rotengles, tanches, etc.), soit des carnassiers (sandres, brochets, etc.). Il faut savoir que les végétaux, et en particulier le phytoplancton, constituent la base des chaînes alimentaires de la biocénose (Arrignon, 1998). Ces algues microscopiques peuvent être déclinées en cinq ensembles distincts : Diatomées et Desmidiées, Chrysophycées et Dinophycées, Volvocales et Chlorococcales, Euglénophycées, Cyanobactéries. La production de poisson est directement dictée par la prédominance d'un de ces groupes (Barbe et al., 1999), et donc de la présence de nutriments. En effet, leur abondance relative ainsi que les formes présentes dépendent largement de la richesse du milieu en éléments azotés, en phosphore et en calcium dissouts (Schlumberger et Girard, 2013). S'il existe des poissons phytophages, la plupart de ceux élevés dans nos étangs sont plutôt omnivores (carpes, gardons, juvéniles de sandres, etc.) ou piscivores exclusifs (sandres adultes, brochets adultes, etc.) (Schlumberger et Elie, 2008). Le plancton animal constitue donc le deuxième maillon de la chaîne alimentaire. Ces êtres vivants microscopiques consomment du phytoplancton et peuvent être séparés en trois groupes de taille différente : les rotifères (0,1 à 0,5 mm), les copépodes (1 à 3 mm) et les cladocères (1 à 5 mm) (Schlumberger et Girard, 2013) (Fig. 3). Tout alevin de poissons omnivores ou de carnassiers préfère les plus petites formes pour ensuite se tourner vers les plus grandes (Mark et al., 1989).

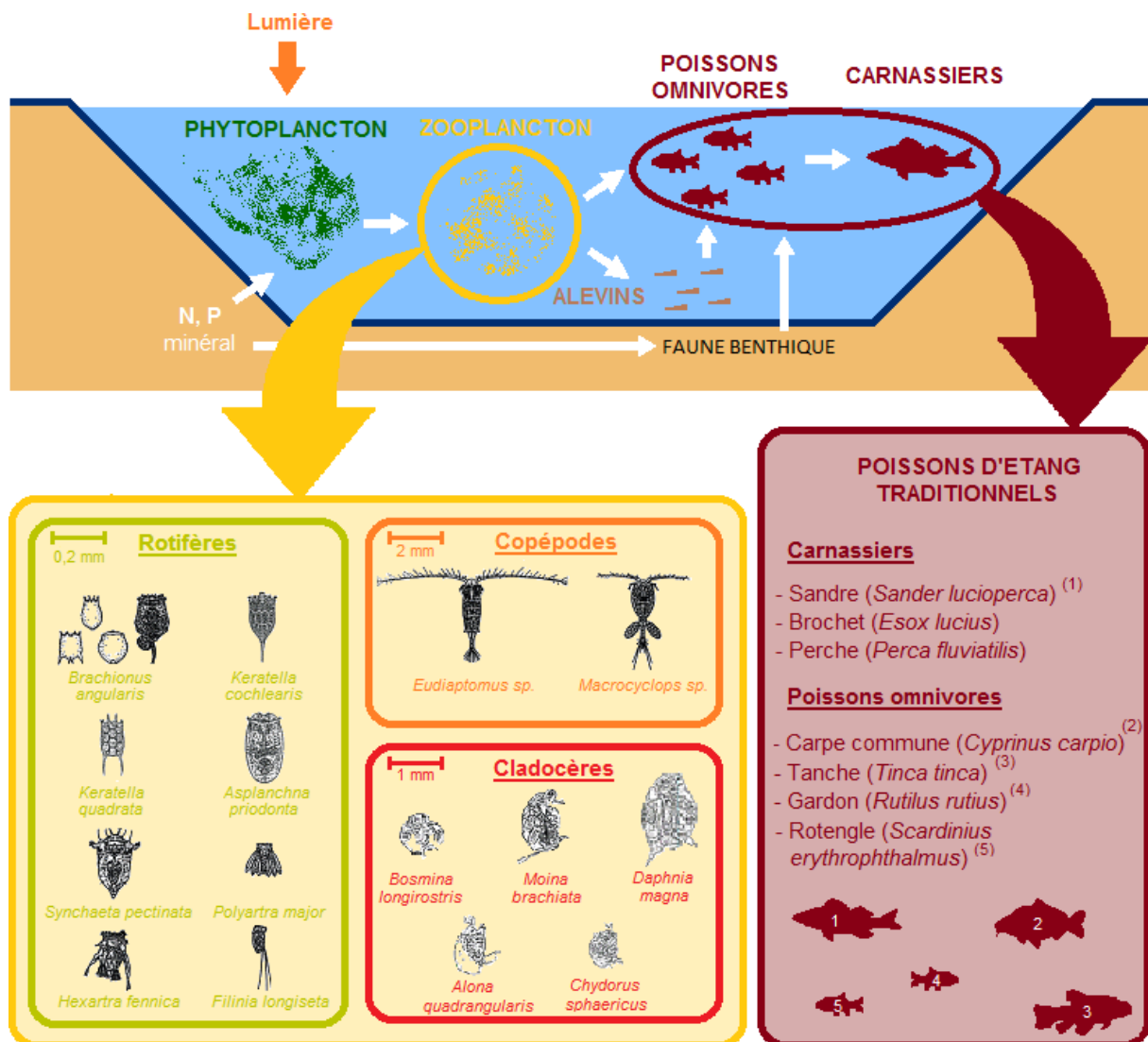


Fig. 3 Schéma des compartiments d'un étang intervenant dans la production de poissons (d'après Schlumberger et Elie, 2012).

Il faut également prendre en compte la faune benthique, essentiellement représentée par plusieurs espèces appartenant à deux groupes : les Oligochètes et les Nématodes (Amoros et Juget, 1970). La composition de cette faune dépend de différents facteurs : la composition des vases, la concentration en dioxygène et l'abondance de macrophytes (Amoros et Juget, 1970). De nombreux poissons évoluant plutôt au fond de l'eau (carpes, tanches, etc.) fouillent les sédiments à la recherche de ces invertébrés (Schlumberger et Elie, 2008). En ce qui concerne les carnassiers (sandres, perches, brochets, etc.), le régime piscivore exclusif est atteint plus ou moins rapidement (Keith et al., 2011). Dès lors ils ne se nourrissent que de poissons, surtout d'omnivores, alors appelés poissons fourrages (gardons, rotengles, ables, etc.), mais également parfois d'autres carnassiers (Barral, 1999). Il existe aussi des cas de cannibalisme lorsqu'ils n'ont plus assez de proies disponibles (Lappalainen et al., 2006).

En somme, la pisciculture d'étang s'appuie fortement sur l'écosystème en place. La gestion des bassins s'articule autour du rythme naturel de la vie qui s'y développe, même si l'exploitant peut agir sur l'un ou l'autre des compartiments pour améliorer sa production.

2. Une gestion traditionnelle

Le cycle de production d'un étang consiste en général à empoissonner au printemps puis laisser le poisson grossir pendant un ou deux ans. La pêche s'effectue alors en automne et l'étang est ensuite laissé en assec durant quelques semaines. Dès la fin de l'hiver, il se remplit peu à peu grâce à un cours d'eau et à la pluviométrie naturelle (Banas, 2001). Néanmoins, il est parfois laissé vide pendant plusieurs mois voire une année entière. Durant cet assec prolongé, l'étang est soit mis en culture (Berard, 1982) soit laissé tel quel pour qu'une flore particulière puisse s'y développer. En effet, la création d'un nouvel habitat constitue une source de biodiversité végétale mais aussi animale (oiseaux, etc.) (Malenfer et Hirtz, 2005). L'exondation des vases de l'étang comporte également d'autres avantages : minéralisation accélérée (Adam et al., 2010), limitation des problèmes sanitaires (De Kinkelin et al., 1973), possibilité de réaliser des travaux d'entretien ou bien apport pécuniaire complémentaire avec une mise en culture (Berard, 1982) (**Fig. 4**).

La plupart du temps, il existe plusieurs phases de productions, toujours basées sur le cycle précédemment décrit : alevinage et grossissement (Billard, 1995). Parfois une étape de pré-grossissement (production de juvéniles) s'intercale entre les deux (Billard, 1995). La taille des bassins diffère selon les phases. Pour la production d'alevin, des étangs de petites tailles sont préférés contrairement au grossissement où nous retrouvons des plans d'eau de plusieurs hectares (Billard, 1995). Dans tous les cas, vu que les étangs ont été créés à des fins piscicoles, leur configuration naturelle, comme leur forme, les différences de profondeurs ou bien le dénivelé, facilite la production de poissons (Bédoucha, 2011).

Le pisciculteur possède tout de même plusieurs leviers afin d'améliorer la productivité de son étang (Bachasson, 2012). Il peut déjà intervenir sur la qualité de sa future production par une sélection de ses géniteurs. Après, l'alevinage est une étape clé et, étant donné la taille réduite des bassins concernés, il peut plus aisément réunir les conditions optimales pour le développement des jeunes poissons. Pour ce qui est de la phase de grossissement, le choix de la formule d'empoissonnement est important. Représentant le nombre et les espèces de poissons introduites, elle influe fortement sur la quantité et la qualité de la production à venir. Effectivement, le pisciculteur se base sur un système de polyculture avec plusieurs espèces et utilise les spécificités de chacune d'entre elles afin de produire majoritairement une espèce cible (Banas, 2001). L'élaboration de ces formules est plutôt empirique et ne repose donc que sur des observations faites au cours des siècles (Schlumberger et Girard, 2013). Elles dépendent par exemple du type d'étang (présence d'herbiers, nature du fond, etc.) ou cherchent à éviter la concurrence entre espèces (Schlumberger et Girard, 2013).

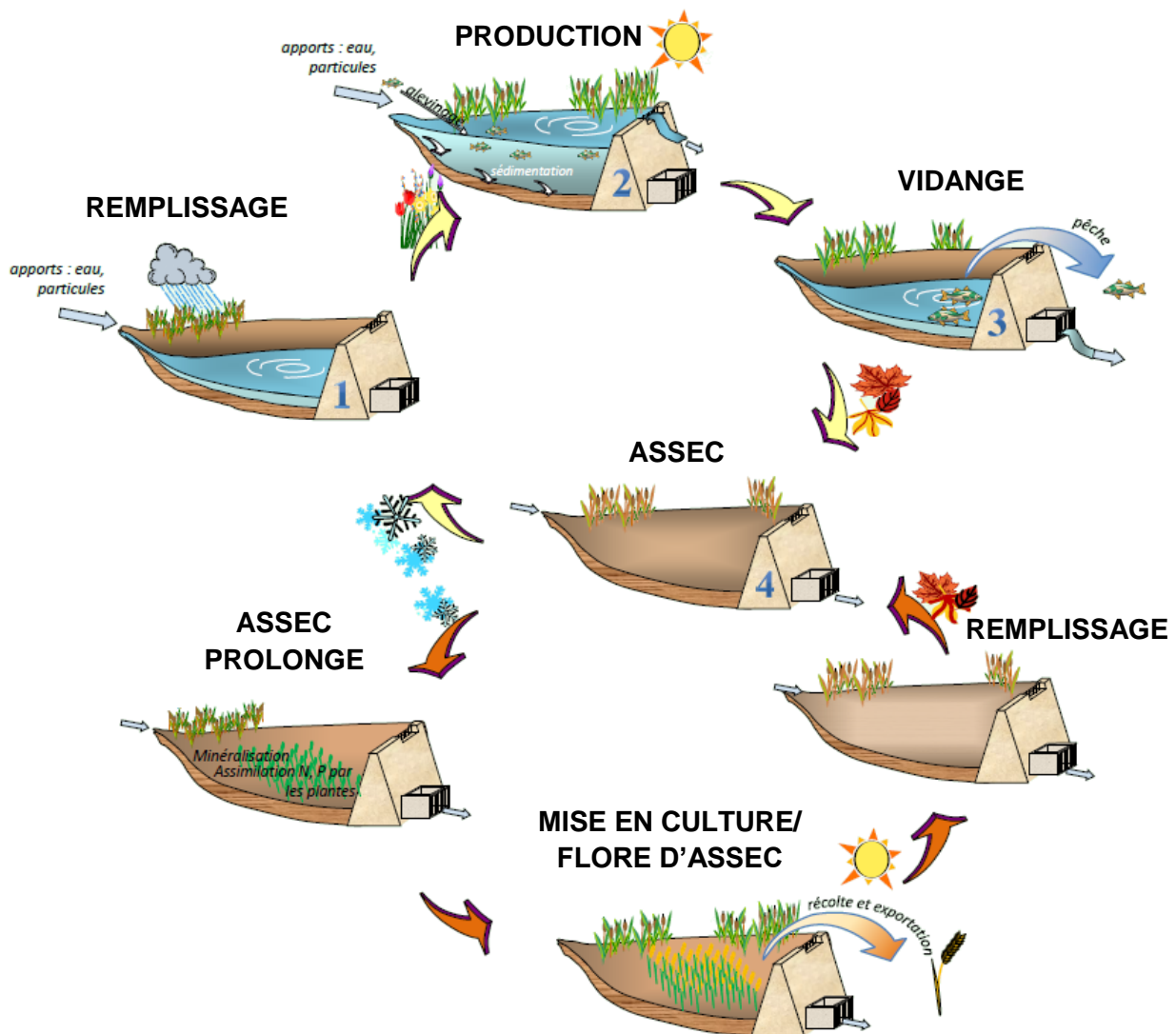


Fig. 4 Schéma du cycle de production d'un étang (d'après Banas, 1997 et Adam et al., 2010).

Ensuite, avant de remplir l'étang ou lorsqu'il est en eau, il est possible d'augmenter la production en stimulant le développement du phytoplancton, compartiment à la base de la chaîne alimentaire. Un apport de fumure minérale, azotée ou phosphorée, permet une plus grande disponibilité en éléments nutritifs dissous, nécessaires au développement des algues microscopiques (Schlumberger et Girard, 2013). Une fumure organique, lisier ou fumier, n'influe que secondairement sur ces derniers. Par contre, elle apporte un complément de nourriture pour le zooplancton, notamment les cladocères et les rotifères (Schlumberger et Girard, 2013). Comme précisé précédemment, ce compartiment constitue l'essentiel de l'alimentation des alevins et des poissons omnivores adultes. L'ajout de foin dans l'étang favorise aussi l'implantation de rotifères (Schlumberger et Girard, 2013). Pour améliorer la richesse de la faune benthique, mais aussi du zooplancton, le pisciculteur peut chauler, soit pendant l'assec soit quand le bassin est en eau (Bachasson, 2012). Cet apport de chaux, vive (CaO) ou éteinte (Ca(OH)_2), permet également d'agir sur la physico-chimie en augmentant le pH et neutralisant l'acidité des matières organiques (Bachasson, 2012).

Bien évidemment, pendant l'assec le pisciculteur peut réaliser différents travaux d'aménagement : curage, renforcement de la digue, etc. Il est également possible de réaliser un faucardage, c'est-à-dire une fauche des macrophytes bordant l'étang (Bachasson, 2012). En effet, pour éviter le retour dans la colonne d'eau des éléments dissous prélevés par la

plante (fonction épuratrice), il est nécessaire d'exporter la matière végétale hors du système. En outre, à long terme les macrophytes peuvent devenir envahissants et combler peu à peu le bassin. Ces différentes interventions permettent de classer les élevages en étang selon leur degré d'intensification (Kerleo, 2003) :

- Elevage extensif : simple pêche
- Elevage semi-intensif : amélioration du système
- Elevage intensif : nourrissage du poisson

Ces différentes gestions de l'étang, qui restent simples, permettent au pisciculteur de produire un certain nombre d'espèces de poissons en n'intervenant que très peu. Néanmoins, la conséquence directe est qu'il ne maîtrise que peu de choses, et ne peut intervenir sur certains facteurs clés, à savoir les maladies, la ressource en eau, la température, etc. Il y a ainsi très peu de dépenses, économiques ou horaires, mais en contrepartie la production reste faible et très aléatoire.

3. Une production limitée

Bien que la pisciculture d'étang représente en France 37% de la surface en eau cadastrée, soit plus de 100 000 hectares d'étangs, elle ne totalise qu'une production de 7 000 t annuelle (Anonyme, 2011). Encore autour de 10 000 t en 2007 (SEPB, 2011), elle a chuté de 30% notamment à cause de l'impact des oiseaux piscivores (SEPB, 2011 ; Bobbe, 2010). De plus, la faible rentabilité observée, avec une moyenne nationale autour de 80 €/ha (SEPB, 2011), les aléas climatiques et le manque de reconnaissance entraînent un abandon progressif des étangs sur le territoire. Cette pratique reste cependant à ce jour la seconde activité piscicole française derrière la salmoniculture (Anonyme, 2011). Il existe plusieurs bassins de production, notamment les Dombes, la Brenne et la Lorraine, qui se partagent l'essentiel de la production (Trotignon, 2000). Les étangs sont tout de même présents dans d'autres régions voire sur l'ensemble du territoire, de manière plus ou moins éparse (Trotignon, 2000).

Au niveau des espèces produites, la carpe arrive en tête avec 50% de la production, puis viennent le gardon (25%) et la tanche (10%). Les quinze derniers pourcents se partagent entre les carnassiers (brochet, sandre, perche et black-bass) et de nouveaux poissons (silure, esturgeon, etc.) (SEPB, 2011). Bien que la carpe reste une espèce emblématique, dont l'importance dans les systèmes d'élevage est attestée depuis le XIII^{ème} siècle (Bédoucha, 2011), le marché s'ouvre de plus en plus, notamment aux carnassiers.

Malgré cette faible productivité, autour de 89 kg/ha/an (SEPB, 2011), et ce manque de diversité des produits, le marché se porte bien. La consommation n'en représente que 25%, contre 75% pour le repeuplement (Anonyme, 2011). Les ateliers de transformation français (Fish Brenne, etc.) sont obligés d'importer de la matière première étrangère pour satisfaire la demande. Deux solutions existent pour augmenter la productivité et palier à ce problème : augmenter la surface de production ou augmenter la quantité produite par unité de surface. La première est compliquée à mettre en place, de par le cadre juridique français limitant la création d'étangs (Kerleo, 2003). La seconde est quant à elle envisageable. Elle consiste ni plus ni moins à une intensification. Néanmoins, cela doit se faire en conservant les intérêts environnementaux de ces ouvrages.

Comme précisé précédemment, c'est ainsi que s'est réuni autour du projet PISCEnLIT (PISCiculture EcoLogiquement InTensive) un ensemble de chercheurs afin de proposer des scénarios d'intensification, utilisant les leviers écologiques de l'aqua-écosystème.

4. Le projet PISCEnLIT, vers une aquaculture écologiquement intensive

Financé par l'ANR (Agence Nationale pour la Recherche), PISCEnLIT est un projet de quatre ans qui s'achèvera fin 2013. Via une approche par écosystème, il vise à évaluer le potentiel d'intensification écologique et l'insertion territoriale des systèmes aquacoles. C'est autour de cette question de durabilité de l'aquaculture que se sont réunis quelques instituts de recherche français et étrangers (**Annexe 1**). Les territoires étudiés représentent le panel des différents niveaux d'intensification en aquaculture : extensif – semi-intensif (étangs de Lorraine et de Brenne), intensif (étangs au Brésil et en Indonésie) et très intensif (élevage de saumon en système recirculé en Normandie) (**Annexe 2**).

Le projet est constitué de six étapes distinctes. Dans un premier temps, une étude de la perception des services écosystémiques, définis dans le MEA, dans chaque région ont permis de les hiérarchiser. En parallèle, l'état de la biodiversité a été observé et des analyses environnementales, par ACV (Analyse du Cycle de Vie) ou par Emergy, ont été menées pour l'ensemble des systèmes. Tout cela a permis d'aborder l'aquaculture sur ces différents territoires par une approche écosystémique. Les résultats obtenus ont permis d'élaborer des diagnostics par terrain, qui ont ensuite été confrontés les uns aux autres afin d'en tirer les différents niveaux d'intensification ainsi que les différents leviers écologiques pouvant être utilisés pour intensifier la production.

Le projet vise ainsi une augmentation de la productivité tout en limitant, voire réduisant, l'empreinte écologique des systèmes. En s'appuyant sur l'interaction entre les différents compartiments trophiques du milieu, plusieurs scénarios d'intensification écologiques sont ressortis :

- 1- Utilisation de la valeur écologique et du pouvoir épurateur de l'étang
- 2- Combinaison d'un élevage intensif et d'un élevage extensif en polyculture
- 3- Meilleure valorisation des niveaux trophiques
- 4- Utilisation des intrants naturels et valorisation des vases
- 5- Préconisation de bonnes pratiques

Ils ont ensuite pu être testés expérimentalement sur les territoires étudiés. Une fois les tests terminés, la faisabilité de la transposition des systèmes testés à une plus grande échelle sera étudiée. A la fin, un guide de recommandation en intensification écologique pourra être édité.

L'étude qui suit s'insère dans l'étape expérimentale précédemment décrite. Elle présente deux expérimentations menées en pisciculture d'étang en France, qui se basent sur les scénarios 2 et 3. Ces dernières cherchent à répondre la problématique suivante :

« Optimisation de la production et limitation des rejets piscicoles par une meilleure gestion des compartiments trophiques de l'étang.

II. Matériels et méthodes

1. Augmentation de la productivité et traitements des effluents piscicoles par une individualisation du compartiment « macrophytes » (Projet 1)

1- Présentation générale de l'expérimentation

L'étang a donc un rôle auto-épuration avéré via la boucle bactérienne ainsi que l'ensemble des végétaux qui s'y trouvent. Les objectifs de ce test sont d'augmenter la productivité ainsi que cette valeur épuratrice afin de limiter les rejets dans l'environnement. Cette expérience nous permettra ainsi de confirmer l'importance des végétaux dans un étang. Pour cela, nous sommes partis du principe que toute intensification doit passer par l'individualisation des compartiments trophiques (Marcel, 1996), à savoir ici les compartiments « poissons », source d'effluents, et « macrophytes », puits de nutriments. Cette étude se base donc sur le scénario 1 précédemment décrit : « Utilisation de la valeur écologique et du pouvoir épurateur de l'étang ». Elle est menée sur neuf bassins en eau stagnante de 500 m², alimentés en parallèle par un petit cours d'eau, la Flume, et localisés sur le site expérimental de l'INRA au Rheu (35). Afin de s'affranchir d'un effet bassin potentiel, nous avons travaillé à partir de deux réplicats pour chacun des trois systèmes décrit ci-après. Nous étions conscients que la répétabilité était faible, mais nous avons été limités par le nombre de bassins disponibles. De plus, nous n'avons pu mettre en place qu'un seul étang « témoin macrophytes ». Voici donc les différents systèmes (**Annexe 3**) :

- Système couplé

Dans un premier bassin de 500 m² (bassin « production »), 1 000 carpes communes (*Cyprinus carpio*) d'un été, associées à 50 gardons (*Rutilus rutilus*) et 2 tanches (*Tinca tinca*), sont nourries avec de l'aliment industriel (élevage intensif), composé de 32 % de protéines et de 9 % de lipides (**Annexe 4**). Cet étang est couplé avec un second bassin de même type, utilisé pour l'épuration des effluents du premier par l'implantation de macrophytes (bassin « épuration »). La circulation de l'eau est assurée par une pompe depuis la partie « épuration », via un jet extérieur permettant une ré-oxygénation du bassin contenant les poissons, et par un petit canal de surverse depuis la partie production (**Fig. 5**).

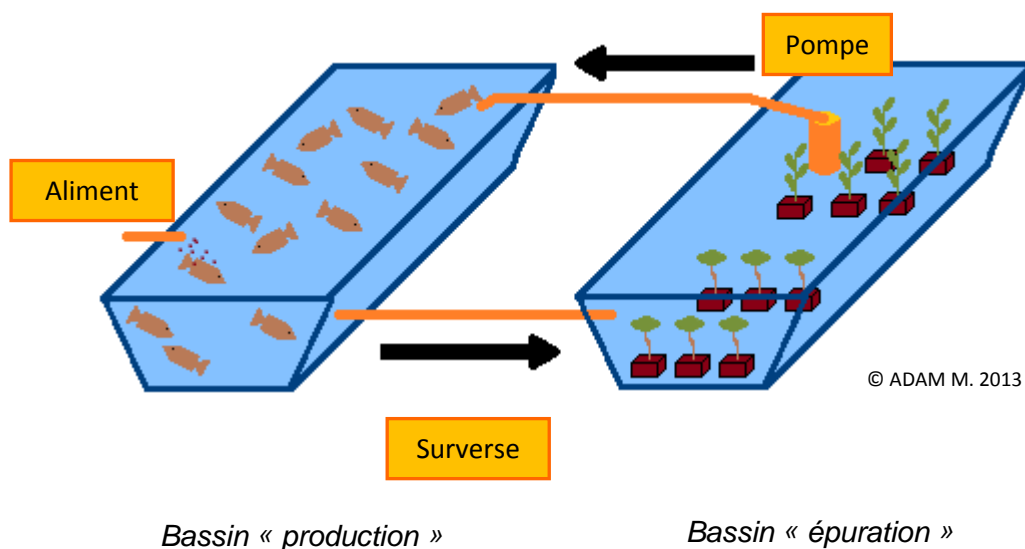


Fig. 5 Schéma du système de couplage entre les bassins « production » et « épuration ».

- Système intensif

Le système couplé est comparé avec un bassin intensif, empoissonné et nourri comme précédemment (1 000 carpes, 50 gardons et 2 tanches), mais non couplé à un étang de traitement des effluents. Il est important de préciser qu'une pompe est également présente afin d'oxygéner l'eau et de la faire circuler au sein du bassin (**Fig. 6**).

- Système « non-nourri »

Ce système est cette fois composé d'un bassin contenant 370 carpes, et toujours 50 gardons et 2 tanches, mais cette fois il n'est ni couplé à un bassin « épuration », ni nourri et il n'y a aucune pompe présente (**Fig. 6**).

- « Témoin macrophytes »

Ce témoin est planté comme le bassin « épuration » du premier système mais il n'est pas couplé à un bassin « production » (**Fig. 6**).

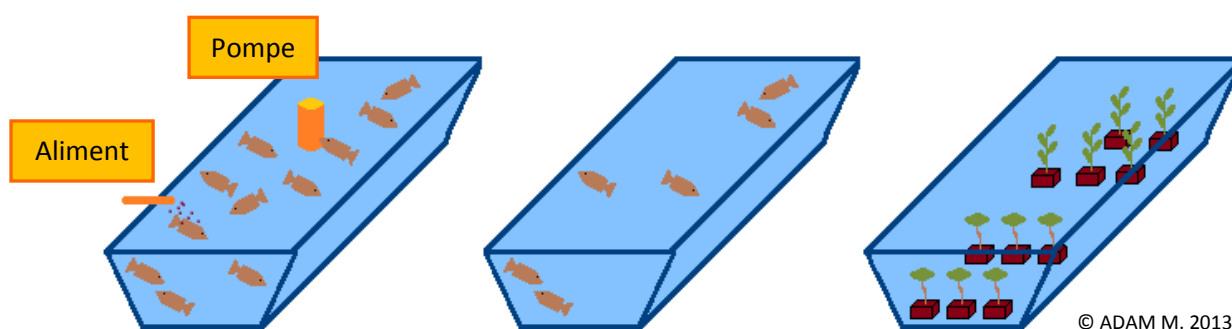


Fig. 6 Schéma des systèmes intensifs et non-nourris ainsi que du « témoin macrophytes » (de gauche à droite).

Le choix des étangs pour l'implantation des différents systèmes n'a pas pu se faire au hasard. En effet, il était conditionné par la possibilité d'implantation de bornes électriques, nécessaires à l'alimentation des pompes, bornes qui ne pouvaient pas être installées partout. Pour davantage de précision sur le plan d'organisation spatiale de l'expérience, l'**Annexe 5** présente la localisation précise ainsi que la configuration générale du site.

2- Evaluation de la taille et de la configuration de la lagune de macrophytes pour un traitement efficace des effluents piscicoles

a. Mise en charge et circulation de l'eau

Comme évoqué précédemment, nous avons choisi, dans les bassins « production » des systèmes couplés et dans les systèmes intensifs, une densité de 2 carpes/m², soit 1 000 poissons d'un été par étangs (FAO, 2013). Pour les systèmes non-nourris, nous avons ramené ce nombre à 370 carpes étant donné l'absence de distribution d'aliment exogène (Kerleo, 2003). Nous avons également ajouté 50 gardons et 2 tanches dans chaque étang (Schlumberger et Girard, 2013), afin de conserver les avantages d'un système de polyculture traditionnelle. En effet, l'élevage de plusieurs espèces de poissons occupant différentes niches écologiques, c'est-à-dire « la profession qu'elles occupent au sein de leur résidence » (Arrignon et al., 2002), permet de mieux valoriser la capacité de production de l'étang (Anonyme, 2004) : contrairement aux gardons pélagiques et omnivores à tendance herbivore, les carpes et les tanches sont plutôt bentophytes à tendance carnivore, les premières préférant des proies plus petites que les secondes (Schlumberger et Elie, 2008).

Le système hydraulique permettant la circulation de l'eau entre les bassins « production » et « épuration » des systèmes couplés est constitué d'une pompe et d'une surverse. Pour que les deux étangs gardent le niveau d'eau voulu, il fallait un débit d'entrée de sortie identique pour chacun d'eux. Etant donné que la pompe avait un débit de 30 m³/h à faible profondeur (< 2 m), pour une puissance de 0,55 kW (**Annexe 6**), la taille de la surverse ainsi que la profondeur de son enfouissement devaient être conséquentes. Suite à quelques problèmes de mise en place, l'élaboration de ce système s'est fait de manière empirique et n'a nécessité aucun calcul. En ce qui concerne la lagune de macrophytes, il a été nécessaire de réfléchir à la fois aux espèces nécessaires ainsi qu'au dimensionnement.

b. Choix des espèces de macrophytes

Dans un premier temps, nous avons présélectionné plus de 44 espèces (**Annexe 7**) pour leurs qualités épuratrices. Ensuite, nous avons dû opérer un tri pour en garder un nombre réduit tout en conservant une certaine diversité puisque plus celle-ci est importante plus l'assimilation des nutriments est grande (Le Campion, 2007). Au départ, nous voulions travailler uniquement avec des plantes ornementales (nénuphars, jacinthes d'eau, etc.), qui auraient constitué un revenu complémentaire pour le producteur et aurait contribué au caractère visuel de la lagune. Cependant, certaines des plantes envisagées sont aujourd'hui considérées comme invasives, ou du moins potentiellement invasives, et présentent donc un possible danger pour l'environnement. Ce sont pourtant ces mêmes végétaux qui sont utilisés dans un grand nombre de lagunage (Boutin, 1993 ; Liu et Seki, 1998 ; Mougin, 1988 ; Klabá, 2000), mais un tel choix allait à l'encontre des principes du projet PISCEnLIT. Tout en cherchant à conserver ce critère de sélection, nous en avons retenu trois autres : la valeur épuratrice, l'abondance dans les écosystèmes locaux et l'autochtonie. Les six plantes utilisées sont les suivantes: Massette (*Typha latifolia*), Glycérie aquatique (*Glyceria aquatica*), Baldingère faux-roseau (*Phalaris arundinacea*), Menthe aquatique (*Mentha aquatica*), Cornifle nageant (*Ceratophyllum demersum*) et Nénuphar jaune (*Nuphar luteum*).

Ensuite, il a été particulièrement difficile de dimensionner la lagune de macrophytes destinée à épurer l'eau du bassin intensif de carpes. Les études disponibles traitant du lagunage se concentrent sur les effluents domestiques (Boutin, 1982), industriels (Martin, 1997) ou bien d'élevage d'animaux terrestres (Sevrin-Reyssac, 1995). Bien que Piétrasantá et Bondon (1994) indiquent que les eaux de piscicultures (truites, carpes) peuvent être traitées de cette manière, très peu de travaux portent sur le sujet. Nous avons donc dû nous adapter à la littérature existante.

c. Evaluation des rejets potentiels

Dans un premier temps, pour pouvoir évaluer au mieux les rejets en nutriments des carpes, nous avons dû établir une estimation de leur croissance de mai à novembre. Ainsi, nous nous sommes basés sur le modèle *Augustyn – Szumiec* (Billard, 1995). Il est fondé sur les travaux empiriques de Szumiec, qui étudia la croissance de ces cyprinidés dans des étangs du centre de la Pologne. Ce modèle change selon l'âge des poissons (Ranson, 2003). Ici, nous avons travaillé sur des carpes d'un été, entrant donc dans leur seconde année :

$$G_2 = G_0 + 1,53810 \times \left(\sum \vartheta e \right)^{1,16864} \times d^{-0,55190} \times v^{0,27330} \times G_0^{0,51793}$$

- G_2 : Estimation du poids au terme de la deuxième année
- G_0 : Poids initial (g/individu)
- ϑe : Température moyenne journalière
- d : densité d'élevage finale (individu/ha)
- v : Teneur protéique des aliments (%)

Au départ, nous devons travailler sur des carpes de deux étés. Mais le cheptel qui aurait dû être disponible a été entièrement décimé par les cormorans durant l'hiver. Nous avons donc dû utiliser des carpes d'un seul d'un été, de 18,7 g en moyenne, provenant d'un élevage du Puy-de-Dôme. Compte tenu des habitudes alimentaires de ces poissons, ils ont été nourris avec de l'aliment extrudé coulant provenant de chez Le Gouessant (teneur protéique de 32 %). En prenant une mortalité de 5% (Billard, 1995), la densité d'élevage finale est de 950 individus par bassins, soit 19 000/ha. Enfin, nous avons utilisé l'évolution de la température sur les étangs du Rheu entre avril et novembre 2012 pour la construction du modèle. Les résultats obtenus sont présentés dans la **Fig. 7**.

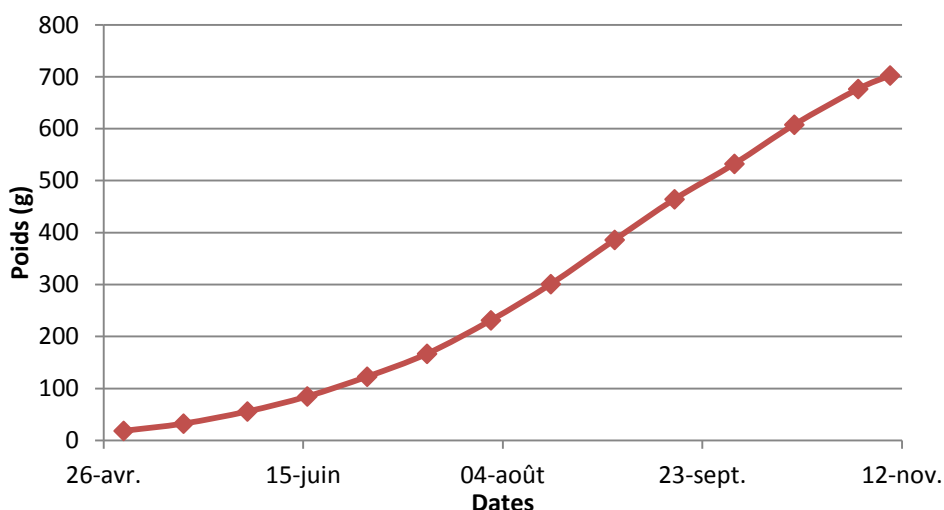


Fig. 7 Courbe de croissance prévisionnelle des carpes nourries d'après le modèle d'Augustyn – Szumiec ; $Poids = G_0 + 1,53810 \times (\sum \vartheta e)^{1,16864} \times d^{-0,55190} \times v^{0,27330} \times G_0^{0,51793}$; G_0 : Poids initial (g/individu), ϑe : Température moyenne journalière, d : densité d'élevage finale (individu/ha), v : Teneur protéique des aliments (%) (d'après Billard, 1995).

A partir de cette courbe, nous avons modélisé un poids moyen mensuel et nous en avons déduit une quantité d'aliment à distribuer chaque mois. Ces éléments nous ont ensuite permis de dresser un bilan de masse prévisionnel, mois par mois, d'un étang de 1 000 carpes en système intensif (Gross et al., 2000 ; Schreckenbach et al., 2000) (**Annexe 8**). En effet, afin de dimensionner la lagune de macrophytes (bassin « épuration »), il nous fallait estimer les rejets en phosphore et en azote des poissons (**Tab. 1**).

Tab. 1 Estimation des rejets de phosphore (P) et d'azote (N) journaliers moyens par mois (**Annexe 8**) (D'après Gross et al., 2000 et Schreckenbach et al., 2000).

| Mois | Température (° C) | Aliment distribué (kg/j) | Rejets moyens de P (g/j) | Rejets moyens de N (g/j) |
|-----------|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Mai | 18 | 1,2 | 6,4 | 14,2 |
| Juin | 19,7 | 2,5 | 14,1 | 39,2 |
| Juillet | 20,8 | 3,9 | 22,2 | 61,8 |
| Août | 21,6 | 7,1 | 47,7 | 145,6 |
| Septembre | 17,2 | 7 | 46,8 | 142,9 |
| Octobre | 14,3 | 5,5 | 32,9 | 94,2 |
| Novembre | 9,3 | 3,4 | 21 | 60,6 |

Les plus forts rejets ont donc a priori lieu en août, avec 145,6 g d'azote et 47,7 g de phosphore émis quotidiennement dans l'étang.

d. Détermination du nombre de plantes

Comme précisé précédemment, la plupart des études sur le lagunage par des macrophytes se sont surtout déroulées dans le cadre de traitements d'eaux domestiques. L'unité alors utilisée pour dimensionner les lagunes est l'équivalent-habitant (EH). Elle correspond aux rejets journaliers moyens d'une personne, à savoir, entre autre, 15 g d'azote total/jour et 4 g de phosphore/jour (Anonyme, 1993). Ces différentes études préconisent entre 5 et 15 m² de lagune/EH (Adam, 1993). Or, dans le cas présent, notre étang de carpes représente au plus fort de ses rejets (août), entre 9,7 et 11,9 EH. Ainsi, il nous faudrait une lagune comprise entre 59 m² et 179 m². En prenant la fourchette inférieure, et avec une densité de 5 plants au mètre carré (Vivier, 1997), cela représenterait au minimum 245 végétaux soit 735 pour les trois bassins de macrophytes. Au final, partant sur cette base et dans la limite de nos moyens techniques, nous avons introduit 320 plants dans chacun d'entre eux : 60 Massettes, 60 Glycéries aquatiques, 80 Baldingères faux-roseaux, 60 Menthes aquatiques, 20 Cornifles nageant et 40 Nénuphars jaunes.

3- *Empoisonnement et installation de la lagune*

Une fois les systèmes hydrauliques (pompes et surverses) en place, nous avons réparti les poissons à la fin avril. Rappelons que les carpes pesaient en moyenne 18,7 g à leur arrivée. De plus, elles étaient malades et affaiblies. En ce qui concerne les deux autres espèces, elles avaient été élevées sur place et pesaient environ 25 g pour les gardons et 1 kg pour les tanches (**Fig. 8**).



a. Pêche des tanches

a. Carpes d'un été

c. Répartition des gardons

Fig. 8 Photos de l'empoisonnement des étangs.

En ce qui concerne les végétaux, afin de bien connaître leur provenance, nous les avons prélevés nous-mêmes dans le milieu naturel en différents points :

- Massettes : étangs expérimentaux de l'INRA (Rheu, 35)
- Glycéries aquatiques : marais de Redon (Redon, 35)
- Baldingères faux-roseaux : fossé au niveau du Grand Bas-Mée (Chavagne, 35)
- Menthes aquatiques : fossé au niveau de la Moinerie (Noyal-sur-Vilaine, 35)
- Cornifles nageant : étangs d'Apigné (Rheu, 35)
- Nénuphars : Vilaine, (Brécé, 35)

Pour éviter toute interaction avec la vase, ils ont été plantés dans des bacs de graviers ou de sable (**Fig. 9**). Leur répartition s'est faite selon la configuration de l'étang (peu profond à l'entrée et sur les berges, profond à l'exutoire) et leurs exigences écologiques respectives (**Annexe 9**).



a. Mise en pot (gravier)

b. Répartition

c. Mise en eau

Fig. 9 Photos de la mise en place des plantes dans les bassins.

4- *Suivis zootechniques et physico-chimiques*

Afin de contrôler les performances zootechniques, un échantillon de carpes a été prélevé tous les mois dans chaque étang. En théorie, 3 à 5 % de la population initiale, soit entre 30 et 50 poissons, auraient dû être pesés pour avoir une idée de l'évolution de la biomasse totale et pour suivre la croissance. Néanmoins, la réalité a été tout autre : dans certains bassins, la pêche a été particulièrement difficile et peu de carpes ont été pêchées. Ces échantillonnages ont été effectués à la senne. En outre, plusieurs analyses ont été réalisées, pour suivre la qualité des eaux et cerner la productivité de chaque bassin :

- Mesures physiques (température, dioxygène, pH, transparence) de manière hebdomadaire (même jour et même heure) par un ensemble de sondes ; l'eau étudiée est prélevée via un seau lancé au centre de l'étang et ramené sur la berge.
- Mesures chimiques au début de l'expérience puis chaque mois (NH_4^+ , NO_2 , NO_3^- , PO_4^{2-} , N_{tot} , P_{tot}) sur des échantillons de 250 mL d'eau prélevée comme expliqué précédemment ; les flacons ont été analysés au laboratoire de l'UMR SAS (Unité Mixte de Recherche Sol Agro-Hydrosystème Spatialisation) à l'INRA de Rennes.

Pour cerner la quantité de nutriments présents dans les sédiments (N_{tot} , P_{tot}), la boue de chaque étang a été prélevée en début d'expérience, en trois points (entrée, milieu et sortie). La même analyse sera effectuée à la fin du test afin de comprendre comment a évolué le stock de nutriments contenu dans les vases. Enfin, pour savoir ce qui se passe dans le milieu sur une courte période, un suivi de 24h par système, mesurant tous les paramètres physico-chimiques précédemment évoqués, a été mis en place fin juin (**Annexe 10**). Pour ce qui est des plantes, faute de temps et de moyens, une simple analyse de recouvrement a été faite tous les deux mois : nous avons projeté la surface occupée par les plantes sur un plan horizontal en mimant une vue aérienne.

Pour comparer précisément les poids moyens mesurés dans chaque bassin, nous avons réalisé des tests de comparaison de moyennes. Nous avons, dans un premier temps, testé la normalité des échantillons (test de Schapiro-Wilk). Puis, selon les résultats, nous avons utilisé un test soit paramétrique, en l'occurrence Aspin-Welch compte tenu de l'indépendance des échantillons ainsi que des faibles effectifs, soit non-paramétrique (Mann-Withney).

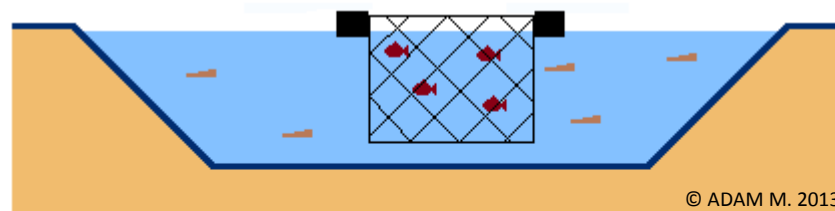
2. Production de sandres par une utilisation maximale du zooplancton (Projet 2)

1- Présentation de l'expérimentation

Le sandre est un produit de fort intérêt économique, avec un prix de vente de 25 €/kg pour des carnassiers de trois étés (Heymann, 2012). Le marché en est très demandeur et ce toute l'année et à tous stades, notamment de poissons d'un été. En outre, à cet âge, ils ont souvent un poids trop faible à l'automne et connaissent une forte mortalité pendant leur premier hiver (Schlumberger et Girard, 2013). Dans ce test expérimental, nous avons cherché à ce que ces jeunes sandres aient un apport continu de nourriture afin que leur poids soit plus important en sortie d'été, en maximisant l'utilisation du zooplancton. Cette étude se base sur le scénario 3 précédemment décrit : « Meilleure valorisation des niveaux trophiques ». Elle est menée sur six bassins de 400 m² situés au lycée agricole du Haut-Anjou à Château-Gontier (53). Ici aussi, afin de minimiser l'Effet bassin, il y a plusieurs réplicats (trois) pour chacun des deux systèmes testés (**Annexe 11**) :

- Système « Innovant »

Dans chaque bassin, préalablement chaulé et fertilisé (fumier de bovin), des géniteurs de poissons fourrages sont introduits dans des cages flottantes de type pantenne. Ces derniers pourront ainsi pondre sur un support, placé au fond de la cage. Une fois éclos les alevins constituent l'alimentation du poisson cible, le juvénile de sandre (*Sander lucioperca*). Le fait de mettre les géniteurs dans des pantennes permet, non seulement, de limiter la prédation de ces poissons sur les jeunes sandres, mais également de récupérer ceux qui ont pondu afin d'économiser les ressources trophiques du milieu. Les juvéniles de sandres sont, quant à eux, déversés à 5 semaines dans la colonne d'eau (**Fig. 10**).



- Sandre de 5 semaines
- Géniteur (poisson fourrage)

Fig. 10 Schéma du système innovant (coupe transversale de l'étang).

En outre, pour permettre un apport continu de nourriture (larves de poissons fourrages) un lot de géniteurs de différentes espèces est maintenu à une température proche de 12°C (température de l'eau de forage), dans des bassins thermorégulés en circuit fermé, ce qui retarde la maturation des ovocytes et donc la ponte. De manière bimensuelle, les géniteurs ayant pondu sont retirés et de nouveaux ajoutés dans les cages. Ainsi, les pontes décalées entraînent une éclosion des larves de poissons fourrages étalée dans le temps, ce qui permet de mieux exploiter les petites formes de plancton (rotifères en particulier) et de fournir constamment des proies de taille adéquate aux juvéniles de sandre.

- Système « Témoin »

L'introduction de l'ensemble des géniteurs de poissons fourrages dans les étangs se fait en une seule fois lors des pêches de printemps (avril), impliquant une seule reproduction par espèce. C'est ce qui est réalisé par les professionnels, mais avec une mise en charge de départ moins importante.

Pour davantage de précision sur le plan d'organisation spatiale de l'expérience, l'Annexe 12 présente la localisation précise ainsi que la configuration générale du site.

2- Mise en charge en sandres et en poissons fourrages

Pour les calculs qui suivent, n'ayant pas de données disponibles sur les températures des étangs étudiés, nous nous sommes basés sur celles des étangs du Rheu de 2012, site utilisée pour le Projet 1 sur les carpes, localisés à une centaine de kilomètres de Château-Gontier.

a. Mise en charge en carnassiers

Très peu d'études ont été réalisées sur l'élevage intensif de juvéniles de sandre en étangs. Cependant, aux Etats-Unis le doré (*Stizostedion vitreum*), cousin du sandre européen, de 5 semaines est élevé à une densité de 60 000 juvéniles par m², soit 2 400 pour 400 m² (Wright, 1996). Étant donné la fertilisation à l'urée très poussée des étangs américains, nous avons préféré partir avec une densité nettement inférieure, à savoir 200 pour 400 m², soit 5 000/ha. Ce chiffre reste tout de même plus élevé qu'en pisciculture d'étang traditionnelle (200 à 300/ha) (Schlumberger et Girard, 2013).

b. Besoins alimentaires du sandre

Afin de quantifier le nombre de poissons fourrages à ajouter, nous devons, dans un premier temps, connaître les besoins du sandre. Nous sommes partis de carnassiers de 5 semaines, de 0,57 g. La Fig. 11 nous présente l'évolution théorique du poids et de la taille de ces poissons au cours de l'expérience (juin à octobre). Pour ce faire, nous avons utilisé un modèle TGC (Thermal Growth Coefficient), notamment décrit par Dumas et al. (2007), en supposant un poids final de 40 g. Ensuite, la relation taille-poids utilisée est construite à partir de la formule $P = 0,007 \times L^{3,036}$ (Schneider et al., 2000), avec P le poids et L la longueur du poisson.

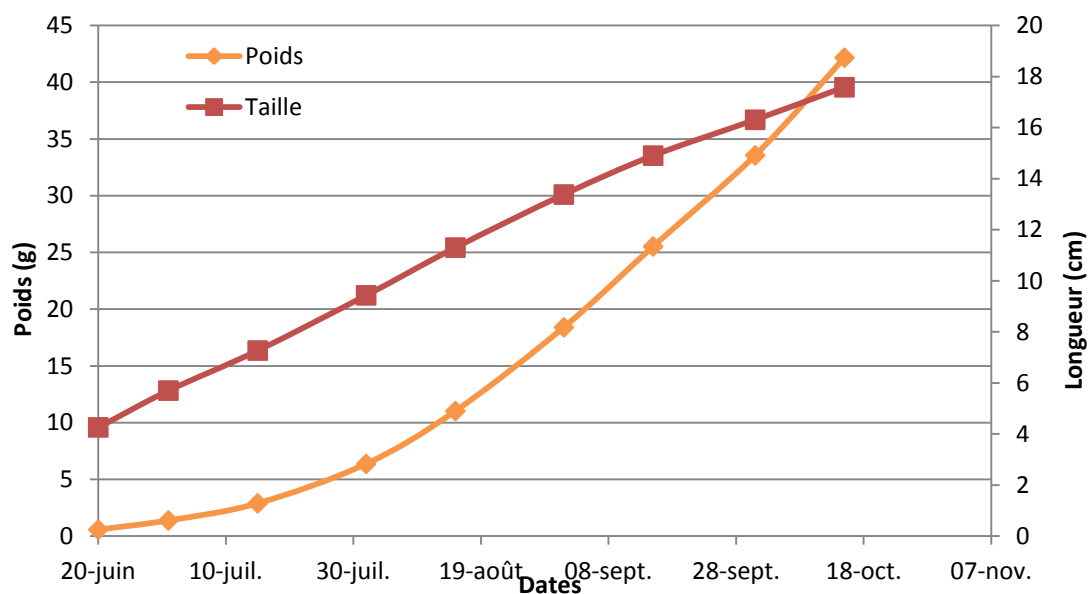


Fig. 11 Evolution prévisionnelle du poids P ($P = P_i^{\frac{1}{3}} + \frac{P_f^{\frac{1}{3}} \times P_i^{\frac{2}{3}}}{\sum T} \times \sum T_i$ (G, R et T) avec P_f (g) : Poids final, P_i (g) : Poids initiale, T_i (°C): Température moyenne du jour i et T (°C) : Somme des température sur toute la période de croissance) et de la longueur L ($L = (\frac{P}{0,0108})^{\frac{1}{3,036}}$) des juvéniles de sandres entre mai et octobre (d'après Dumas et al., 2007 et Schneider et al., 2000).

Notons que les sandres mesuraient environ 40 mm au début de l'expérience, et se nourrissaient donc déjà partiellement de poissons. Mais théoriquement ils ne sont passés au régime piscivore exclusif qu'à environ 10 cm de long (Keith et *al.*, 2011), soit à partir de début septembre.

A partir des courbes précédentes, nous avons pu déterminer l'évolution de la quantité de nourriture nécessaire aux juvéniles durant la durée de l'étude. Sachant que le sandre consomme en moyenne 5,5% de son poids en poisson fourrage (Popova et *al.*, 1977), nous avons pu déterminer les besoins des juvéniles contenus dans un bassin au cours de leur développement (**Fig. 12**). Notons que l'évolution de la biomasse a été calculée à partir d'une mortalité de 50% sur l'ensemble de la période d'étude (Schlumberger et Elie, 2008), soit par simplification une perte d'environ 5% du nombre de poissons initial toutes les deux semaines.

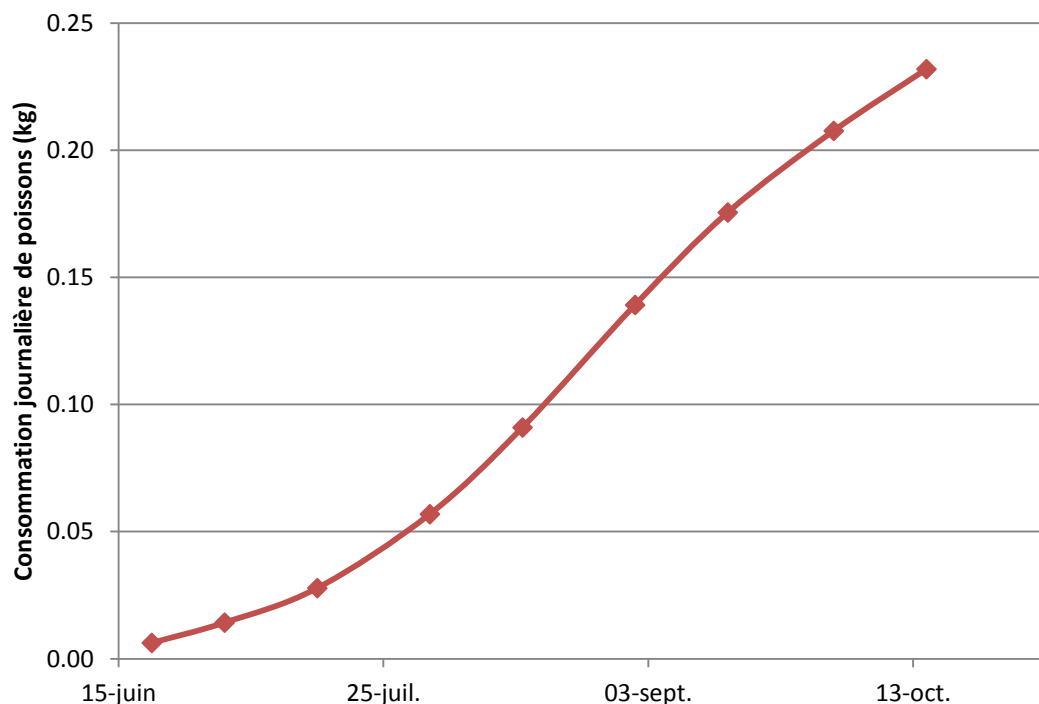


Fig. 12 Evolution de la consommation journalière C ($C = 0,05xB$, B : Biomasse en sandres) en poissons fourrages d'un bassin de 200 juvéniles de sandres, entre mai et octobre (d'après Popova et *al.*, 1977).

c. Choix des poissons fourrages

Les espèces de poissons fourrages pour cette étude devaient répondre à plusieurs critères :

- Proies classiques du sandre (Gourbier, 1975)
- Valorisation possible par l'utilisateur du système
- Températures de ponte complémentaires entre espèces pour s'étaler sur une longue période

Nous avons donc choisi de travailler avec des gardons, des rotengles et des tanches qui remplissaient l'ensemble de ces critères (**Tab. 2**).

Tab. 2 Caractéristiques générales sur la reproduction du gardon, du rotengle et de la tanche (d'après Bruslé et Quignard, 2001 ; Schlumberger et Girard, 2013 ; Jobling et al., 2002 ; Rodriguez, 2004 ; Keith et al., 2011 ; Gillet, 1989).

| | Gardon (<i>Rutilus rutilus</i>) | Rotengle (<i>Scardinius erythrophthalmus</i>) | Tanche (<i>Tinca tinca</i>) |
|-----------------------------|-----------------------------------|---|-------------------------------|
| Type de ponte | Unique | Fractionnée | Fractionnée |
| Température de ponte (°C) | 14 – 17 | 18 – 27 | 21 – 25 |
| Période de ponte | Avril à mai – juin | Avril – mai à juillet | Fin mai à juillet – aout |
| Fécondité (œufs/kg femelle) | 150 000 à 350 000 | 100 000 à 200 000 | 55 000 à 300 000 |
| Taux d'éclosion | 43,3 % | 43,3 % | 50 % |
| Survie larvaire | - | - | 30 % |

De la même façon, nous avons pu établir une courbe de croissance pour ces trois espèces, ce qui nous a permis d'obtenir l'évolution prévisionnelle de leurs mensurations en fonction du nombre de la somme des températures journalières (Fig. 13).

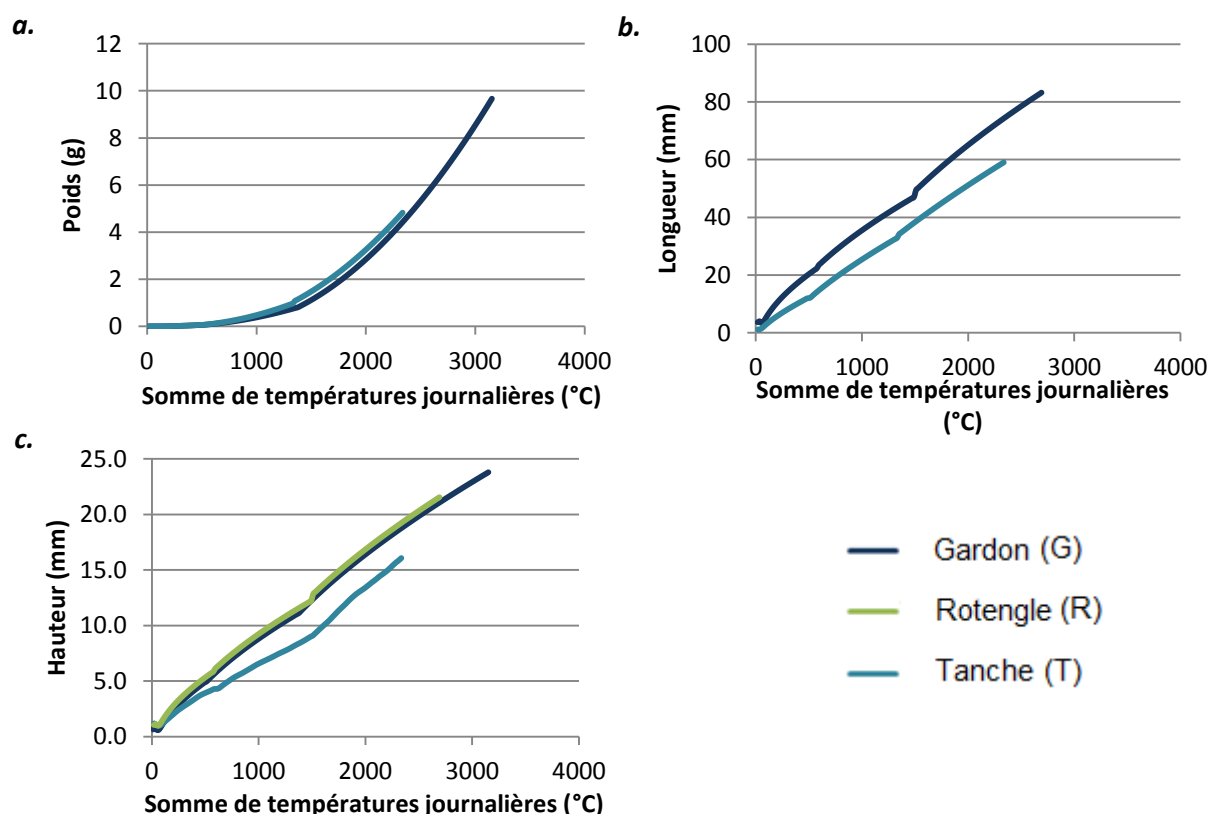


Fig. 13 Evolution chez le gardon, la tanche et le rotengle du poids P (a.) : $P = P_i^{\frac{1}{3}} + \frac{P_f^{\frac{1}{3}} \times P_i^{\frac{2}{3}}}{\sum T}$ $\times \sum T_i$ (G, R et T) avec P_f (g) : Poids final, P_i (g) : Poids initiale, T_i (°C) : Température moyenne du jour i et T (°C) : Somme des température sur toute la période de croissance (d'après Dumas et al., 2007) ; **de la longueur L (c.) :** $L = \left(\frac{P}{0,0056}\right)^{\frac{1}{3,33}} \times 10$ (G), $L = \left(\frac{P}{0,0116}\right)^{\frac{1}{3,02}} \times 10$ (R), $L = \left(\frac{P}{0,0372}\right)^{\frac{1}{2,74}} \times 10$ (T) (d'après Tarkan et al., 2006) ; **de la hauteur H (b.) :** $H = 0,257 \times L - 0,306$ (G), $H = 0,258 \times L + 0,1$ (R), $H = 0,198 \times L + 0,3$ (T) (d'après Schlumberger et Elie, 2008 et Freyheit, 2012).

Ces éléments (fécondité, taux d'éclosion, survie larvaire, croissance) permettent d'avoir une idée de la biomasse disponible pour les sandres, même si cela reste très aléatoire. Nous avons donc opté, dans les systèmes innovants, pour une introduction de 2 kg de gardons/rotengles de toutes tailles, toutes les deux semaines, et ce pendant huit semaines à partir de la mi-avril, complétés par deux apports d'alevins à vésicules résorbées (VR) de tanches début juillet (**Annexe 13**). Suite à un problème de stockage de géniteurs, nous avons dû travailler avec des VR. A cause du temps particulièrement froid, nous avons réalisé deux nouveaux apports, espacés de deux semaines chacun, de gardons et de rotengles dans les systèmes innovants.

d. Frayères : matériaux et taille

Arrignon (1998) décrit très bien les frayères flottantes ainsi que les matériaux à utiliser. Il préconise l'utilisation de conifères (épicéa, cyprès, etc.) puisqu'ils sont, d'une part, appréciés par les poissons pour la ponte et, d'autre part, résistant à une immersion prolongée. Cependant, il a été assez difficile d'en trouver suffisamment dans l'environnement proche. Nous avons donc choisi du carex, plante très présente dans la région d'étude. Pour ce qui est de la surface de la frayère, elle dépend du nombre d'ovocytes déposés. En prenant une fécondité des gardons de 250 000 œufs/m² par kg avec une introduction de 1 kg de femelles, une surface de 1 à 2 m² devrait suffire (Arrignon, 1998).

3- *Empoisonnement et installation des cages*

Afin d'optimiser la production de zooplancton, les étangs ont été chaulés (500 kg/ha) (Schlumberger et Girard, 2013) et fertilisés à hauteur de 10 t/ha (fumier de bovins). En outre, un épandage de foin a été effectué dans chacun d'entre eux pour faciliter le développement des rotifères (Schlumberger, 1998). Compte tenu du printemps particulièrement froid, les premiers géniteurs introduits à partir de la mi-avril n'ont probablement pas pondu. Nous avons ainsi réintroduit six fois des géniteurs au lieu de quatre. Les sandres ont été placés à la mi-juin dans les étangs.

4- *Suivis zootechniques et physico-chimiques*

Un échantillon de sandres a été prélevé tous les mois dans chaque étang pour contrôler les performances zootechniques. 10 à 15 % de la population initiale, soit entre 20 et 30 poissons, ont été anesthésiés puis pesés et mesurés pour avoir une idée de l'évolution de la biomasse totale et pour suivre la croissance des animaux. Cet échantillonnage s'est effectué à la senne.

En outre, comme pour le Projet 1 (carpes), plusieurs analyses ont été réalisées, pour suivre la qualité des eaux et cerner la productivité de chaque bassin :

- Mesures physiques (température, dioxygène, pH, transparence) de manière hebdomadaire (même jour et même heure) par un ensemble de sondes ; l'eau étudiée est prélevée via un seau lancé au centre de l'étang et ramené sur la berge.
- Mesures chimiques au début de l'expérience puis chaque mois (NH₄⁺, NO₂, NO₃⁻, PO₄²⁻, N_{tot}, P_{tot}) sur des échantillons de 250 mL d'eau prélevée comme expliqué précédemment ; les flacons ont été analysés au laboratoire de l'UMR SAS (Unité Mixte de Recherche Sol et Agro-hydrosystème Spatialisation).
- Mesures de la productivité en zooplancton tous les mois, via un trait de filet à plancton biconique au milieu de l'étang, le contenu, une fois fixé par du formol, a été séché et pesé.

Pour les analyses statistiques des résultats de croissance nous avons utilisé la même démarche que pour le Projet 1 (carpes).

III. Résultats

1. Croissance des carpes et traitement des effluents (Projet 1)

1- Croissance observée

Pour la compréhension des résultats suivants, rappelons qu'il y a deux réplicats pour chaque système testé :

- Système couplé : étangs n°502 et 507
- Système intensif (Int.) : étangs n° 504 et 505
- Système non-nourri (Nn-nour.) : étangs n°508 et 509

Obtenue à partir des relevés réalisés lors des pêches mensuelles de contrôle, la **Fig. 14** compare l'évolution du poids moyen des carpes élevées en système couplé, intensif et non-nourri. Les données pour l'étang intensif 504 ne sont que partielles. En effet, l'étang a été envahi par des nénuphars et du potamot nageant (*Potamogeton natans*) dès le mois de mai, ce qui a rendu les pêches particulièrement difficiles : le 26 juin aucun poisson n'a été prélevé et le 6 août seulement quatre ont pu être échantillonnés (0,4 % de la population initiale).

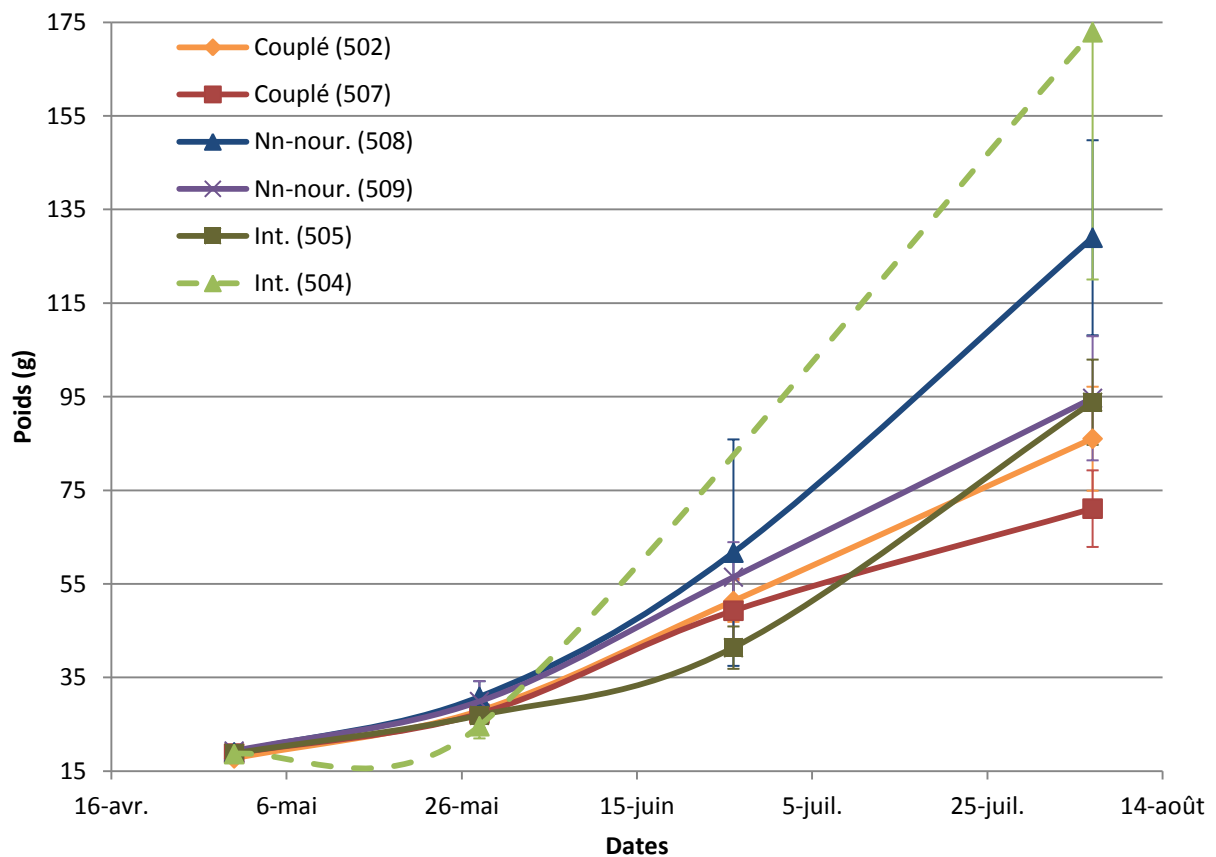


Fig. 14 Evolution du poids moyen des carpes élevées en système couplé, intensif (Int.) et non-nourri (Nn-nour.).

Nous pouvons donc considérer les résultats obtenus pour l'étang 504 comme peu représentatifs de la population de carpes présentes. Pour le reste, seul le poids moyen dans le non-nourri 508, du moins début août, est significativement plus grand que dans les quatre

autres bassins. Bien que ce ne soit pas statistiquement significatif au vu des intervalles de confiance, les carpes semblent avoir au cours de l'été une meilleure croissance dans les non-nourris que dans les couplés. Les bassins intensifs ont les résultats les plus faibles début juillet mais la tendance s'inverse ensuite. Les poissons du 505 intensif qui connaissent une brusque augmentation de leur masse corporelle, et deviennent plus gros que ceux des étangs couplés.

De la même manière, la **Fig. 15** présente l'évolution de la taille des carpes dans l'ensemble des étangs (couplés, intensifs et non-nourris).

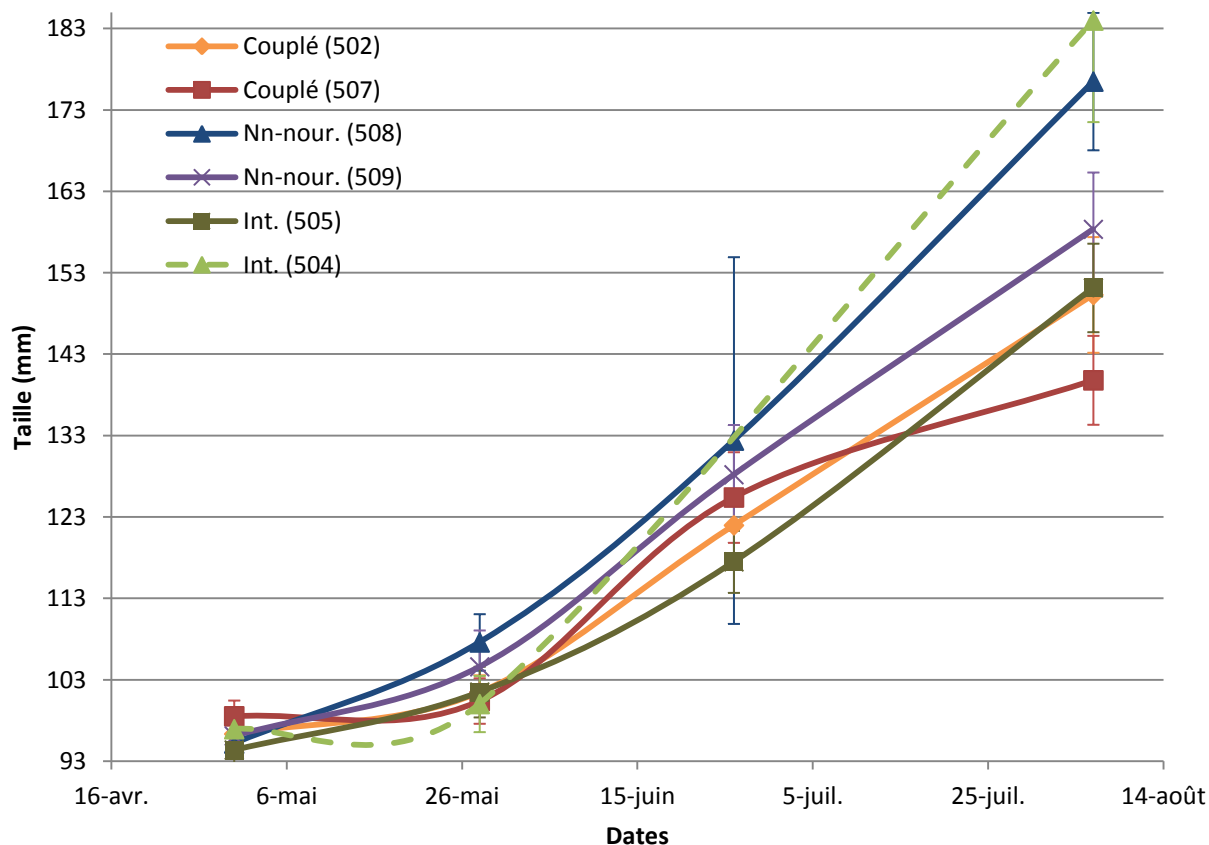
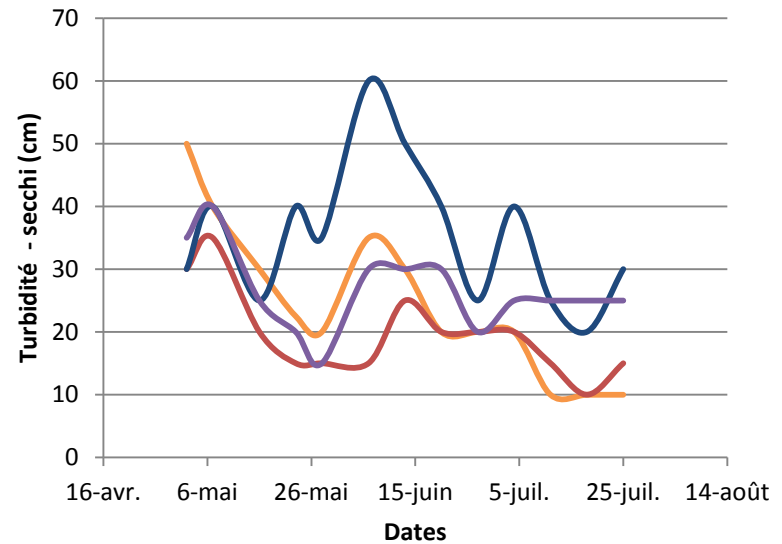
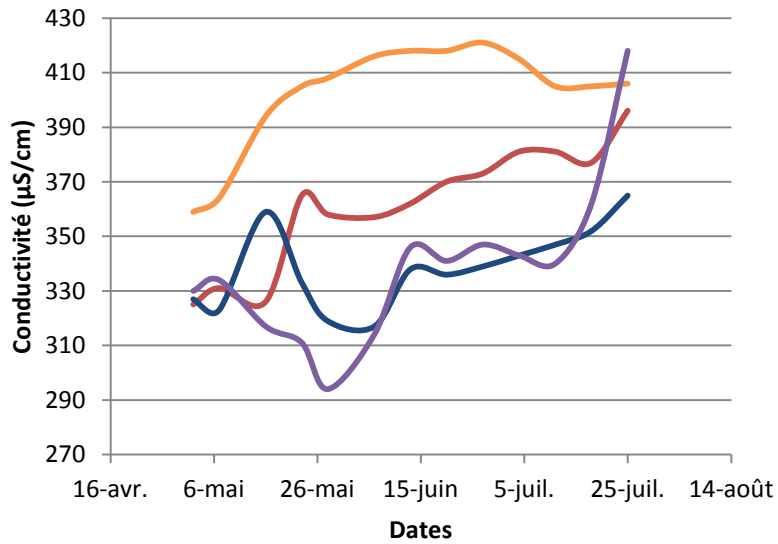
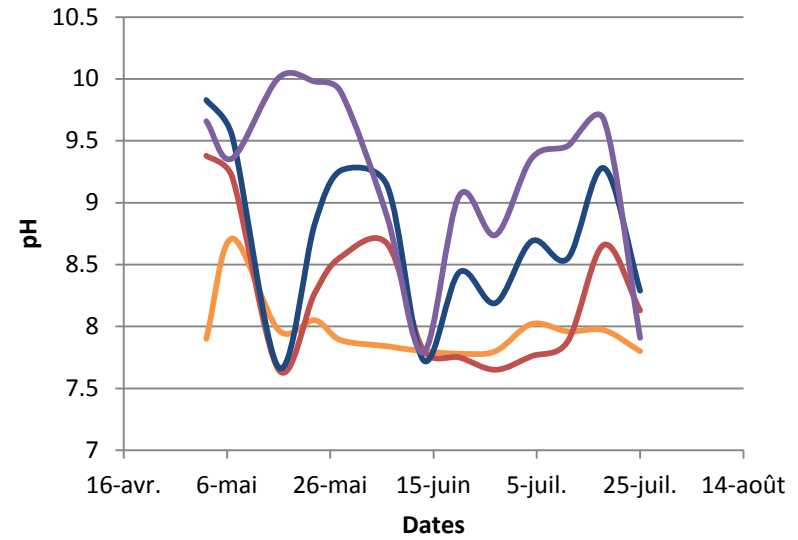
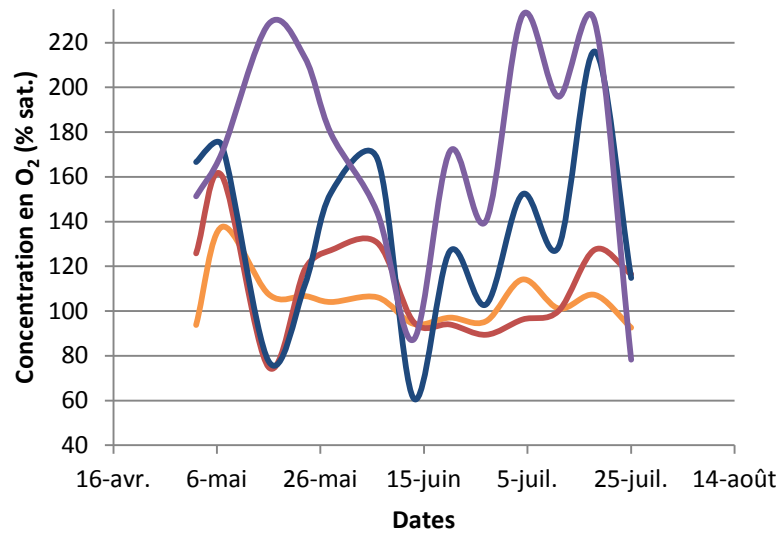


Fig. 15 Evolution de la taille moyenne des carpes élevées en système couplé, intensif (Int.) et non-nourri (Nn-nour.).

Nous observons la même évolution que pour les poids moyens. Seuls les poissons du 507 couplé ont une courbe de croissance particulière qui ne suit pas l'évolution des autres étangs.

2- Evolution physico-chimique de l'eau sur trois mois

Les mesures physiques hebdomadaires nous permettent d'avoir une idée de l'évolution des différents systèmes d'avril à août. Etant donné que l'objectif est de tester les étangs couplés, nous avons confronté leurs résultats à ceux des étangs intensifs et non-nourris (**Fig. 16** et **17**). Nous avons choisi de ne pas présenter les mesures chimiques mensuelles, puisque nous n'avons les résultats que pour le début des mois de mai et juin. A cette date les systèmes venaient à peine d'être mis en service, rendant donc ces données peu intéressantes pour le moment.



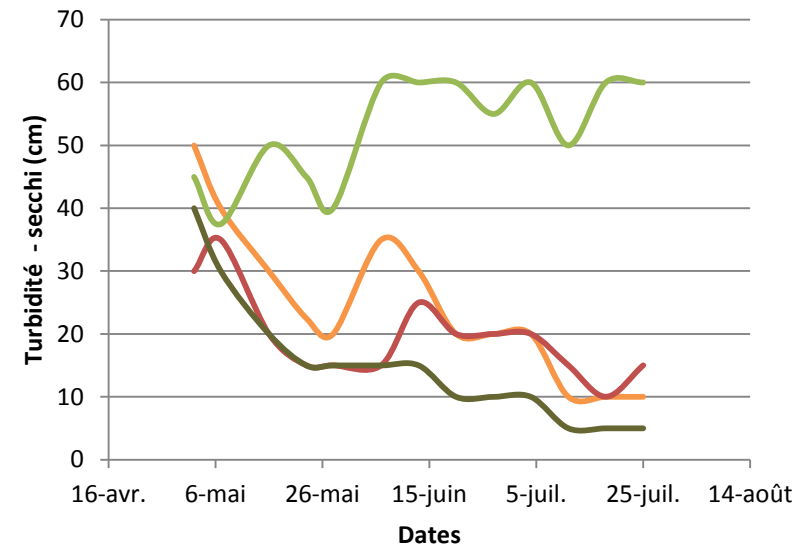
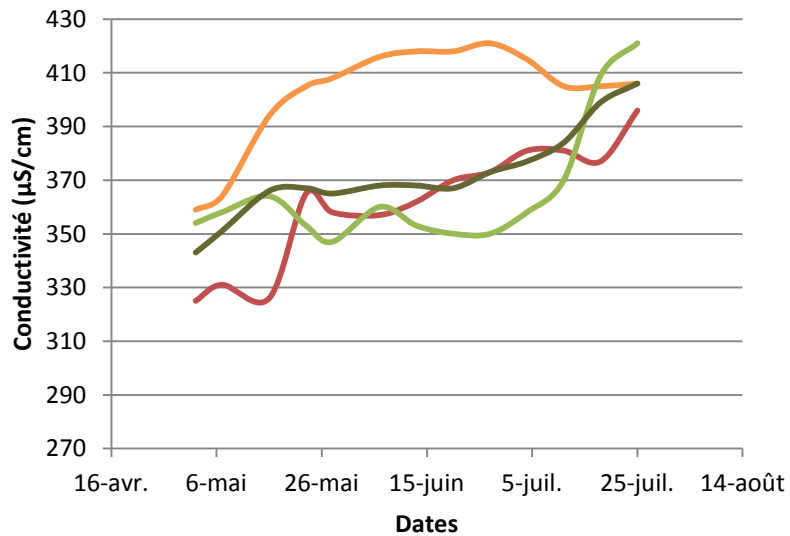
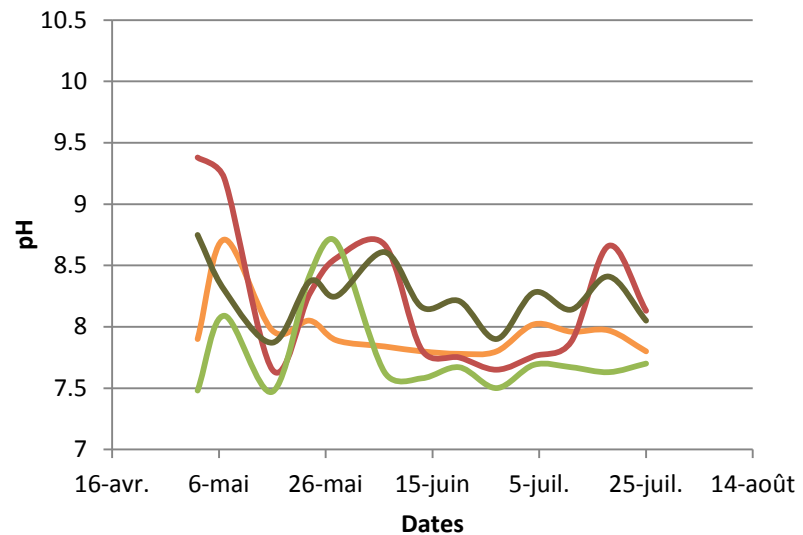
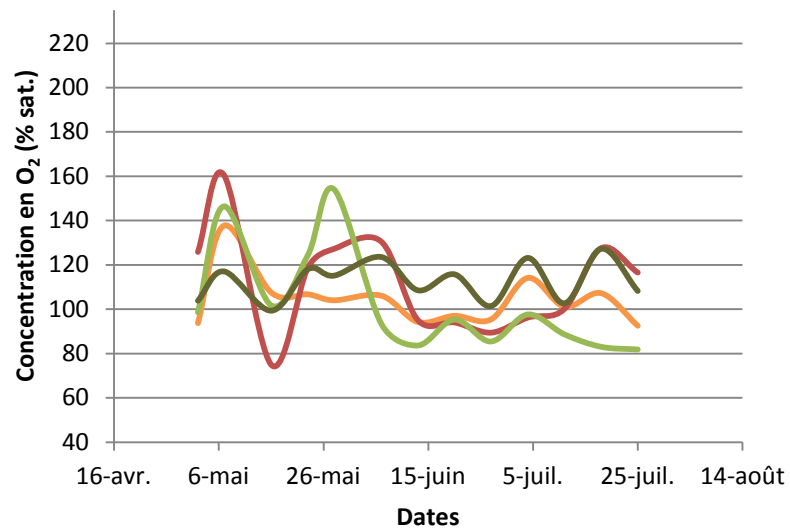
— Couplé prod. (502)

— Couplé prod. (507)

— Nn-nour. (508)

— Nn-nour. (509)

Fig. 16 Comparaison de l'évolution des paramètres physiques des systèmes couplés (bassin « production ») et non-nourris.



— Couplé prod. (502)
 — Couplé prod. (507)
 — Int. (504)
 — Int. (505)

Fig. 17 Comparaison de l'évolution des paramètres physiques des systèmes couplés (bassin « production ») et intensifs.

Nous avons ensuite cherché à comparer l'évolution du taux de dioxygène (O₂) du bassin « épuration » avec celles des systèmes intensifs et non-nourris (**Fig. 18**).

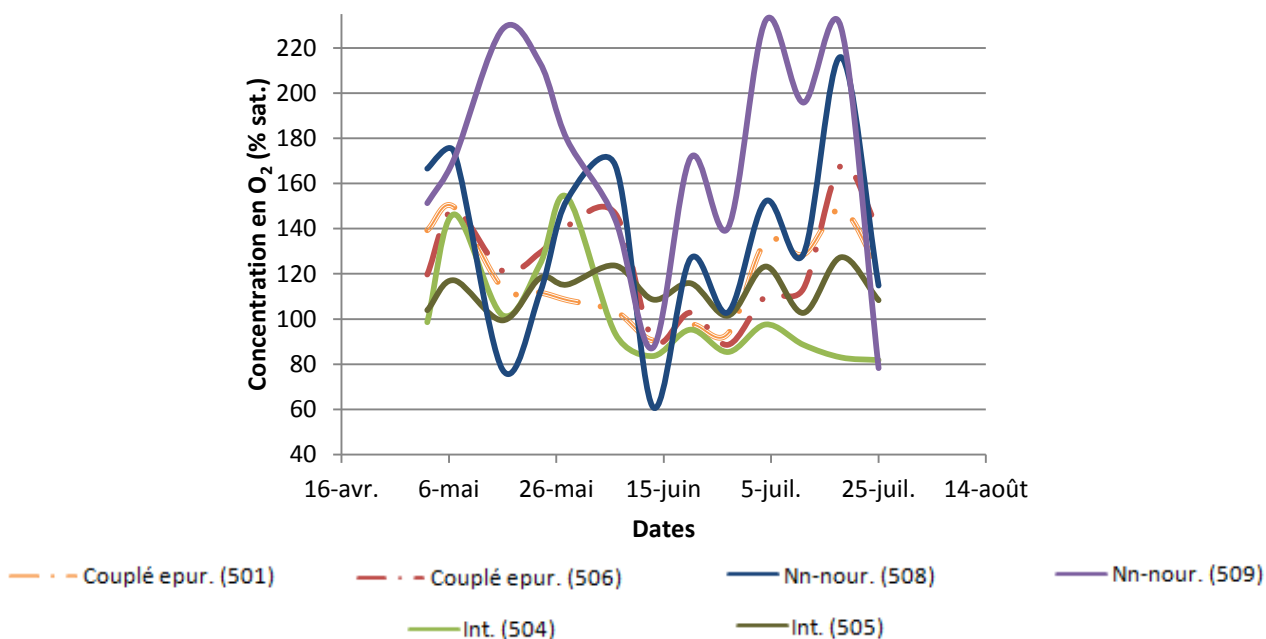


Fig. 18 Comparaison de l'évolution du taux de dioxygène des systèmes couplés (bassin « épuration »), non-nourris et intensifs.

Le taux de dioxygène suit la même évolution dans tous les bassins. Bien qu'il y ait que peu de différences entre les couplés et les intensifs, dans les étangs extensifs nous pouvons observer une amplitude bien plus importante que dans les deux autres.

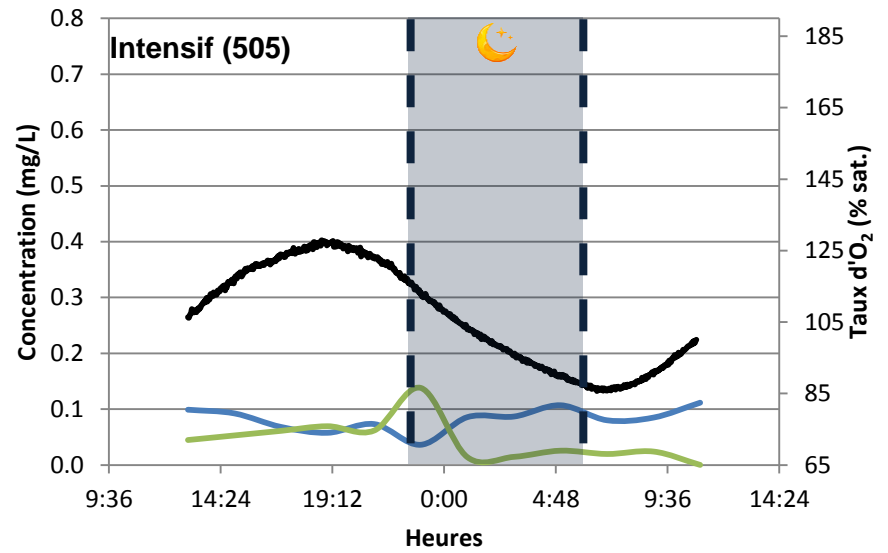
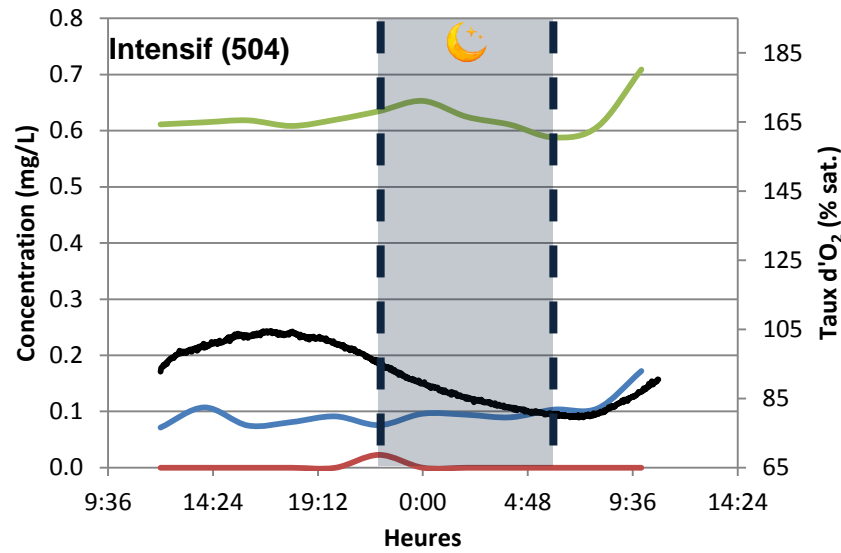
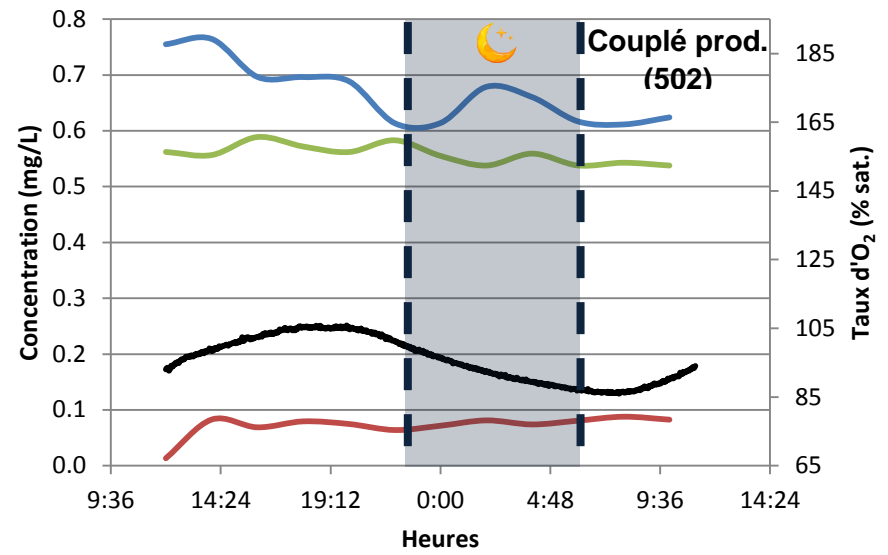
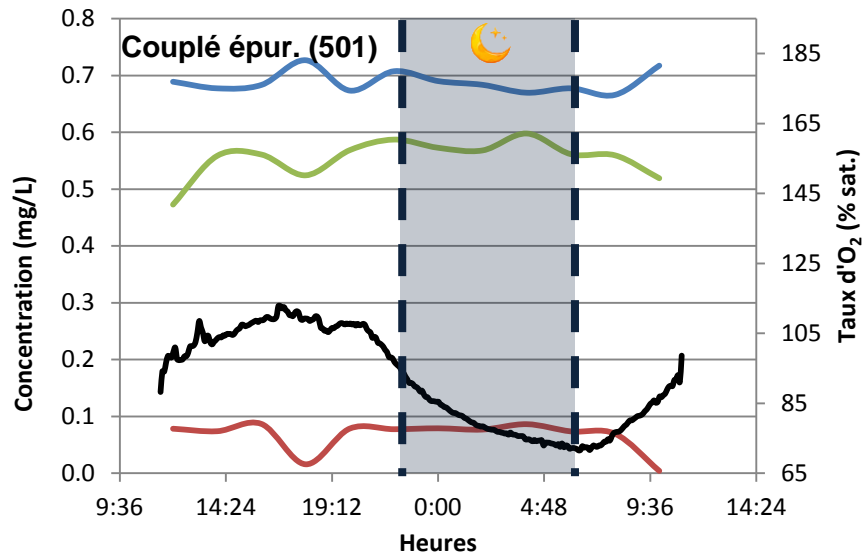
3- Evolution physico-chimique sur 24h

Au début de l'expérience nous avons réalisé des mesures chimiques de l'eau et des boues lors de la mise en eau (**Tab. 3**).

Tab. 3 Analyses chimiques de l'eau et des boues des neuf étangs lors de la mise en eau.

| Etangs | | 501 | 502 | 503 | 504 | 505 | 506 | 507 | 508 | 509 |
|---------------|------------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Eau (mg/L) | NH ₄ ⁺ | 0,103 | | | | | | | | |
| | NO ₂ ⁻ | 0,252 | | | | | | | | |
| | NO ₃ ⁻ | 34,3 | | | | | | | | |
| Boues | volume (m ³) | 21,1 | 16,2 | 22,9 | 12 | 19,3 | 16,8 | 15,2 | 19,3 | 16,4 |
| | azote (% MS) | 0,38 | 0,28 | - | 0,48 | 0,3 | 0,3 | 0,33 | 0,26 | 0,27 |
| | carbone (% MS) | 3,26 | 2,49 | - | 5,71 | 2,7 | 2,48 | 3,04 | 1,95 | 2,21 |

Nous remarquons un volume de vase conséquent dans l'ensemble des étangs. Pour ce qui est de l'eau utilisée pour les remplir, elle est très chargée en nitrate. Après avoir réalisé deux fois quatre suivis physico-chimiques consécutifs sur une période de 24 heures, entre le 24 et le 26 mai 2013, nous avons obtenu les graphiques présentés en **Fig. 19**. Les mesures dans les bassins « épurations » (501 et 506) ont été effectuées en sortie de lagune et celles dans les bassins « production » (502 et 507) au niveau de la surverse, avant l'entrée dans la lagune. De plus, suite à un problème de batterie d'un des préleveurs, les données pour l'étang 509, entre 18 et 11h le lendemain matin, sont manquantes.

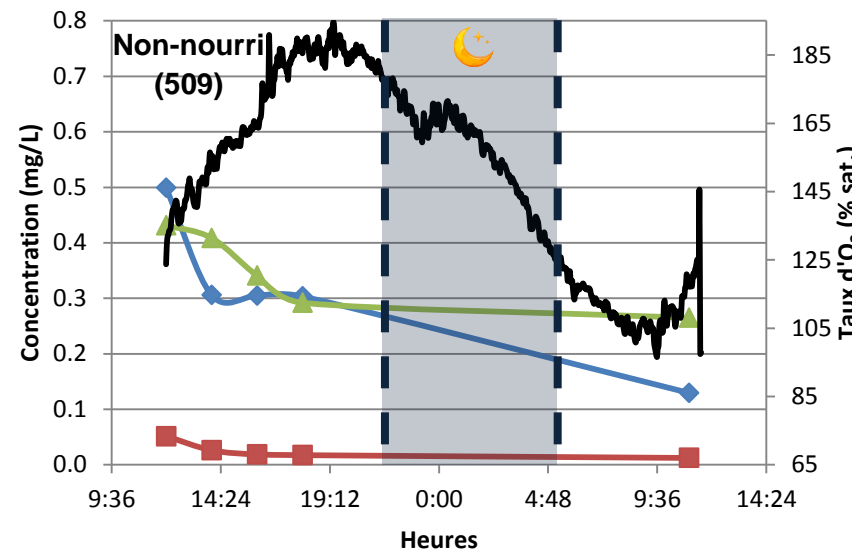
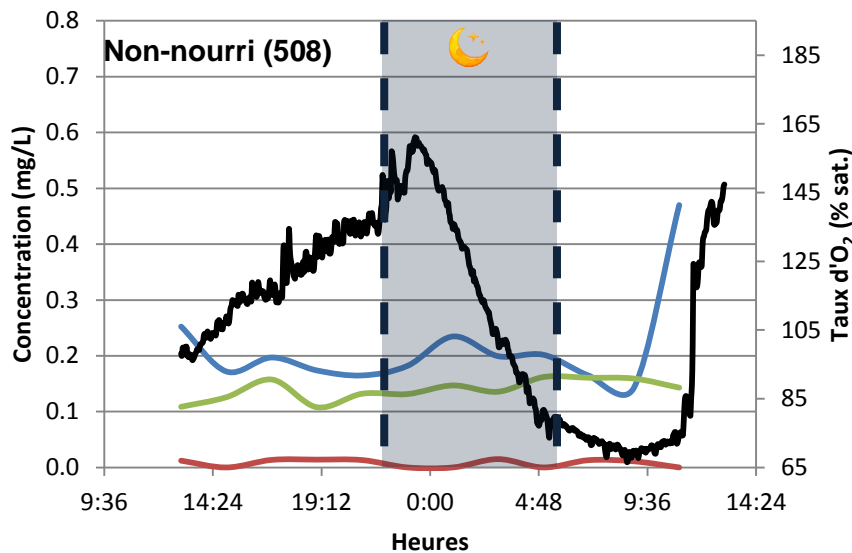
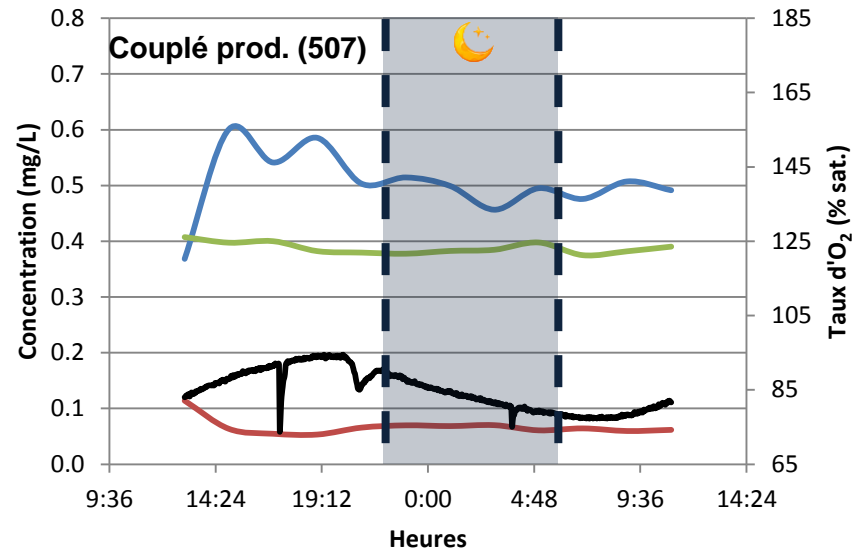
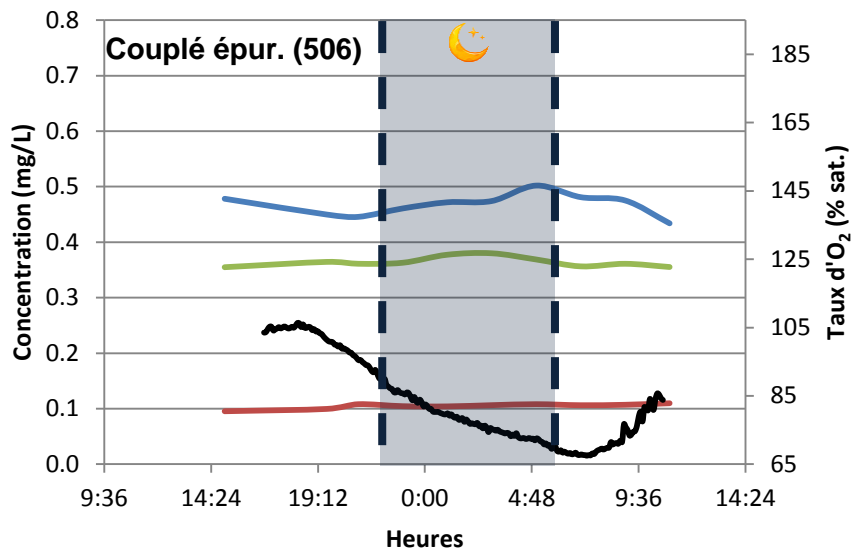


— N-NH4+

— N-NO2-

— N-NO3-

— O2 (% sat.)



— N-NH₄⁺ — N-NO₂⁻ — N-NO₃⁻ — O₂ (% sat.)

Fig. 19 Evolution chimique et du taux d'O₂ sur 24h de l'ensemble des étangs entre le 24 et le 25/06/2013 ou le 25 et le 26/06/2013.

Sur les 24 heures étudiées, l'ammoniacque est la forme azotée prépondérante dans l'ensemble des bassins, sauf pour le 504 (intensif). Pour ce qui est des nitrites, leur présence est attestée partout en faibles quantités, excepté dans le second bassin intensif (505). Ensuite, il existe visiblement peu de différence en entrée et en sortie de lagune, c'est-à-dire entre les bassins « production » (502 et 507) et « épuration » (501 et 506). Enfin, nous pouvons noter de faibles concentrations en nutriments dans le 505 comparativement aux autres étangs. En ce qui concerne le dioxygène, nous observons de plus fortes variations dans les extensifs que dans les autres.

4- Recouvrement en plantes des lagunes et du « témoin macrophytes »

Le recouvrement des étangs a été mesuré à deux reprises : fin mai, une fois l'ensemble des plantes en place, et à la mi-juillet, en milieu d'expérience (**Tab. 4**).

Tab. 4 Recouvrement des bassins « épuration » des systèmes couplés et du « témoin macrophytes » par les plantes introduites.

| | 28/05/2013 | 24/07/2013 |
|--------------|------------|------------|
| 501 (couplé) | 1,4 % | 23,8 % |
| 506 (couplé) | 1,5 % | 7,4 % |
| 503 (témoin) | 1,3 % | 4,5 % |

Au début de l'expérience, les bassins 501, 503 et 506 ont été plantés de manière identique. Le recouvrement fin mai était quasiment le même dans chacun d'entre eux. En deux mois, le 501 s'est bien développé contrairement aux deux autres : les macrophytes ont non seulement grandi mais ils se sont également multipliés hors des pots. Cependant, au cours des mois de juin et juillet, de nombreuses plantes (nénuphars, hydrophytes totalement immergées, etc.) non-plantées, et donc non-désirées, sont apparues (**Tab. 5**).

Tab. 5 Recouvrement des bassins « épuration » des systèmes couplés et du « témoin macrophytes » par les plantes non-désirées.

| | 28/05/2013 | 24/07/2013 |
|--------------|------------|------------|
| 501 (couplé) | 0 % | 35 % |
| 506 (couplé) | 0 % | 5,4 % |
| 503 (témoin) | 28,7 % | 90,5 % |

Le « témoin macrophytes » (503) a très vite été recouvert par des végétaux envahissant, qui ont fini par dissimuler la quasi-totalité de la surface de l'étang. Les deux bassins « épuration », et surtout le 501, sont également colonisés mais dans une moindre mesure.

2. Résultats intermédiaires de la production de sandre d'un été (Projet 2)

1- Croissance observée

Peu de pêche ont été effectuées jusqu'alors et nous n'avons donc seulement que deux mesures à présenter ici. La **Fig. 20** montre ainsi l'évolution du poids et la taille des juvéniles de sandres sur un mois et demi. Les données concernant le système innovant testé dans l'étang B5 sont à relativiser. Là encore, le bassin a très tôt été envahi par les plantes. Dès le 4 juillet il était recouvert à plus de 90% par des hydrophytes, compliquant les deux pêches de contrôle réalisées dans l'été. Nous avons également noté la présence de

nombreux carassins de l'année, présence que nous n'expliquons pas. Ces animaux semblent avoir pris le dessus sur les sandres, en consommant probablement une partie de leurs ressources trophiques. Ainsi, les données de l'étang B5 présentées ici mais ne seront pas prises en compte par la suite.

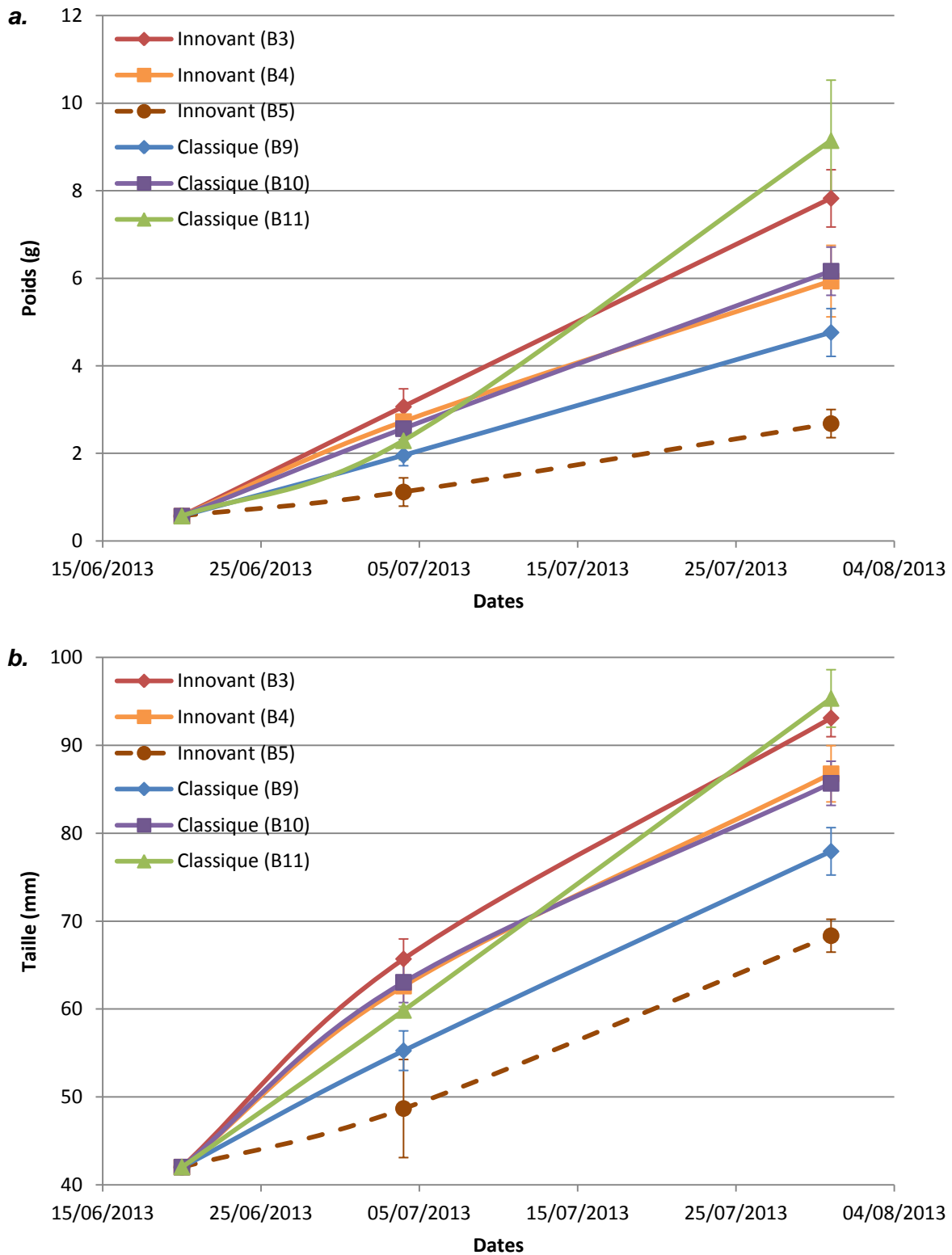


Fig. 20 Evolution du poids (a.) et de la taille (b.) des juvéniles de sandre entre leur introduction à cinq semaines et début août.

Lors des pêches de contrôle, les poids des sandres dans l'ensemble des étangs étaient significativement supérieurs à ceux prédits par le modèle utilisé pour le dimensionnement. De plus, deux semaines après l'empoissonnement, les sandres élevés dans les systèmes innovants avaient tendance à peser plus lourds que dans les systèmes témoins. Début août deux groupes distincts se dessinent. Le premier, avec des poids mesurés significativement plus importants, est constitué par un étang de chaque système (B3 et B11). Néanmoins, la courbe représentant le B11 (témoin) a tout de même tendance à être au-dessus de celle du B3 (innovant). Dans le second groupe, les sandres du deuxième bassin innovant (B4) ont un poids moyen situé entre ceux des deux autres bassins témoins (B10 et B9).

2- Evolution prévisionnelle de la taille des alevins de poissons fourrages

En s'appuyant sur les mesures de température quotidiennes, nous avons pu émettre des hypothèses quant au nombre de pontes des différents poissons introduits. Dès lors nous avons pu, dans un premier temps, estimer la date d'éclosion. Ensuite nous avons tracé des courbes de croissance hypothétiques (Dumas et al., 2007), plus précises dans le temps, en se basant toujours sur les températures mesurées mais aussi sur les températures de 2012 des étangs du Rheu (35) pour les jours à venir (**Fig. 21**).

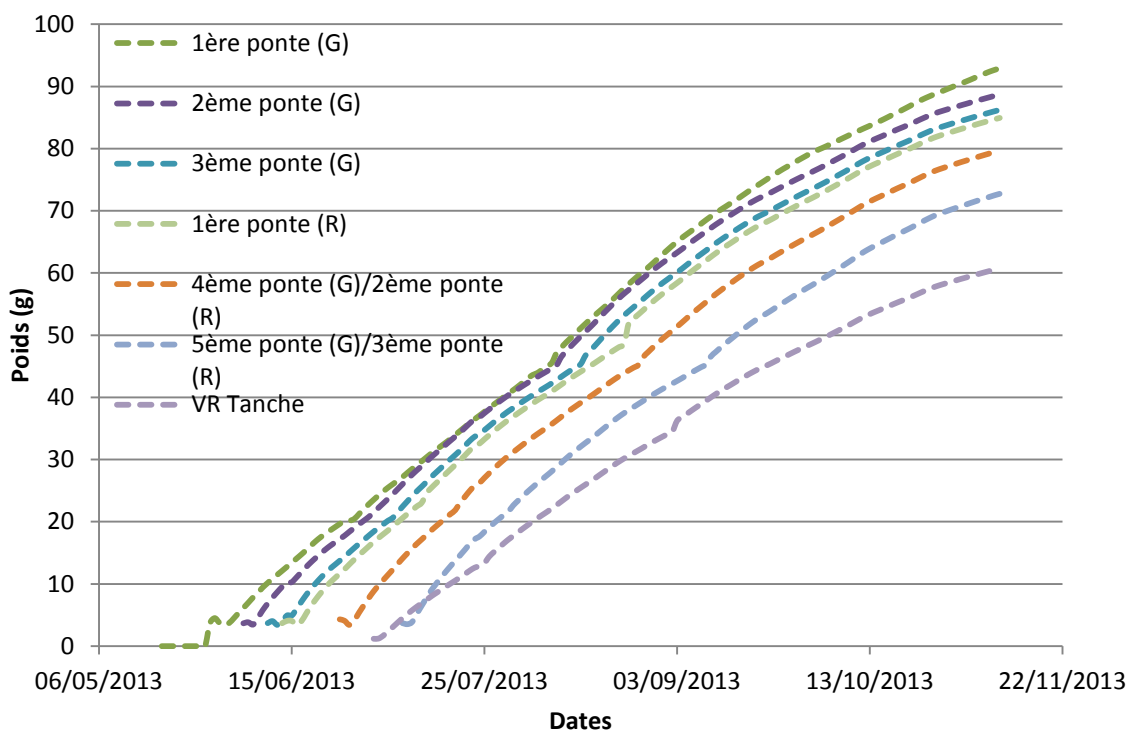


Fig. 21 Croissance hypothétique des différentes cohortes de gardons (G), de rotengles (R) et d'alevins à vésicules résorbées (VR) de tanches (d'après Dumas et al., 2007).

La totalité de ces pontes n'a probablement pas eu lieu dans tous les étangs. Cependant, les courbes précédentes, aussi approximatives soient-elles, nous montrent qu'à un instant t les sandres ont des proies d'une large gamme de taille à leur disposition.

IV. Discussion

Comme nous avons pu le voir précédemment, la pisciculture d'étang est basée sur l'écosystème et dépend donc fortement du milieu. Chaque bassin peut donc évoluer différemment des autres, ce qui explique parfois les différences entre systèmes (Effet bassin). Nous avons tout de même tenté de nous en affranchir au maximum, d'une part en chaulant et en mettant en assec durant quelques semaines chaque étang et, d'autre part, en travaillant à partir de plusieurs réplicats.

1. Augmentation de la productivité et traitement des effluents piscicoles par une individualisation du compartiment « macrophytes » (Projet 1) : un système à améliorer

1- Analyse des résultats

a. Bilan de croissance dans les différents systèmes

Nous n'avons pu travailler qu'à partir de poids moyens, et non de biomasse, il faut donc relativiser les résultats présentés ici et éviter toute conclusion hâtive quant à la performance des systèmes. Les résultats finaux nous en apprendront davantage.

Le modèle de croissance utilisé initialement pour construire la lagune s'est révélé très optimiste par rapport à l'évolution du poids moyen observée des carpes au cours des pêches de contrôle. En se basant sur les températures de 2012, plus chaudes au printemps mais plus froide en été, il prévoyait début juillet des carpes de 121 g (Billard, 1995). Cependant, les poissons pêchés dans les étangs intensifs ou dans les bassins « production » des systèmes couplés pesaient en moyenne 47,3 g, soit 60 % de moins. La croissance des carpes aurait probablement pu être plus importante si elles avaient été en meilleure santé à l'empeisonnement début mai. A leur arrivée, elles étaient couvertes de points blancs, symptôme attestant de la présence d'un protozoaire (FAO, 2013), et avaient, pour la plupart, des queues tronquées. Bien que leur état de santé semble s'être amélioré pendant le premier mois de l'expérience, il n'en demeure pas moins qu'une partie des carpes pêchées fin mai possédaient toujours quelques grosseurs au niveau de la mâchoire. A cela s'ajoute les nombreux morts ramassés courant mai, 54 seulement pour l'étang 502, et une première pêche de contrôle difficile, à savoir de nombreux coups de filets pour n'obtenir que 3 % de la population initiale. Nous avons fini par supposer une mortalité importante, environ 40 %, au cours du premier mois. Il faut également noter que les températures du printemps 2013 étaient bien inférieures aux normales saisonnières (Météo France, 2013), ce qui n'a pu que ralentir la croissance des poissons.

Bien qu'il n'y ait aucune différence statistiquement significative, nous notons une croissance légèrement supérieure dans les systèmes non-nourris que dans les couplés et les intensifs. Cette observation peut être expliquée par deux facteurs distincts. D'une part, il est possible que les poissons ne mangent pas les granulés. En effet, lors de la distribution de la ration les carpes ne montent pas sur l'aliment. Cela est peut-être dû au fait qu'elles n'y ont jamais été habituées auparavant. D'autre part, en se basant sur l'évolution de la turbidité, et surtout sur celle du taux de dioxygène, ainsi que sur les observations réalisées au moment des mesures, les étangs non-nourris sont visiblement plus productifs. Nous avons pu en tirer une évolution qualitative hypothétique du plancton au sein de ces bassins (**Fig. 22**). Il n'y a que dans ces deux étangs que des observations massives de plancton ont été faites. Cette hypothèse est confirmée par un pH élevé, entre 9 et 10, au moment des pics de concentration supposés de phytoplancton, en pleine journée. Il y aurait donc eu deux blooms de microalgues suivis de zooplancton. Comme nous l'avons vu, ces deux compartiments constituent la base de la chaîne trophique et profitent donc aux carpes, poissons omnivores, qui s'en nourrissent. Ainsi, l'alimentation naturelle est ici plus abondante, ce qui est

probablement une conséquence de l'antériorité de ces deux bassins : d'après les observations des techniciens, ils ont apparemment toujours été plus productifs. Nous pouvons donc nous attendre à de tels résultats, mais comme nous avons pu le préciser précédemment, l'attribution des étangs aux différents systèmes était conditionnée par la proximité d'une source électrique et nous n'avons donc pas pu choisir. Au final, cet abondance de zooplancton pourrait donc compenser l'absence de distribution d'aliment industriel. L'un de ces deux phénomènes, voire la combinaison des deux, expliquerait ainsi les meilleures croissances observées dans les étangs 508 et 509.

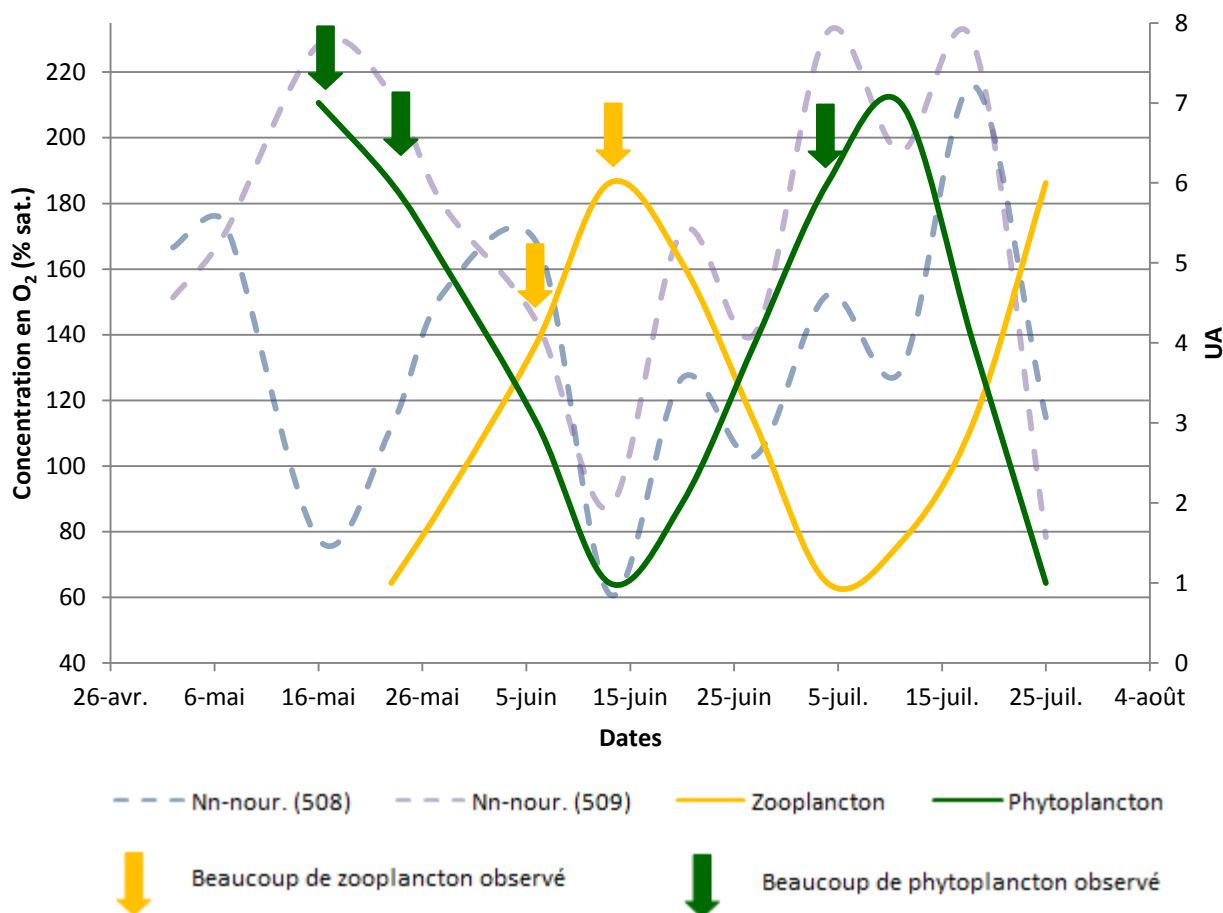


Fig. 22 Evolution possible du phytoplancton et du zooplancton dans les étangs non-nourris (508, 509).

Néanmoins, bien qu'elle ne soit a priori pas létale, la sursaturation en dioxygène induite peut entraîner des risques forts de maladies, qui deviennent non négligeables lors d'une exposition prolongée à un taux de 150 % de la saturation (Boyd, 1982). Dans le cas présent, cette valeur est atteinte sur 40 à 70 % de la période de mesure.

En outre, jusqu'à juillet, les poids mesurés dans les systèmes intensifs ont tendance à rester inférieurs à ceux des bassins « production » des systèmes couplés. Cependant, le 6 août, les carpes du 505, seul étang intensif pris en compte dans cette étude, ont connu une forte croissance. Les températures de l'eau étant quasiment identiques dans les bassins, il semble que les chaleurs de juillet aient davantage profité aux étangs nourris non couplés. Ainsi, l'épuration des effluents piscicoles semble avoir peu d'influence sur la croissance des poissons, peut être par manque d'efficacité de la lagune.

b. Efficacité de la lagune de macrophytes

L'analyse du suivi physique hebdomadaire montre tout d'abord que la mise en place du système a été particulièrement longue, les courbes ne devenant stables que vers début juin. En effet, les derniers macrophytes ont été plantés le 15 mai et l'ensemble des systèmes hydrauliques, pompes et surverses, fonctionnaient pleinement à partir du 23 mai. Les étangs ont ensuite dû se stabiliser avant que nous puissions obtenir des résultats significatifs. De plus, l'eau lors du remplissage des bassins était très chargée en nutriments azotés. Les concentrations en nitrates ont considérablement baissé, permettant, selon les cas, le développement de phytoplancton ou de macrophytes indésirables. Une partie de l'azote a également pu être fixée par les vases et, ce, avant la mise en place de la lagune.

Nous manquons pour le moment de données chimiques significatives. Les mesures à notre disposition ont été effectuées chaque mois à partir de début mai, mais nous n'avons, à la rédaction de ce document, que les trois premières, c'est-à-dire jusqu'à début juillet. Comme précisé précédemment, les systèmes étaient à peine stabilisés à cette date et les plantes pas encore bien développées. Si nous nous fions à l'évolution du recouvrement, les lagunes, au moins celle du 501, devraient encore se densifier d'ici octobre. Nous pouvons tout de même tenter de nous appuyer sur les résultats obtenus début juillet via le suivi 24h. Même si le système était encore jeune, l'étude de ces courbes nous indique plutôt une non-efficacité du système, avec une épuration des nutriments qui semble quasi-nulle. Les taux d'ammoniacque, de nitrite et de nitrate (forme assimilable de l'azote par les macrophytes) sont sensiblement les mêmes en sortie des bassins « épuration » (501 et 506) et « production » (502 et 507). Une légère différence en niveau des 507 et 506, à savoir en moyenne 15 % de nitrate et 7 % d'ammoniacque en moins, laisse entre apercevoir un meilleur fonctionnement de la lagune dans les mois suivants. Le second suivi 24h, prévu en septembre, devrait ou non nous le confirmer. Le « témoin macrophytes » n'est pas exploité ici, vu que l'étang 503 est envahi à 95 % par des plantes indésirables, ce qui fausse complètement les résultats. Les taux de nutriments azotés (ammoniacque, nitrite et nitrate) dans l'ensemble des étangs, sauf dans le 505, restent dans les normes quoique relativement élevés. Ils peuvent être expliqués soit par une charge importante de l'eau du cours d'eau qui les alimente (Flume), même si les concentrations en nitrates ont considérablement baissé, soit par un relargage des sédiments, présents en grande quantité (entre 12 et 22 m³). En effet, ce compartiment constitue un grand réservoir de matière azotée. Les faibles concentrations du 505 s'expliquent, quant à elles, difficilement : nous n'avons observé ni un développement massif de macrophytes ni une présence significative de phytoplancton. De plus, le volume initial de boues est équivalent à celui des autres bassins.

Enfin, en regardant la comparaison du taux de dioxygène entre les lagunes des systèmes couplés et des systèmes intensifs et extensifs, nous remarquons que les macrophytes ne permettent pas, dans le cas présent, une meilleure oxygénation du milieu. En effet, il n'y a que très peu de différences entre les bassins « épuration » et les étangs intensifs. Les fortes amplitudes de dioxygène dans les extensifs s'expliquent toujours pas la présence massive de phytoplancton photosynthétique. Cependant, il est tout à fait possible que l'oxygénation par les végétaux soit gommée par l'effet des systèmes hydrauliques.

c. Effets des systèmes hydrauliques

La mise en place des pompes, que ce soit dans les systèmes couplés ou bien dans les systèmes intensifs, entraîne une circulation de l'eau au sein de bassins habituellement d'eau stagnante. L'effet de ces installations se fait tout de suite ressentir en niveau de la quantité de dioxygène dissout. Les poissons sont très exigeants envers le taux de dioxygène, qui doit être compris entre 80 et 120 % de la saturation (Schlumberger et Girard, 2013 ; Boyd, 1982). Après la mise en service de tous les systèmes hydrauliques dans les étangs concernés (couplés et intensifs), à savoir après le 23 mai, les variations d'O₂ se stabilisent. Elles évoluent ensuite peu, et restent situées entre les deux valeurs limites

précédemment énoncées. Comme nous avons pu le voir ce n'est pas le cas des étangs extensifs qui ont de très fortes variations, avec des valeurs très hautes. Les pompes ont ainsi permis une régularisation du taux de dioxygène. De plus, le suivi réalisé sur 24h nous indique une faible variation au cours de la journée de la concentration de ce gaz. En temps normal, surtout par de fortes températures, nous pouvons observer une stratification du milieu : en journée, la strate supérieure est riche en dioxygène contrairement à la strate inférieure plutôt en hypoxie, tendance qui s'inverse au cours de la nuit. Dans le cas présent, ce phénomène est bien plus marqué dans les étangs extensifs (508 et 509) que dans les autres bassins, où le taux varie peu comparativement. La circulation de l'eau via les pompes, seules ou couplées aux surverses, a entraîné une déstratification du milieu, ce qui devrait profiter aux carpes. Elles possèdent un bon taux de dioxygène, entre 80 et 120 %, sur le fond de l'étang où elles évoluent, et ce, toute la journée.

En somme, le manque de répétabilité rend particulièrement difficile l'étude comparative des systèmes. Néanmoins, nous constatons tout de même que la lagune semble peu efficace dans le traitement des effluents, ce qui ne nous permet pas de mettre en évidence le rôle épurateur des plantes. Cependant, nous savons qu'il existe (Marcel, 1996), il faut juste chercher un moyen de l'utiliser au mieux, ce que nous n'avons pas réussi à faire ici.

2- Propositions d'amélioration

Au vu des résultats précédents, les performances du système testé peuvent être remises en question. Nous n'avons pas pu conclure quant à l'importance du rôle épurateur du compartiment macrophytes au sein d'un étang. Au cours de la mise en place ainsi qu'à la fin des analyses nous avons soulevé plusieurs problèmes, que ce soit au niveau du protocole ou bien des systèmes eux-mêmes, et qui, s'ils sont résolus, pourraient contribuer à l'amélioration du système.

a. Modifications du protocole initial

Certains résultats sont difficiles à interpréter, probablement à cause d'un « Effet bassin » trop fort. A l'avenir, si l'expérience est reconduite, nous devons attacher une importance toute particulière à corriger au maximum ce problème. Nous pourrions déjà allonger le temps de préparation des bassins et non pas commencer l'expérience dans la précipitation comme nous avons dû le faire ici. Bien évidemment il faudra de nouveau chauler les étangs et les mettre en assec. Mais c'est sur la durée de cet assec que nous pouvons agir. Comme nous l'avons vu précédemment, prolongé cette phase du cycle de production de plusieurs mois présente de nombreux avantages. Ainsi, le volume des boues diminuera par une minéralisation accélérée et les plantes envahissantes pourront être plus facilement éliminées, naturellement ou bien mécaniquement (faucardage). Les étangs seront donc uniformisés, réduisant l'impact possible du compartiment sédiments ainsi que les nuisances engendrées par les macrophytes non-désirés sur les systèmes testés.

Une autre alternative pourrait être d'augmenter le nombre de réplicats de chacun des systèmes. Dans le cas présent, nous avons été limité techniquement par le nombre de bassins disponibles. Néanmoins, le projet initial était un peu ambitieux : comparer trois, voire quatre avec le « témoin macrophytes », systèmes différents. Il faudrait réduire ce nombre en posant clairement les objectifs de départ et savoir ce que l'on cherche à tester : l'évolution de la biomasse en carpes d'un système intensif épuré, la capacité épuratrice du compartiment macrophytes, etc.

Ensuite, afin de pouvoir réellement statuer sur le rôle des macrophytes il est nécessaire de suivre davantage l'évolution de la lagune. Ici, étant donné que j'avais la charge de deux expériences en parallèle (Projets 1 et 2), je n'ai pas eu le temps de réaliser une étude plus poussée de ce compartiment. Nous aurions pu, dans un premier temps, soit

mieux utilisé le « témoin macrophytes », qui a ici très vite été délaissé, soit le supprimer et augmenter le nombre de réplicats pour les autres systèmes. En plus, nous aurions eu plus de temps pour étudier les lagunes des étangs couplés. En effet, un simple suivi par une analyse de recouvrement n'est pas suffisant. Il serait, par exemple, intéressant de comparer la biomasse initiale et finale. Nous pourrions également aller plus loin en cherchant à savoir si les nutriments (azote ou phosphore) utilisés par les végétaux proviennent bien des rejets piscicoles ou bien d'une autre source (sédiments, etc.) : il suffirait de distribuer un aliment marqué aux carpes, marqueurs qui se retrouveraient dans leurs déjections. Cependant, ce ne sont que des idées à approfondir, qui restent peut-être compliquées à mettre en place compte tenu de la taille des systèmes (mise en charge, nombre de plantes, etc.).

b. Amélioration de la lagune

Les étangs expérimentaux de l'INRA sur lesquels nous avons travaillé étaient tous identiques, mesurant 20x25 m, soit totalisant une surface de 500 m². La forme des bassins « épuration » nous était donc d'emblée imposée. Néanmoins, les lagunes décrites de la littérature, que ce soit pour traiter les rejets domestiques, agricoles ou industriels, ont la forme d'un couloir étroit. Cette configuration permet de maximiser l'absorption des nutriments par les plantes. En effet, la circulation de l'eau se fait nécessairement au travers de l'herbier et tous les macrophytes sont arrosés par les effluents. Dans l'expérience réalisée ici, nous devions à l'inverse travailler avec grande surface. Nous avons donc dû raisonner sur un nombre de plante et non une densité. Effectivement, pour que le système fonctionne au mieux il aurait fallu recouvrir l'étang de plantes pour être sûr que les effluents soient épurés avant de repartir dans le bassin « production ». Mais étant donné le peu de moyens techniques ainsi que le peu de temps disponible pour récolter autant de plantes, nous avons choisi d'en mettre un nombre réduit, correspondant à un nombre idéal pour une lagune de 59 m². En conséquence, l'eau chargée en nutriments ne passe pas forcément au niveau de toutes les plantes, son traitement en est donc amoindri. En somme, **la lagune doit être rectangulaire et allongée avec un rapport largeur-longueur de 1/10** (Vymazal, 2007).

Vu que la courbe de croissance sur laquelle nous nous sommes basés pour dimensionner la lagune était largement surestimée, nous avons dû recommencer le dimensionnement de la lagune à partir de nos résultats. Un nouveau bilan de masse (Gross et al., 2000 ; Schreckenbach et al., 2000), s'appuyant sur les poids mesurés aux différentes pêches de contrôle ainsi que sur la ration distribuée, nous permet d'actualiser les rejets mensuels en azote et en phosphore (**Tab. 6**).

Tab. 6 Evaluation des rejets de phosphore (P) et d'azote (N) journaliers moyens par mois via un bilan de masse (D'après Gross et al., 2000 et Schreckenbach et al., 2000).

| Mois | Température moyenne (° C) | Quantité moyenne d'aliment distribuée (g/j) | Rejets moyens de P (g/j) | Rejets moyens de N (g/j) |
|------------|---------------------------|---|--------------------------|--------------------------|
| Mai * | 15,48 | 594 | 4,6 | 14,5 |
| Juin ** | 18,9 | 572 | 1,7 | 3,7 |
| Juillet ** | 22,4 | 1 154 | 6,6 | 20,2 |

* Pour 1 000 carpes ** Pour 600 carpes (mortalité de 40%)

Rappelons qu'Adam (1993) préconise 5 à 15 m² de lagune/EH. Or, un Equivalent Habitant correspond notamment à un rejet journalier de 15 g d'azote et de 4 g de phosphore. Parmi les trois mois étudiés, une fois ramené au nombre de poisson, c'est au mois de juillet que les taux de nutriments émis sont le plus forts. Ainsi, **pour l'épuration des effluents de 1 000 carpes, avec une densité de 2 animaux/m², le bassin planté devra avoir une surface comprise entre 14 et 42 m². En prenant la valeur la plus haute et en**

considérant une densité de 5 plants par m² (Vivier, 1997), il sera nécessaire d'en mettre 210.

Il est important de comprendre que l'ensemble de l'azote et du phosphore absorbés revient dans l'étang à la mort des plantes. En conséquence, l'une des meilleures solutions pour améliorer l'efficacité de l'épuration reste d'exporter les macrophytes hors du système. C'est pourquoi le devenir des plantes de la lagune doit être un argument de poids dans le choix des espèces. Les critères de sélection utilisés précédemment, à savoir l'autochtonie et la valeur épuratrice, restent tout de même importants et ne doivent pas être ignorés. La vente des végétaux, comme il l'a été évoqué au début du projet, peut permettre cette exportation. Pour cela, il faut recentrer les espèces épuratrices de la lagune sur des plantes ornementales autochtones, comme la menthe d'eau et les nénuphars, voire le cornifille, déjà utilisés dans le projet test. Les hélrophytes (baldingère, glycérie et massette), dernières plantes testées ici, sont moins efficaces dans un tel système, c'est-à-dire avec une circulation de l'eau en surface. Ce type de macrophytes est davantage utilisé pour le traitement d'effluent à moindre débit, avec l'eau circulant en profondeur au niveau de racines (**Annexe 14**) (Vymazal, 2007). Il est donc possible de les remplacer par d'autres plantes ornementales.

Ensuite, la configuration du fond de la lagune, facteur sur lequel nous n'avons pu intervenir dans cette étude, doit également être prise en compte. Les profondeurs optimales des végétaux choisis peuvent être satisfaites de manière plus précise. Précédemment, nous nous étions basés sur la forme générale d'un étang classique de production, vidangé fréquemment : peu profond à l'entrée et au niveau des berges, profond à la sortie. Il est néanmoins possible **d'aménager le fond de la lagune en escalier afin d'avoir une succession croissante de profondeurs.**

Enfin, **l'utilisation de paniers aquatiques est à préférer.** D'une part, ils facilitent la récolte des plantes au moment de la vente. D'autre part, comme nous avons pu le voir dans la première partie de ce document, l'absorption par les racines des plantes aquatiques est généralement plus faible que par la tige et les feuilles, mais elle est cependant non négligeable. Les paniers étant percés ils permettent une circulation de l'eau au niveau du système racinaire. L'assimilation des nutriments issus des effluents est donc plus grande.

c. Amélioration hydraulique

Le temps de rétention, c'est-à-dire le temps que l'eau passe dans la lagune, intervient directement sur l'efficacité épuratrice. Pour ce qui nous concerne, compte tenu du volume d'eau moyen (350 m³) ainsi que du débit de la pompe (30 m³/h), il est d'environ 11 h. Or, d'après Boistel (1981), un temps de séjour de 11 h est trop court et doit être allongé.

Fixons un temps de rétention à 16h. Pour maintenir un volume dans l'étang planté, la pompe choisie devra avoir un débit de 1 m³/h. Pour maintenir les niveaux d'eau la surverse devra avoir le même débit.

d. Système final

La **Fig. 23** reprends les éléments énoncés précédemment afin d'en faire une synthèse et de proposer un système amélioré.

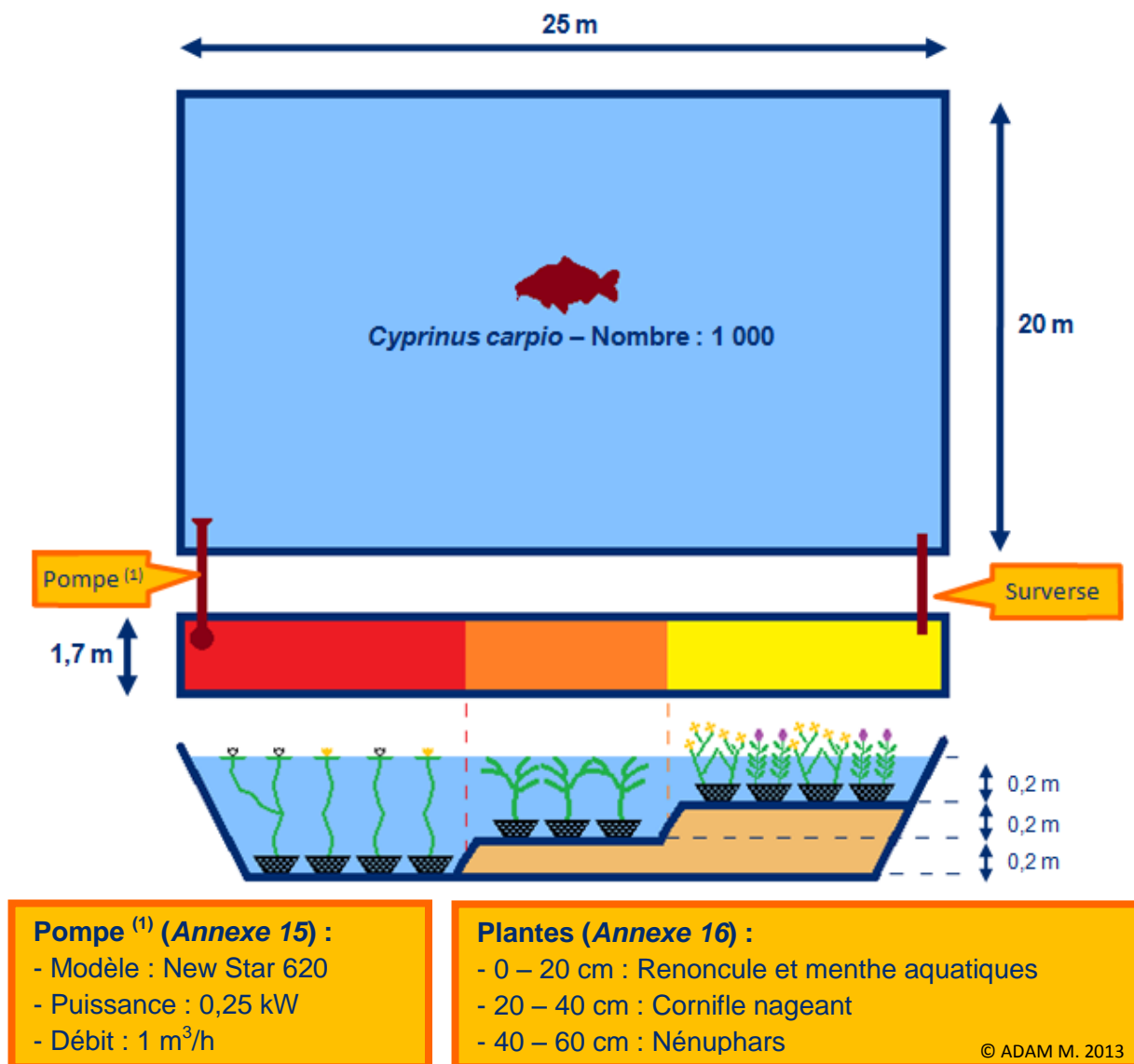


Fig. 23 Schéma d'un système de traitement amélioré d'un élevage intensif de carpes.

Ce schéma du système amélioré est accompagné de fiches synthétiques, classées par plante, expliquant comment les cultiver (**Annexe 16**). Elles permettront au pisciculteur de réaliser plus facilement une production de plantes ornementales, lui apportant un complément financier. La lagune ne sera pleinement efficace qu'à partir de la deuxième année. Les plantes ont en effet besoin d'un temps d'adaptation d'au moins un an (Adam, 1993). Il est conseillé d'acheter les deux tiers de végétaux nécessaires entre avril et mai de la première année. Au printemps suivant, il faut les multiplier, soit par dédoublement des rhizomes soit par bouturage. Elles vont ensuite utiliser les nutriments issus de l'élevage de poisson pour leur croissance (**Annexe 16**). Etant donné la présence d'un nombre supérieur à la quantité nécessaire pour l'épuration des effluents, une partie des plants au printemps, et tout au long de leur période de floraison, pourra être commercialisée.

Il faut avoir à l'esprit que la plupart des étangs exploités en France ne ressemblent pas aux étangs utilisés ici. La mise en place d'une lagune, comme conseillée précédemment, n'est envisageable que pour un type d'élevage particulier. Pour des plans d'eau de plusieurs hectares il est par contre possible de maximiser l'utilisation du compartiment macrophytes, comme incité ici. Par exemple, au lieu d'un faucardage régulier, les surfaces plantées peuvent être conservées voire amplifiées et séparées des poissons, alors placés dans des cages.

2. Production de sandres par une utilisation maximale du zooplancton (Projet 2) : un départ plutôt réussi

1- Analyse des résultats

a. Bilan de croissance des différents systèmes

Comme nous avons pu le voir, le poids moyen des sandres dans l'étang témoin B11 est significativement supérieur à ceux des autres étangs dès début août. Ces résultats s'expliquent probablement par l'Effet bassin. C'est uniquement dans cet étang que nous suspectons un taux de réussite élevé des pontes de poissons fourrages, suite à l'observation d'une grande quantité d'alevins. De plus, compte tenu de l'irrégularité des températures entre avril et mai, l'ensemble des gardons et des rotengles n'ont pas tous pondu en même temps. Nous nous retrouvons donc dans les étangs témoins, et surtout dans le B11, avec plusieurs cohortes d'alevins, chose que nous aurions dû, en théorie, avec une météorologie moins atypique, voir plutôt dans les systèmes innovants. Au cours de la pêche d'août, au moins quatre cohortes de poissons fourrages, voire même cinq, ont été dénombrées dans le B11 (**Fig. 24**). Les pontes observées dans ce bassin étaient particulièrement précoces par rapport aux autres. Effectivement, très tôt une myriade d'alevins était visible à la surface de l'eau par beau temps. Ainsi, seul l'Effet bassin peut expliquer de telles différences : dans l'étang B11, contrairement aux autres, et malgré les températures de l'eau au dessous des normales de saison, les conditions de fraie des poissons fourrages ont très tôt été réunies : la végétation y était abondante mais pas excessive et il y avait de la nourriture en abondance, et pas de compétition sur la ressource. Pour le reste, un suivi physique plus rigoureux aurait peut-être pu nous apporter des éléments dans ce sens.



Fig. 24 Photo de différentes tailles d'alevins de poissons fourrages issus de l'étang témoin B11.

En outre, en s'inspirant d'une technique hongroise, nous avons placé un cadre blanc au fond de chaque étang pour vérifier la présence de jeunes poissons : les alevins, même de très petites tailles, deviennent visibles dès qu'ils passent devant la surface claire du cadre, situé à faible profondeur. Ainsi, en se basant sur ces observations, mais aussi sur nos prédictions, nous en avons déduit que tous les poissons introduits dans les cages des systèmes innovants n'ont pas pondu. Nous estimons que seulement les trois derniers groupes de gardons et les deux derniers groupes de rotengles, sur six apports, ont pu frayer. En effet, compte tenu de leurs exigences thermiques, les températures froides des mois d'avril-mai ont retardé leur période de ponte. Pour ce qui est des systèmes témoins, excepté dans le B11, les poissons ont également frayé plus tard. A cela s'ajoute des oscillations thermiques autour de leurs températures de pontes, impliquant des pontes décalées dans le temps : les gardons et les rotengles ont donc pondu par groupes successifs. En outre, rappelons que les rotengles réalisent des pontes fractionnées dans le temps, espacées de quelques jours. Il est possible que les phénomènes climatiques de cette année n'aient fait qu'amplifier les intervalles entre chaque ponte (Gillet, 1989).

En somme, malgré un traitement différent entre les deux systèmes, le printemps particulièrement froid a entraîné une ponte décalée dans les systèmes témoins : nous nous retrouvons dans tous les étangs avec plusieurs cohortes d'alevins, apportant une disponibilité continue en proies de bonne taille pour les sandres. Le démarrage équivalent

des différents étangs s'explique plutôt, quant à lui, par un régime omnivore des carnassiers à ce stade, qui ont donc puisé dans des ressources sensiblement identiques de zooplancton. Ainsi, les résultats pour le moment assez semblables entre les deux systèmes s'expliquent davantage par une année très atypique d'un point de vue climatique que par la non-efficacité du système innovant testé. Nous n'avons que très peu de résultats sur lesquels s'appuyer et nous ne pouvons pas encore conclure quant à sa réelle efficacité. Nous pouvons tout de même suggérer quelques améliorations en prenant du recul sur nos choix de départ.

2- Propositions d'amélioration

b. Modifications du protocole initial

Nous pouvons émettre les mêmes remarques que dans le Projet 1 pour ce qui est de minimiser l'Effet bassin, excepté d'augmenter le nombre de réplicats : ici, nous comparons que deux systèmes et nous n'avons pas d'autres étangs à notre disposition. Sinon, le protocole de départ semble plutôt bien adapté, du moins nous ne pouvons pas en dire davantage à ce stade de l'expérience.

a. Mise en charge

Comme nous l'avons évoqué précédemment, les américains pratiquent déjà l'élevage intensif du doré (*Stizostedion vitreum*), cousin outre-Atlantique du sandre, en bassins de terre. Ils ont opté pour une densité de 6 poissons au m², tout en réalisant un apport hebdomadaire d'urée (Wright, 1996). Pour le système décrit ici, il est envisageable d'augmenter encore la mise en charge initiale en suivant ce modèle. Nous conseillons donc une densité initiale de 2,5 individus/m² (1 000 par bassin de 400 m²), soit cinq fois plus que dans le système testé ici, tout en supposant néanmoins un taux de mortalité d'environ 30 % sur la période estivale, soit une production à l'automne de 700 sandres par bassin. Il faut néanmoins que les apports de poissons fourrages ainsi que de fertilisant soient conséquents pour permettre une telle densité de juvéniles de carnassiers.

b. Gestion des apports et support de ponte

Au vu des prévisions d'évolution précédemment décrites, il est nécessaire d'ajuster les apports en poissons fourrages. En pisciculture d'étang, nous sommes très dépendants du climat et il est donc difficile de décrire avec précision un calendrier de gestion. L'objectif de ce mémoire est donc de fixer des repères pour gérer au mieux le système « innovant » de production de juvéniles de sandres d'un été, ici testé. Au niveau des espèces introduites, le choix reste judicieux même si nous pouvons nous intéresser à d'autres poissons : la brème, herbivore et donc plus facile à produire, l'ablette, difficile à obtenir mais proie favorite du sandre de par sa croissance lente ainsi que son corps fusiforme. Le support de ponte est à adapter selon l'espèce choisie, sachant que l'utilisation de végétaux reste une bonne idée : il n'occasionne aucun coût puisqu'ils sont prélevés dans le milieu naturel et en plus ils sont appréciés par bon nombre de poissons, notamment les gardons, les rotengles et les tanches. En ce qui concerne le choix de l'espèce, un conifère (épicéa, cyprès, genévrier) serait plus intéressant de part sa résistance et son taux de réussite au niveau des pontes (Arrignon, 1998).

c. Amélioration de la productivité primaire

La fertilisation doit être adaptée à la mise en charge en poissons fourrages pour permettre un développement suffisant de phytoplancton ainsi que de zooplancton. Nous pouvons envisager de déverser 8 t/ha de fumier de bovins sur six mois, c'est-à-dire d'avril à octobre (Anonyme, 2004). Pour éviter qu'une grande partie des nutriments se retrouvent piégés dans les sédiments, il faudra fractionner les apports pour qu'ils soient consommés au fur et à mesure (Schlumberger et Girard, 2013).

Conclusion

La présente étude cherchait à mettre en application, en pisciculture d'étang, une partie des scénarios d'intensification écologique définis au cours du projet PISCEnLIT. En s'appuyant sur une meilleure gestion des compartiments trophiques, l'objectif était de conserver la haute valeur écologique des étangs tout en augmentant leur productivité.

Les résultats obtenus ne sont que partiels et ne nous permettent pas clairement de conclure quant à l'efficacité des systèmes. Les expériences se termineront à l'automne-hiver 2013 et, d'ici là, davantage de données pourront être récupérées. Cela pourra, peut-être, nous permettre de conclure sur la pertinence des choix réalisés. Il serait cependant indiqué de prolonger ces deux expériences, sur une année supplémentaire, afin de constater des évolutions plus significatives. En effet, pour le projet 1, les plantes de la lagune nécessitent un temps d'acclimatation suffisamment long avant de commencer à épurer efficacement les effluents. Pour ce qui est du projet 2, cette année très atypique au niveau météorologique nous a empêché de voir d'éventuelles différences entre les deux modes de production de sandres. Nous avons dû créer ces deux systèmes innovants à partir de données bibliographiques limitées. Il existe donc des imperfections identifiées ou non qui nous poussent à continuer nos recherches.

Ce stage aura tout de même permis de mettre en exergue certains défauts des protocoles et des systèmes initiaux. Les objectifs initiaux étaient très ambitieux et nous aurions peut-être dû nous concentrer seulement sur une expérience. Ensuite, à mon arrivée rien n'était défini à part les grandes lignes des protocoles. Le dimensionnement et la mise en place se sont donc fait dans la précipitation. Nous avons tout de même pu proposer des améliorations qui pourront faire partie d'une future étude. Il faudra, par contre, dès le départ poser des objectifs clairs et surtout bien intégrer les contraintes techniques pour avoir une vision pragmatique des systèmes proposés. En outre, pour permettre une transposition du système du projet 1, ou ne serait-ce que pour généraliser le rôle épurateur des plantes, il est nécessaire de modifier le protocole de départ : il faut davantage partir sur une végétalisation naturelle avec une séparation des compartiments au sein d'un même étang. Nous pourrions ainsi montrer que toute intensification écologique doit passer par une utilisation intelligente des macrophytes.

Les étangs ont une haute valeur écologique et rendent de ce fait de nombreux services écosystémiques à l'homme. Il est donc important de les conserver au sein de nos paysages. Si l'étude réalisée ici est poursuivie et apporte des résultats probants, l'intensification écologique pourrait permettre de conserver la pisciculture d'étang. En effet, aujourd'hui, malgré un marché porteur, l'activitéériclite compte tenu de la faible productivité, réduite par la pression des oiseaux piscivores, mais également des contraintes environnementales et juridiques. Au nom de la continuité écologique, les grandes étendues d'eau, interrompant l'écoulement naturel des cours d'eau, que sont les étangs sont amenées à évoluer. Bien que millénaires et très riches en biodiversité, ces ouvrages anthropiques, s'ils ne sont pas entretenus, tendent à évoluer vers l'état de marais. Mais étant donné l'importance de ces paysages, que se soit d'un point de vue social, économique ou environnemental, il est nécessaire de trouver des solutions pour les conserver. Ainsi, en pisciculture d'étang, l'intensification écologique doit être comprise comme un moyen de pérenniser l'activité. La définition même de cette notion aborde « l'augmentation des rendements » et la diminution de « l'empreinte écologique ». Le terme rendement ne doit pas, dans le cas présent, être limité à son sens pécuniaire. Nous pouvons l'interpréter comme une amélioration de l'ensemble des biens et services fournis par l'environnement. Au final, il n'est pas nécessaire de chercher à augmenter la production de poissons à tout prix mais peut-être plus de s'intéresser à d'autres bénéfices rendus par les étangs qui, à défaut d'être directement rémunérateurs, permettent leur conservation au sein de nos territoires.

Bibliographie

- Adam Y. (1993), Mise en place de la nouvelle loi sur l'eau et révision du plan d'occupation des sols : commune de Saint-Christophe-du-bois. ESEM (Ecole Supérieure d'Énergie et des Matériaux), Orléans, 65 p.
- Adam M., Caucanas G., Fourvel G., Larrea M., Paviot O., Plissonneau M., Ruffieux C., Sylvestre G., Hirtz M., Glasser T. et Banas D. (2011), Assec d'étang : que peut-on attendre de cette pratique agroécologique ? In REVER 3 (Réseau d'échanges et de valorisation en écologie de la restauration), Metz, 3-4 février 2011.
- Allison F.E. (1954). *Soil microb. Conf. Purdue. Univ. In* Pochon J. & De Barjac H. (1957), Traité de microbiologie des sols. Dunod, Paris, 685 p.
- Amoros C. et Juget J. (1970), Données préliminaires sur la faune planctonique et benthique de deux étangs piscicoles de la Dombes (Ain). *Annales de limnologie*, tome 6, fascicule 2, pp. 215-227.
- Anonyme (2011), La pisciculture d'Étangs, une activité ancestrale. FFA (Fédération Française d'Aquaculture), 2 p.
- Anonyme (2004), L'étang un outil de production. Chambre d'Agriculture de l'Ain – Région Rhône-Alpes, 2 p.
- Anonyme (2004), Fertilisation des étangs. PEP (Pôle d'Expérimentation et de Progrès de Rhône-Alpes), 2 p.
- Anonyme (1993), Recherche et quantification des paramètres caractéristiques de l'équivalent-habitant : Etude bibliographique. Agences de l'eau et Ministère de l'environnement, 41 p.
- Arrignon J. coord. (2002), L'aquaculture de A à Z. Lavoisier TEC&DOC, 437 p.
- Arrignon J. (1998), Aménagement piscicole des eaux douces, 5^{ème} édition. Lavoisier TEC&DOC, 589 p.
- Bachasson B. (2012), Mise en valeur des étangs, 3^{ème} édition. Lavoisier TEC&DOC, Paris, 168 p.
- Banas D. (1997), Incidence des piscicultures extensives du bassin-versant de l'étang de Lindre : marqueurs et phases caractéristiques. Rapport de DEA (Diplôme d'Études Approfondies) : Université de Metz / ENSAIA, 27 p.
- Barbe J., Schlumberger O. & Bouretz N. (1999), Utilisation du phytoplancton pour estimer la production piscicole potentielle des étangs. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 355, pp. 387-402.
- Barral M. (1999), Ecologie du sandre sur la retenue de Castillon – Bases biologiques pour l'établissement d'un modèle de dynamique de population. Mémoire en vue d'obtenir le Certificat d'Études Supérieures en Agronomie : ENSA (Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie), Rennes, 61 p.
- Bédoucha G. (2011), Les liens de l'eau. Editions de la Maison des sciences de l'homme & Editions Quae, Paris, 688 p.

Berard L. (1982), Terres et eaux en Dombes. Technologie et droit coutumier. Presses universitaires de Lyon, édition de la maison des sciences de l'homme, 186 p.

Billard R. (1995), Les carpes –Biologie et élevage. INRA Editions, Paris, 387 p.

Blachier P., Buard E., Lefebvre S., Mille D. et Hussenot J. (2009), Système intégré en bassin de terre associant poissons, microalgues et mollusques filtreurs : résultats et perspectives. *In* Des systèmes intégrés multi-trophiques pour une aquaculture durable, Rochefort, 8 octobre 2009, pp. 30-31.

Blake G. & Vuillot M. (1988), Choix des macrophytes dans un système d'épuration. *In* Valorisation des Algues et autres Végétaux Aquatiques, Bombanes, 16-19 novembre 1982, pp. 67-70.

Blancheton J.P., Bosc P., Hussenot J., Roque d'Orbcastel E. et Romain D. (2009), Tendances pour la pisciculture européenne de demain : cages au large, systèmes en eau recirculée et systèmes intégrés. *Cahiers agricultures*, 18, pp. 227-234.

Bobbe S. (2010), Etude des impacts de la population de grands cormorans sur les activités piscicoles et les milieux qui en dépendent, « Impacts cormorans et pisciculture en France ». Ministère de l'alimentation, de l'agriculture et de la pêche, Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer, 95 p.

Bonny S. (2011), L'agriculture écologiquement intensive : nature et défis. *Cahiers Agricultures*, 20, 6, pp. 451-462.

Boutin C. (1983), Les macrophytes : leur rôle dans l'épuration des eaux usées et leur insertion dans différents systèmes de traitement ; étude sur site réel de l'exportation d'éléments nutritifs par les lentilles d'eau. Mémoire de fin d'étude : Ecole Nationale de la Santé Publique, Rennes, 105 p.

Boyd C. E. (1982), Water quality : Management for pond fish culture, Elsevier, Amsterdam, 318 p.

Bruslé J. & Quignard J.P. (2001), Biologie des poissons d'eau douce européens. Editions TEC&DOC, Lavoisier, Paris, 625 p.

Costa-Pierce B.A. (2002), Farming Systems Research and Extension Methods for the Development of Sustainable Aquaculture Ecosystems *In* Ecological Aquaculture – The evolution of the blue evolution. Costa-Pierce B.A., Blackwell, Oxford, pp. 103 – 124.

De Kinkelin P., Gerard J.P. et Tuffery G. (1973), Pathologies des poissons d'eau douce, causes infectieuses: les maladies – leur traitement. *Inform. Techniq. Serv. Vét.*, 43/44, pp. 43–62.

Dumas A., France J. & Bureau D.P. (2007), Evidence of three growth stanzas in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) across life stages and adaptation of the thermal-unit growth coefficient. *Aquaculture*, 267, pp. 139–146.

FAO (Food and Agriculture Organisation) (2013), *Cyprinus carpio*. Disponible sur : http://www.fao.org/fishery/culturedspecies/Cyprinus_carpio/fr (10/07/2013).

Freyheit S. (2012), Intensification écologique de la production du sandre : Etude de l'influence des formules d'empeisonnement. Bourse d'expérimentation 2011-2012, 123 p.

- Germon J.C. et Couton Y. (1999), La dénitrification dans les sols : régulation de son fonctionnement et application à la dépollution. *Courrier de l'environnement de l'INRA*, 38, pp. 67-74.
- Gillet C. (1989), Le déroulement de la fraie des principaux poissons lacustres. *Hydroécol. Appl.*, 112, pp. 117-143.
- Gourbier J. (1975), Nourriture du sandre – *Lucioperca lucioperca* (L.). *Bulletin Français de Pisciculture*, pp. 77-79.
- Griffon M. (2013), Qu'est ce que l'agriculture écologiquement intensive ? Editions QUAE, Versailles, 221 p.
- Gross A., Boyd C.E. & Wood C.W. (2000), Nitrogen transformation and balance in channel catfish ponds. *Aquacultural Engineering*, 24, pp. 1-14.
- Heymann J. (2012), Tarifs poissons de repeuplement – Saison 2012-2013. Ets Heymann Joseph & fils, Sarrebourg, 2 p.
- Hussenot J. (2004), Les systèmes intégrés en aquaculture marine : une solution durable pour un meilleur respect de l'environnement littoral. *In* Pêche et aquaculture : pour une exploitation durable des ressources vivantes de la mer et du littoral, Nantes, 21-23 janvier 2004, pp. 1-11.
- Jobling S., Coey S., Whitmore J.G., Kime D.E., Van Look K.J.W., McAllister B.G., Beresford N., Henshaw A.C., Brighty G., Tyler C.R. & Sumpter J.P. (2002), Wild intersex roach (*Rutilus rutilus*) have reduced fertility. *Biology of reproduction*, 67, pp. 515–524.
- Klaba A.S. (2000), Les moyens d'actions pour la lutte contre les pollutions des eaux de surface par les nitrates : diagnostics, expérimentations, propositions d'aménagements – Bassin versant de l'Horn – Finistère. Mémoire de fin d'études ingénieur agronome : Agrocampus Ouest, Rennes, 57 p.
- Keith P., Persat H., Feunteun E. & Allardi J. coord. (2011), Les poissons d'eau douce de France. Biotop Editions, 552 p.
- Kerleo V. (2003), Outils de gestion durable pour la pisciculture d'étangs des Pays de la Loire. Mémoire de stage associé au diplôme de 3^{ème} cycle de l'Institut Supérieur des Production Animales : Agrocampus Ouest, Rennes, 21 p.
- Lappalainen J., Olin M. & Vinni M. (2006), Pikeperch cannibalism : effect of abundance, size and condition. *Ann. Zool. Fennici*, 43, pp. 35-44
- Le Campion A. (2007), Activité personnelle bibliographique – Rôle et importance des macrophytes et des microorganismes sur la qualité des cours d'eau. Agrocampus Ouest, 19 p.
- Liu Q. et Seki H. (1988), The effect of a « Bio-filter » aquatic treatment plant on Doh-Hoh Numa Bog, Tsukuba City, Japan : Rapid oligotrophication without damage of the phytoplankton community. *Arch. Hydrobiol.*, 114, pp. 63-82.
- Malenfer P. et Hirtz M. (2005), Suivi ornithologique de l'étang de Lindre en assec prolongé, rapport final. Conseil Général de Moselle, Centre Ornithologique Lorrain, 38 p.
- Marcel J. (1996), Production piscicole maîtrisée en plan d'eau, ITAVI (Institut Technique d'AViculture) & Région Champagne-Ardenne, 73 p.

Mark W., Wieser W. et Hohenauer C. (1989), Interactions between developmental processes, growth, and food selection in the larvae and juveniles of *Rutilus rutilus* (L.) (Cyprinidae). *Oecologia*, 78, pp. 330-337.

Martin J.P. et Chapman H. (1951). *Soil Sc.*, 61, pp. 25. In Pochon J. & De Barjac H. (1957), *Traité de microbiologie des sols*. Dunod, Paris, 685 p.

Martin S. (1997), Etude de la faisabilité d'une station de lagunage compartimenté sur effluent industriel. Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme agronomie approfondie : ENSAR (Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Rennes), Rennes, 151 p.

Maurer N. (2004), Planification et encadrement scientifique d'une gestion environnementale – Application à l'étang de Lindre, Espace Naturel Sensible du Département de la Moselle. Mémoire de fin d'étude d'ingénieur agronome : Agrocampus Ouest, Rennes, 31 p.

MEA (Millennium Ecosystem Assessment) (2005), *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Island Press, Washington DC, 137 p.

Météo France (2013), Bilan du printemps 2013. Disponible sur : http://climat.meteofrance.com/chgt_climat2/bilans_climatiques/bilanclim?document_id=27795&portlet_id=95999 (05/08/2013).

Mougin E. (1988), Utilisation des végétaux aquatiques flottants dans l'épuration tertiaires des eaux usées domestiques. In Valorisation des Algues et autres Végétaux Aquatiques, Bombanes, 16-19 novembre 1982, pp. 195-196.

Neori A., Chopin T., Troell M., Buschmann A.H., Kraemer G.P., Halling C., Shpigel M. et Yarish C. (2004), Integrated aquaculture: rationale, evolution and state of the art emphasizing seaweed biofiltration in modern mariculture. *Aquaculture*, 231, pp. 361–391.

Piétrasanta Y. & Bondon D. (1994), *Le lagunage écologique*. Economica, Paris, 112 p.

Pochon J. & De Barjac H. (1957), *Traité de microbiologie des sols*. Dunod, Paris, 685 p.

Pollux B.J.A., Korosi A., Verberk W.C.E.P., Pollux P.M.J. & van der Velde G. (2006), Reproduction, growth, and migration of fishes in a regulated lowland tributary: potential recruitment to the river Meuse. *Hydrobiologia*, 565, pp. 105–120.

Popova O.A & Sytina L.A. (1977), Food and Feeding Relations of Eurasian Perch (*Perca fluviatilis*) and Pikeperch (*Stizostedion lucioperca*) in Various Waters of the USSR. *Journal de l'Office des recherches sur les pêcheries du Canada*, 34, pp. 1559-1570.

Poulet N. (2004), Le sandre (*Sander lucioperca* (L.)) : Biologie, comportement et dynamique des populations en Camargue (Bouches-du-Rhône, France). Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Toulouse III en écologie des populations piscicoles : Université Toulouse III, Toulouse, 300 p.

Pourriot R. et Meybeck M. coord. (1995), *Limnologie générale*. Masson, 956 p.

Ranson S.P. (2003), L'alimentation de la carpe (*Cyprinus carpio*) dans son biotope et en élevage. Thèse pour le Doctorat vétérinaire : Faculté de Médecine, Créteil, 120 p.

Robin P., Morrand P., Cluzeau D., Pourcher A.M., Picot B., Escande A., Haury J. et Landrain B. (2010), Dimensionnement de systèmes biologiques pour le recyclage et la

valorisation des effluents au sein des élevages de porcs. *In* Journées Recherche Porcine, Paris, 2-3 février 2010, pp. 285-290.

Rodriguez R., Celada J.D., Saez-Royuela M., Carral J.M., Aguilera A. & Melendre P.M. (2004), Artificial reproduction in 1-year-old tench (*Tinca tinca* L.). *Journal of Applied Ichthyology*, 20, pp. 542–544.

Schlumberger O. et Girard P. (2013), Mémento de pisciculture d'étang, 5^{ème} édition. Editions QUAE, 222 p.

Schlumberger O. & Elie P. (2008), Poissons des lacs naturels français - Ecologie des espèces et évolution des peuplements. Editions QUAE, Paris, 212 p.

Schneider J.C., Laarman P. W. & Gowing H. (2000), Chapter 17 - Length-weight relationships *in* Schneider J.C. (éd.) (2000), Manual of fisheries survey methods II: with periodic updates. Michigan Department of Natural Resources, Fisheries Special Report.

Schreckenbach B., Knösche R. & Ebert K. (2000), Nutrient and energy content of freshwater fishes. *Journal of Applied Ichthyology*, 17, pp. 142-144.

SEPB (Syndicat des Exploitants Piscicoles de la Brenne) (2011), Présentation des résultats de l'étude et du Plan d'actions, 30p.

Sevrin-Reyssac J., De Lanoue J. & Proulx D. (1995), Le recyclage du lisier de porc par lagunage, TEC&DOC, Lavoisier, 118 p.

Summerfelt R.C. (éd.) (1996), Walleye culture manual. NCRAC (North Regional Aquaculture Center) Culture, 101, 394 p..

Tarkan A. S., Gaygusuz Ö, Acipinar H., Gürsoy C. & Özulug M. (2006), Length–weight relationship of fishes from the Marmara region (NW-Turkey). *Journal of Applied Ichthyology*, 22, pp. 271–273.

Touchart L. (coord.) (2007), Géographie de l'étang - Des théories globales aux pratiques locales, L'Harmattan, Paris, 228 p.

Tripone S. (2007), Lagunage à macrophytes : épuration des eaux usées et valorisation des plantes. Mémoire de fin d'études en Biologie Gestion-Marketing : Université de Rennes, 71 p.

Trotignon J. (2000), Des étangs pour la vie – Améliorer la gestion des étangs. *Gestion des milieux et des espèces - Cahiers techniques*, 61, 70 p.

Vimazal J. (2007), Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 380, pp. 48 – 65.

Vivier E. (1997), Faisabilité du lagunage naturel pour l'épuration des eaux, adaptabilité et efficacité de la méthode – Observation et analyse de cas dans le Nord/Pas-de-Calais. Rapport Nord-Nature, 30 p.

Voets J., De Borger et Coolsaet (1955). *Rev. Ferm. et Ind. Alim.*, 10, pp. 201. *In* Pochon J. & De Barjac H. (1957), Traité de microbiologie des sols. Dunod, Paris, 685 p.









Wright G.M. (1996), Walleye culture in a 100-acre drainable pond in northern Michigan, *in* Summerfelt R.C. (ed.) (1996), Walleye culture manual. NCRAC (North Regional Aquaculture Center) Culture, 101, pp. 129-130.

Annexes


| | |
|--|----|
| Annexe 1 : Partenaires du projet PISCEnLIT..... | 1 |
| Annexe 2 : Localisation des territoires étudiés dans le projet PISCEnLIT | 2 |
| Annexe 3 : Photos des étangs du Projet 1 (Carpes) et des systèmes hydrauliques des bassins couplés et intensifs..... | 3 |
| Annexe 4 : Composition de l'aliment extrudé coulant pour carpes..... | 4 |
| Annexe 5 : Localisation et configuration générale du site expérimentale du Rheu..... | 5 |
| Annexe 6 : Fiche technique de la pompe Ebara DW 75..... | 6 |
| Annexe 7 : Listes de 44 plantes épuratrices préselectionnées pour le Projet 1..... | 8 |
| Annexe 8 : Bilan de masse..... | 10 |
| Annexe 9 : Répartition des macrophytes dans les bassins « épuration » et dans le témoin.. | 12 |
| Annexe 10 : Protocole du suivi 24h du 24-25 juin 2013 | 13 |
| Annexe 11 : Photos des étangs du Projet 2 (Sandres) | 15 |
| Annexe 12 : Localisation et configuration générale du site expérimental de Château-Gontier | 16 |
| Annexe 13 : Calendrier du Projet 2 « Production de sandres par une utilisation maximale du zooplancton »..... | 17 |
| Annexe 14 : Schéma des différents types de lagune de traitements d'effluents : avec plantes flottantes (a.), avec l'eau de surface libre et des hélophytes (b.), avec de l'eau en profondeur avec circulation verticale et des hélophytes (c.), avec de l'eau en profondeur avec circulation horizontale et des hélophytes (d.)..... | 18 |
| Annexe 15 : Fiche technique de la pompe New-Star 620 | 19 |
| Annexe 16 : Fiches de culture de plantes aquatiques..... | 20 |

Annexe 1 : Partenaires du projet PISCEnLIT.


France

| | |
|---|---|
| CIRAD (Centre de coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement) – Montpellier (34) |  |
| IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER) – Palavas-les-flots (34) |  |
| INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) – Rennes (35). |  |
| IRD (Institut de Recherche pour le Développement) – Montpellier (34) |  |
| ITAVI (Institut Technique de l'AViculture) – Rouen (76) |  |
| Lycée agricole du Haut-Anjou – Château-Gontier (53) |  |
| Université de Lorraine – URAFPA, Nancy (54) |  |
| Université Montpellier 1 – Laboratoire Montpelliérain d'Economie théorique et appliquée, Montpellier (34) |  |

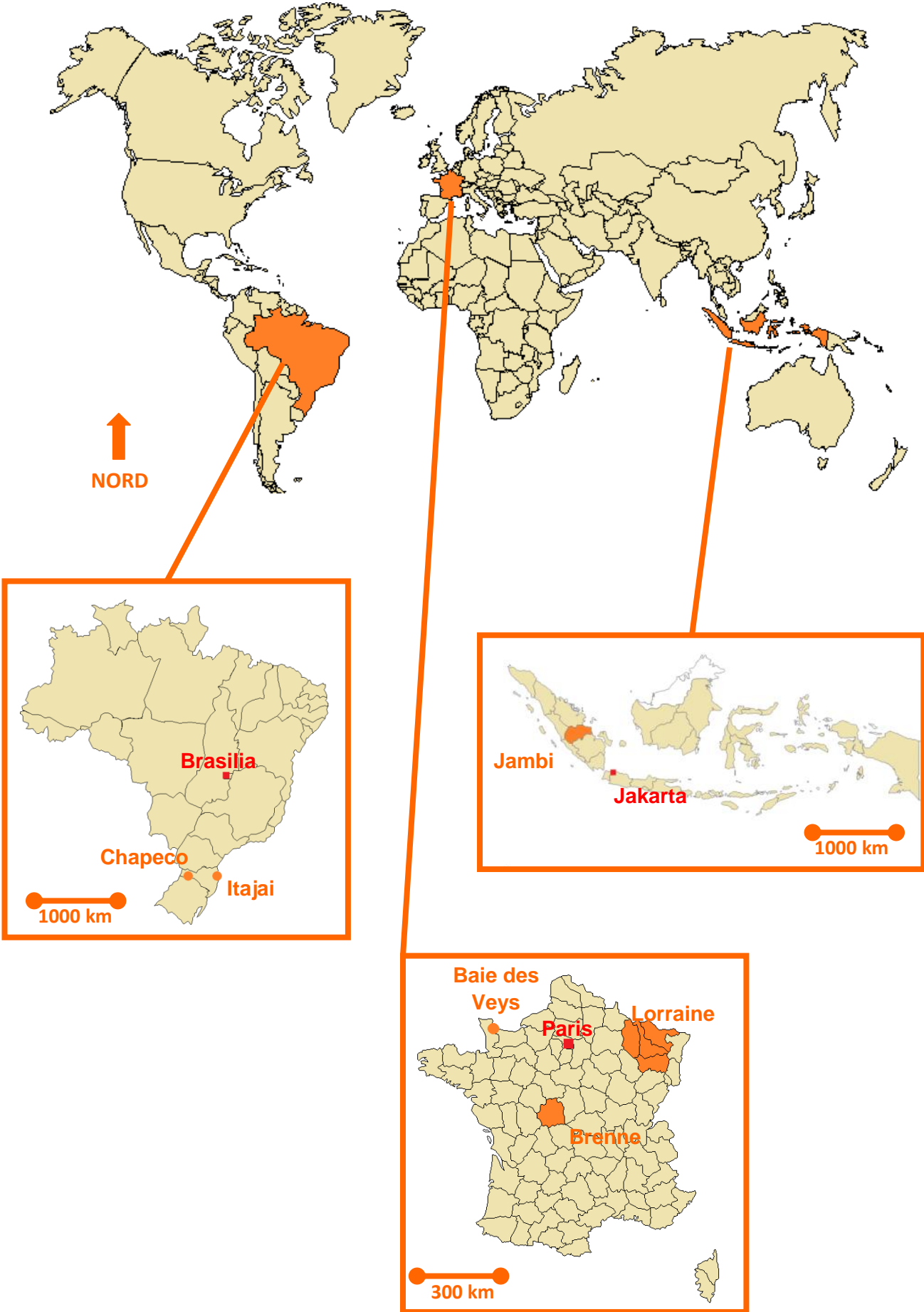
Indonésie

| | |
|--|---|
| BBAT Jambi (Jambi Freshwater Aquaculture Development Center) – Centre de Développement de l'aquaculture d'eau douce de Jambi |  |
| RIFA (Research Institut for Freshwater Aquaculture) – Centre de Recherche pour l'Aquaculture d'eau douce | |

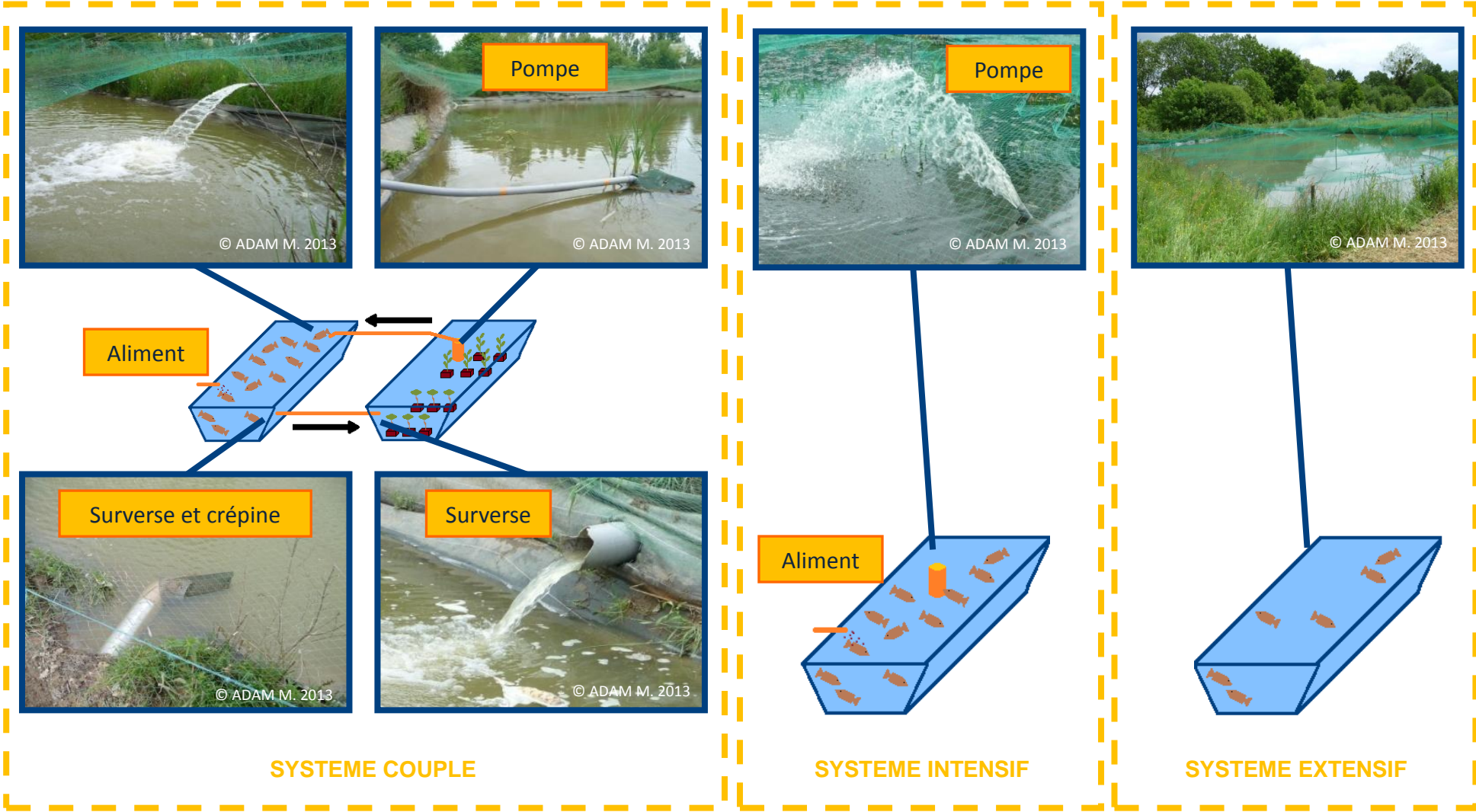
Brésil

| | |
|---|---|
| EPAGRI (Empresa de Pesquisa Agropecuaria e Extensão Rural de Santa Catarina) – Société de Recherche Agro pastorale et de développement Agricole de l'Etat du Santa Catarina |  |
|---|---|

Annexe 2 : Localisation des territoires étudiés dans le projet PISCEnLIT



Annexe 3 : Photos des étangs du Projet 1 (Carpes) et des systèmes hydrauliques des bassins couplés et intensifs.



Annexe 4 : Composition de l'aliment extrudé coulant pour carpes.

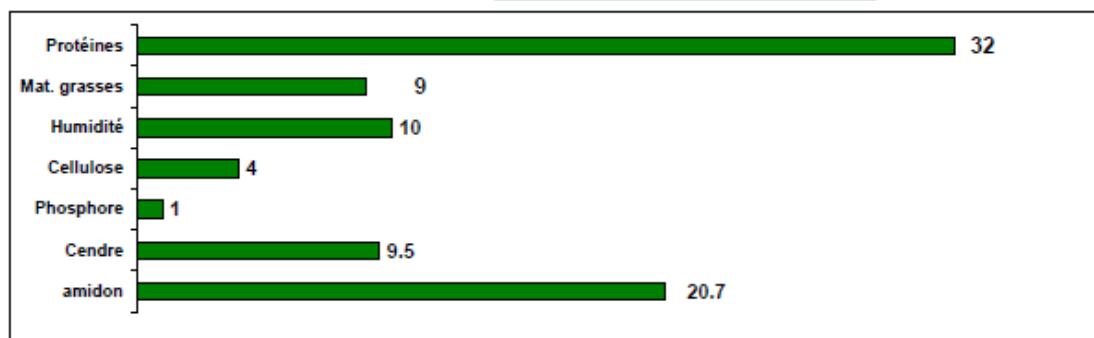


LES POISSONS D'EAU DOUCE

CARPE EXTRUDE

ALIMENT COMPLET EXTRUDE POUR GROSSISSEMENT DE
POISSONS D'ETANG.

GARANTIES ANALYTIQUES - %



Vitamines (par kg d'aliment)

| | |
|-----------|---------|
| Vit. A : | 8000 UI |
| Vit. D3 : | 1400 UI |
| Vit. E : | 180 mg |
| Vit.C : | 140 mg |

Valeurs nutritionnelles (par kg)

| | | |
|-------------|---------|-----------|
| En. Brute : | 16.6 MJ | 3967 kcal |
|-------------|---------|-----------|

Acides aminés

| | |
|------------------------|-------|
| Lysine : | 1.8 % |
| Méthionine + Cystine : | 1.2 % |

| <u>Acides gras</u> | % | % Mat. Gras. |
|--------------------|-----|--------------|
| Oméga 3 : | 1.2 | 13.3 |
| Oméga 6 : | 1.5 | 16.7 |
| EPA+DHA : | 1.0 | 11.1 |

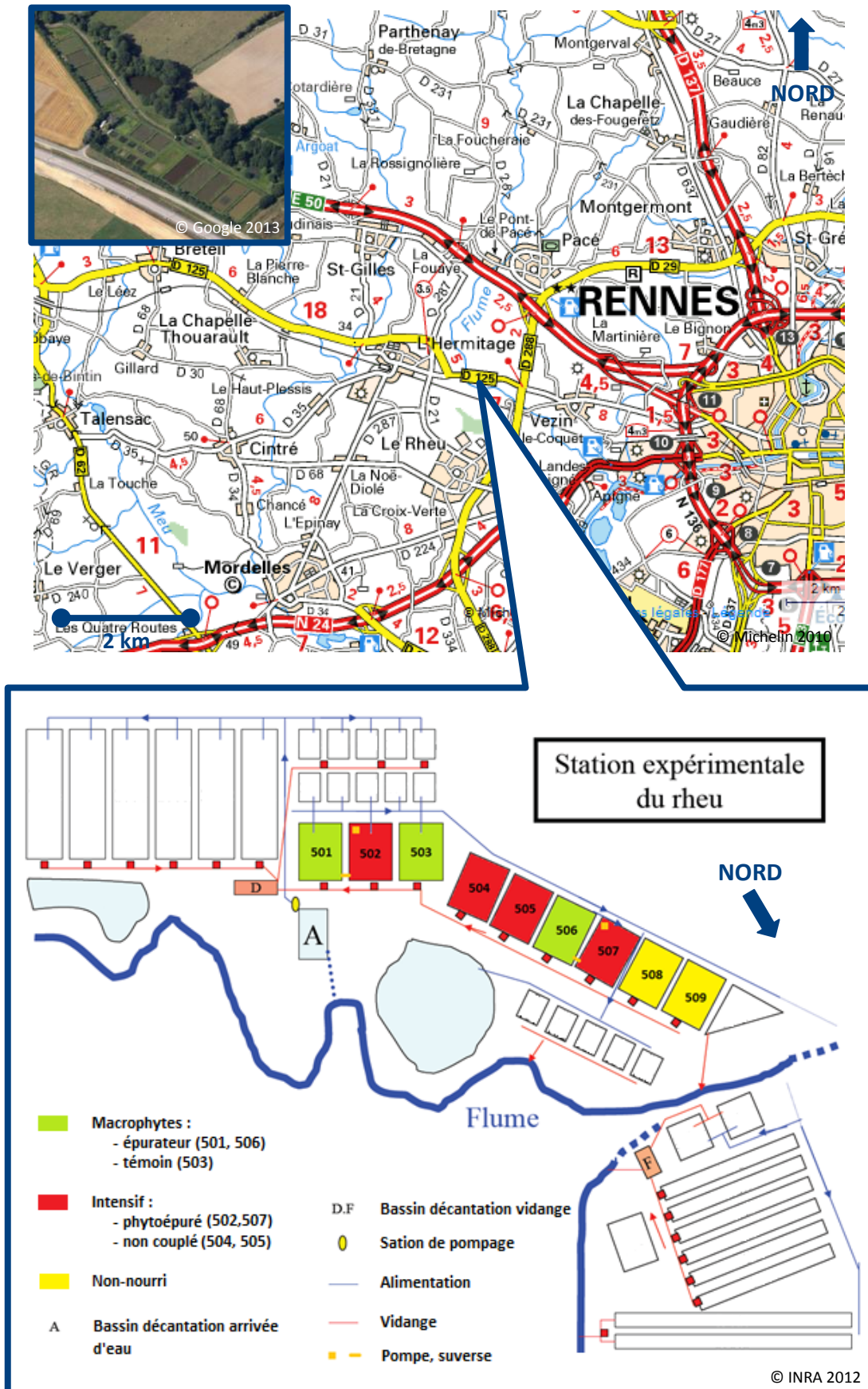
Composition

Blé
Tourteau d'extraction de soja cuit
Tourteau de colza
Co-produit de la production d'ac. aminés
Graine de soja extrudée
Farines de poissons
Huile de colza
Huiles de poissons
Carbonate calcium
Phosphate monocalcique
Prémélange, Vitamines
Acides aminés

Cet aliment intègre la maîtrise du risque OGM et ne contient pas de produits d'animaux terrestres. Cette démarche est contrôlée par un organisme indépendant.

Valeurs non contractuelles, modifiables sans préavis - vers. 17/01/11

Annexe 5 : Localisation et configuration générale du site expérimental du Rheu.



Annexe 6 : Fiche technique de la pompe Ebara DW 75.



DW - DW VOX

SUBMERSIBLE PUMPS for dirty water

Submersible sewage pump made of stainless steel AISI 304, with double mechanical seals ensure long life and reliability. Suitable for sewage and dirty water systems with solids. Applications include remote sewage stations for housing developments, pubs, hotels and restaurants, and water displays. Options include with - without float switch. Solids handling up to 50 mm.



SPECIFICATIONS

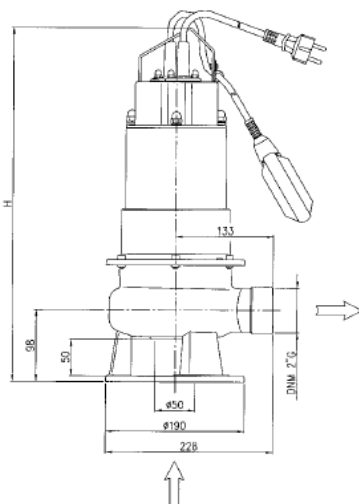
- Maximum liquid temperature: 40°C
- Maximum immersion: 10 m
- Maximum passage of solids: 50 mm

MATERIALS

- Pump casing, impeller, cover, casing cover and motor casing in AISI 304
- Shaft in AISI 303
- Double mechanical seal with interposed oil chamber: upper in carbon/ceramic/NBR, lower in SiC/SiC/NBR

TECHNICAL DATA

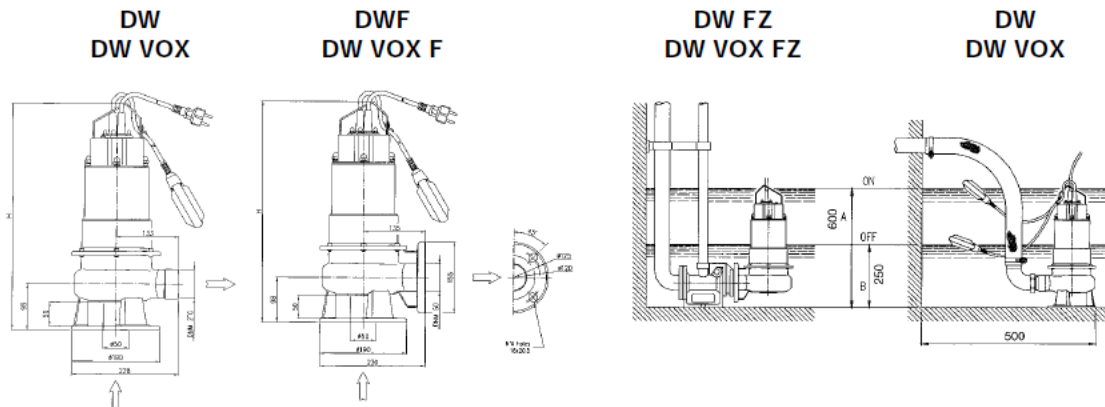
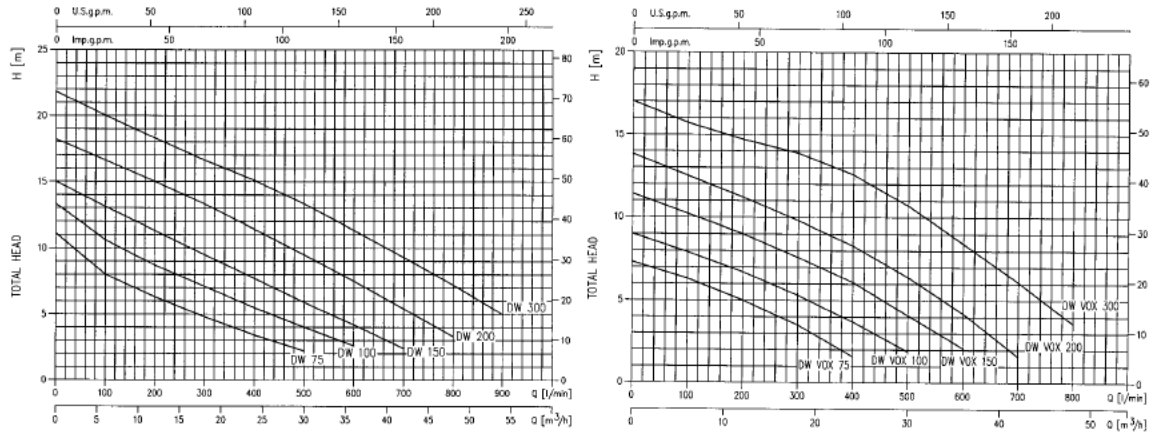
- Asynchronous 2 poles motor
- Insulation class F
- Protection degree IP68
- 1~230V ±10% 50Hz - 3~400V ± 10% 50Hz
- Permanent split capacitor and automatic thermal overload protection for single-phase version
- Thermal protection to be provided by the user for three-phase version
- DNA 50-DNM 2"
- DNM 50PN10 (F version)



DIMENSIONAL TABLE

| Pump type | Dimensions (mm) | | Weight kg | Pump type | Dimensions (mm) | | Weight kg |
|-----------|-----------------|--|--------------|------------|-----------------|--|--------------|
| | H | | | | H | | |
| DW 75 | 485 | | 16 | DW VOX 75 | 485 | | 16 |
| DW 100 | 515 | | 18 | DW VOX 100 | 515 | | 18 |
| DW 150 | 515 | | 20 | DW VOX 150 | 515 | | 20 |
| DW 200 | 515 | | 20 | DW VOX 200 | 515 | | 20 |
| DW 300 | 545 | | 26 | DW VOX 300 | 545 | | 26 |

PERFORMANCE CURVES (according to ISO 9906 Annex A)



PERFORMANCE TABLE

| Pump type | | kW | Capacitor | | Absorbed Current (A) | | l/min m³/h | Q=Capacity | | | | | | | | |
|---------------------------|--------------------------|------|-----------|----------------|----------------------|------------|---------------|------------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|
| Single-phase 230V 50Hz | Three-phase 400V 50Hz | | µF | V _c | 1- | 3- 400V | | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 |
| DW 75 M | DW 75 | 0,55 | 20 | 450 | 3,9 | 1,5 | 8 | 6,3 | 4,8 | 3,4 | 2,2 | - | - | - | - | |
| DW 100 M | DW 100 | 0,75 | 25 | 450 | 5,9 | 2,1 | 10,6 | 8,7 | 7,1 | 5,5 | 4 | 2,6 | - | - | - | |
| DW 150 M | DW 150 | 1,1 | 31,5 | 450 | 7,3 | 2,8 | 13,1 | 11,3 | 9,5 | 7,7 | 5,9 | 4,2 | 2,4 | - | - | |
| - | DW 200 | 1,5 | - | - | - | 3,6 | 16,6 | 15 | 13,3 | 11,4 | 9,5 | 7,5 | 5,4 | 3,3 | 5 | |
| - | DW 300 | 2,2 | - | - | - | 5,0 | 20 | 18,3 | 16,6 | 15,1 | 13,3 | 11,3 | 9,3 | 7,2 | - | |
| DW VOX 75 M | DW VOX 75 | 0,55 | 20 | 450 | 3,9 | 1,4 | 6,3 | 5 | 3,5 | 1,6 | - | - | - | - | - | |
| DW VOX 100 M | DW VOX 100 | 0,75 | 25 | 450 | 5,8 | 2,1 | 7,9 | 6,7 | 5,3 | 3,7 | 1,9 | - | - | - | - | |
| DW VOX 150 M | DW VOX 150 | 1,1 | 31,5 | 450 | 7,3 | 2,8 | 10,2 | 9 | 7,6 | 6,1 | 4,1 | 2,1 | - | - | - | |
| - | DW VOX 200 | 1,5 | - | - | - | 3,3 | 12,5 | 11,2 | 9,8 | 8,3 | 6,4 | 4,2 | 1,6 | - | - | |
| - | DW VOX 300 | 2,2 | - | - | - | 4,4 | 15,7 | 14,7 | 13,9 | 12,6 | 10,7 | 8,4 | 6,1 | 3,6 | - | |

Annexe 7 : Liste de 44 plantes épuratrices présélectionnées pour le Projet 1.

| Plantes | Profondeur d'eau | Densité | Valeur épuratrice | Sources |
|--|------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------|
| Ache inondée (<i>Apium inundatum</i>) | 10 à 20 cm | - | - | |
| Acore calame (<i>Acorus calamus</i>) | 7 à 20 cm | 4/m ² | + | |
| Arum de virginie (<i>Peltandra virginica</i>) | 30 cm | - | - | |
| Baldingère faux-roseau (<i>Phalaris arundinacea</i>) | 15 cm | 12/m ² | +++ | |
| Bambou (<i>Phyllostachys atrovaginata</i>) | - | - | ++ | Molle, 2008 |
| Canne de Provence (<i>Arundo donax</i>) | Sol humide | 9/m ² | - | |
| Carex (<i>Carex</i>) | 0 à 30 cm | 6/m ² | + | |
| Cornifle nageant (<i>Ceratophyllum demersum</i>) | 30 à 80 cm | 3/m ² | +++ | Boistel, 1981 |
| Elodée (<i>Elodea densa</i>) | | 3/m ² | +++ | |
| Epiaire des marais (<i>Stachys palustris</i>) | 10 à 20 cm | 3/m ² | +++ | |
| Fougère aquatique (<i>Azolla</i>) | - | - | +++ | Billard, 1995 ; Molle, 2008 |
| Glaïeul bleu (<i>Iris versicolor</i>) | 0 à 10 cm | 4/m ² | ++ | |
| Glycérie aquatique (<i>Glyceria maxima</i>) | 0 à 30 cm | 3/m ² | +++ | |
| Iris jaune (<i>Iris pseudacorus</i>) | 0 à 40 cm | 6/m ² | ++ | Triponel, 2007 |
| Jacinthe d'eau (<i>Eichhornia crassipes</i>) | Flottante | 3/m ² | +++ | Klaba, 2000 ; Mougin, 1988 |
| Jonc (<i>Scirpus cyperinus</i>) | - | - | - | |
| Jonc aggloméré (<i>Juncus conglomeratus</i>) | 0 à 10 cm | 6/m ² | - | |
| Jonc des tonneliers (<i>Scirpus lacustris</i>) | 0 à 80 cm | 3/m ² | ++ | Blake et al., 1988 |
| Jonc épars (<i>Juncus effusus</i>) | 0 à 10 cm | 6/m ² | - | |
| Jonc fleuri (<i>Butomus umbellatus</i>) | 50 à 30 cm | 8/m ² | + | |
| Laitue d'eau (<i>Pistia stratiotes</i>) | Flottante | 4/m ² | +++ | Triponel, 2007 |
| Massette (<i>Typha latifolia</i>) | 0 à 40 cm | 3/m ² | +++ | Molle, 2008 |
| Massette à feuilles étroites (<i>Typha angustifolia</i>) | 0 à 40 cm | 3/m ² | +++ | Molle, 2008 |
| Menthe aquatique (<i>Mentha aquatica</i>) | 0 à 20 cm | 3/m ² | +++ | |

| | | | | |
|--|------------|------------------|-----|--------------------|
| Menthe des cerfs (<i>Preslia cervina</i>) | 0 à 10 cm | 4/m ² | ++ | |
| Myriophylle (<i>Myriophyllum demersum</i>) | 10 à 30 cm | 1/m ² | +++ | Blake et al., 1988 |
| Nénuphar jaune (<i>Nuphar luteum</i>) | mini 60 cm | 1/m ² | +++ | |
| Nymphéa blanc (<i>Nymphaea alba</i>) | Flottante | 1/m ² | ++ | |
| Œnanthe (<i>Oenanthe aquatica</i>) | 0 à 10 cm | 9/m ² | +++ | |
| Papyrus (<i>Cyperus papyrus</i>) | 0 à 40 cm | - | ++ | |
| Pesse d'eau (<i>Hippuris vulgaris</i>) | 0 à 150 cm | 4/m ² | +++ | |
| Pontédérie à feuille en cœur (<i>Pontederia cordata</i>) | 30 cm | 4/m ² | ++ | |
| Potamot nageant (<i>Potamogeton natans</i>) | 20 à 60 cm | 1/m ² | +++ | |
| Renoncule (<i>Ranunculus aquatilis</i>) | 0 à 20 cm | 8/m ² | +++ | |
| Riz sauvage (<i>Zizania aquatica</i>) | 30 cm | - | +++ | |
| Roseau commun (<i>Phragmites australis</i>) | 0 à 30 cm | 4/m ² | +++ | Blake et al., 1988 |
| Rubannier rameux (<i>Sparganium ramosum</i>) | 0 à 10 cm | 3/m ² | ++ | |
| Sagittaire (<i>Sagittaria latifolia</i>) | 30 cm | 5/m ² | +++ | |
| Saurure penchée (<i>Saururus cernuus</i>) | 0 à 30 cm | 6/m ² | +++ | |
| Scirpe piquant (<i>Scirpus pungens</i>) | 15 cm | - | ++ | Triponel, 2007 |
| Scirpe valide (<i>Scirpus validus</i>) | 30 cm | - | +++ | Triponel, 2007 |
| Souchet des marais (<i>Eleocharis palustris</i>) | 10 à 20 cm | 3/m ² | +++ | |
| Trèfle d'eau (<i>Menyanthes trifoliata</i>) | 0 à 20 cm | 9/m ² | ++ | |
| Véronique des ruisseaux (<i>Veronica beccabunga</i>) | 0 à 20 cm | 3/m ² | +++ | |

Tableau réalisé en relation avec certains professionnels de la culture de plantes aquatiques et en se basant sur la littérature existante.

Annexe 8 : Bilan de masse d'un élevage de 1 000 carpes utilisé pour évaluer les rejets quotidiens – exemple du mois de mai.

- Biomasse calculée à partir du modèle de croissance (Billard, 1995) et du nombre de carpes (Nombre initial – mortalité (Billard, 1995)).
- Poissons morts = 0,05xbiomasse (Billard, 1995)
- Protéines = 0,1394xbiomasse et Phosphore = 0,0048xbiomasse (Schreckenbach et al., 2000)

| Entrée | | | Sortie | | |
|------------------------------|----------------------|------------------|-------------------------------|------------------|-------------------|
| Carpe commune | | | Carpe commune | | |
| Poids en sortie | Poids | 20 kg | Poids en sortie | Poids | 58,6 kg |
| | Protéine | 2,79 kg | | Protéines | 8,16 kg |
| | Phosphore | 0,096 kg | | Phosphore | 0,28 kg |
| | | | Poissons morts | Poids | 2,92798 kg |
| | | | | Protéine | 0,40865 kg |
| | | | | Phosphore | 0,014079 kg |
| Total aliment | Poids | 36,210 kg | Aliment non consommé | 5% | |
| | Protéine | 11,587 kg | | Poids | 1,81026 kg |
| | Azote (N) | 1,853 kg | | Protéine | 0,57923 kg |
| | Phosphore (P) | 0,362 kg | | Phosphore | 0,01823 kg |
| Total proteine entrée | | 14,38 kg | Total proteine sortie: | | 8,74 kg |
| Total N entrée | | 2,300 kg | Total N sortie | | 1,3985 kg |
| Total P entrée | | 0,458 kg | Total P sortie | | 0,30 kg |

- Tables d'alimentation de la carpe (Le Guessant) : ici 3,1% du poids/jours
- Protéines = 0,32xpoids d'aliment et Phosphore = 0,01xpoids d'aliment (Le Guessant)
- Azote = 6,25xProtéines (Schreckenbach et al., 2000)

- Azote = 6,25xProtéines (Schreckenbach et al., 2000)
- Sommes de l'ensemble des entrée et des sorties

Hypothèse :
5 % de l'aliment est non consommé

| | |
|--------------------|-------------|
| N-NH3 | N-N2 |
| 0,231746893 | 0,322591674 |
| N total Gaz | |
| 0,554338567 | |

| | |
|------------------------|--------------------|
| P fécal | 0,171999647 |
| P alim non cons | 0,018105226 |
| P solide | 0,190104873 |
| P dissout | 0,006943809 |
| P total émis: | 0,197048682 |

| | |
|------------------------|-------------|
| N fécal | 0,13385701 |
| N alim non cons | 0,09269876 |
| N solide | 0,22655576 |
| N dissous | 0,21318802 |
| N total Gaz | 0,55433857 |
| N total émis: | 0,99 |

| Nutriments rejetés dans l'eau | N- Azote | P-Phosphore |
|--------------------------------------|-----------------|--------------------|
| Fraction solide | 0,23 | 0,19 |
| Fraction dissoute | 0,21 | 0,01 |
| Fraction Gazeuse | 0,554338567 | - |
| TOTAL rejets (kg) | 0,44 | 0,20 |

| | | |
|------------------------------|-------------|------------|
| Estimation g rejets/j | 14,2 | 6,4 |
|------------------------------|-------------|------------|

$$N-NH3 = 0,125 \times N \text{ aliment et } N2 = 0,174 \times N \text{ aliment}$$

$$N \text{ total Gaz} = N-NH3 + N2$$

$$P \text{ fécal} = (1 - \text{pourcentage de digestibilité du P}) \times P \text{ aliment consommé}$$

$$P \text{ aliment non consommé}$$

$$P \text{ solide} = P \text{ fécale} + P \text{ alim non cons}$$

$$P \text{ dissout} = \text{pourcentage de digestibilité du P} \times P \text{ aliment consommé} - P \text{ assimilé par les poissons}$$

$$P \text{ total émis} = P \text{ solide} + P \text{ dissout}$$

$$N \text{ fécal} = (1 - \text{Pourcentage de digestibilité du N}) \times N \text{ aliment consommé}$$

$$N \text{ aliment non consommé}$$

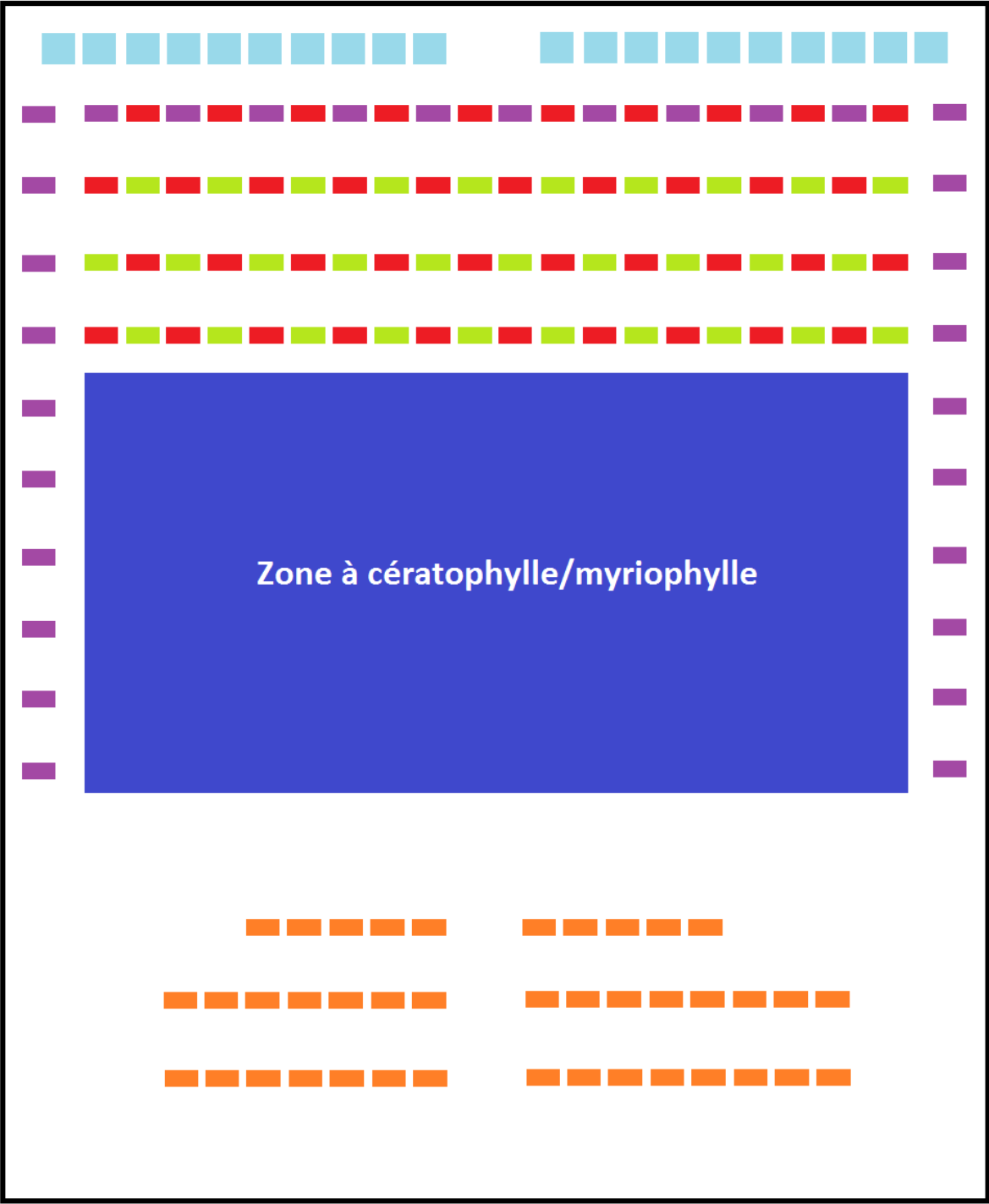
$$N \text{ solide} = N \text{ fécale} + N \text{ alim non cons}$$

$$N \text{ dissout} = \text{Pourcentage de digestibilité du N} \times N \text{ aliment consommé} - N \text{ assimilé par les poissons}$$

$$N \text{ total émis} = N \text{ solide} + N \text{ dissout}$$

$$(\text{TOTAL rejets (kg)} / \text{Nombre de jours}) \times 1000 \text{ (pour mettre en g)}$$

Annexe 9 : Répartition des macrophytes dans les bassins « épuration » et dans le « témoin macrophytes ».



- Phragmite
- Nénuphar
- Massette
- Glycérie
- Menthe d'eau

Annexe 10 : Protocole du suivi 24h du 24-25 juin 2013.

Protocole (chronologie) :

- 24/06/2013 (J1) :
 - 10h30 : Mise en place des 4 préleveurs → un au milieu d'un étang extensif (508), un autre au milieu d'un étang intensif (505) et deux dans le bassin « épuration » (506) d'un système couplé (le premier à côté de la pompe et le second au niveau de la surverse) (**Fig. 1**).
 - Mise en place de 2 sondes (température, O₂, pH, conductivité, redox) (**Fig. 1**).
 - 11h : Début des analyses :
 - Prélèvements acidifiés toutes les 2h à partir de 11h (NH₄⁺, NO₂, NO₃⁻, PO₄²⁻, N_{tot}, P_{tot}).
 - Prélèvements non-acidifiés (MES) toutes les 2h à partir de 12h.

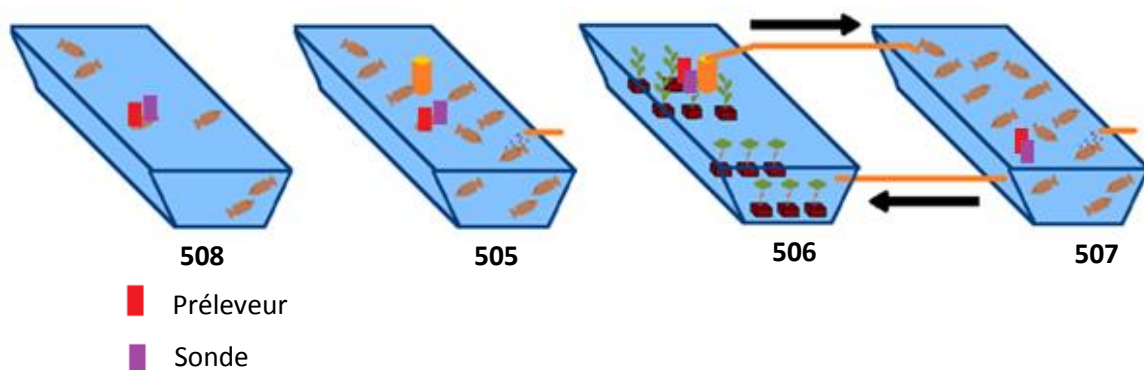


Fig. 1 Localisation des préleveurs et des sondes dans les étangs concernés.

- 25/06/2013 (J2) :
 - 10h : Fin des prélèvements du J1
 - Transfert des prélèvements acidifiés dans des flacons de 250 mL (12)
 - Transfert des prélèvements non-acidifiés dans un bidon de 3 L → Mélange → Répartition dans trois flacons de 1 L.
 - Mise en place des préleveurs dans les mêmes étangs.
 - 10h30 : Début des analyses :
 - Prélèvements acidifiés toutes les 2h à partir de 10h30 (NH₄⁺, NO₂, NO₃⁻, PO₄²⁻, N_{tot}, P_{tot}).
 - Prélèvements non-acidifiés (MES) toutes les 2h à partir de 11h30.
- 26/06/2013 (J3) :
 - 9h30 : Fin des prélèvements du J2
 - Transfert des prélèvements acidifiés dans des flacons de 250 mL (12)
 - Transfert des prélèvements non-acidifiés dans un bidon de 3 L → Mélange → Répartition dans trois flacons de 1 L.
 - Retrait des préleveurs et des sondes.
 - 9h30 : Début de la pêche de contrôle

Matériel nécessaire :

- 4 préleveurs
- 2 sondes (température, O₂, pH, conductivité, redox)
- 96 flacons de 250 ml

- 1 bidon de 3 L
- 24 flacons de 1 L
- Acide sulfurique
- Etiquettes
- 2 marqueurs
- Fiches de relevé

Annexe 11 : Photos des étangs du Projet 2 (Sandres).



© ADAM M. 2013



© ADAM M. 2013



© ADAM M. 2013



© ADAM M. 2013



© ADAM M. 2013

SYSTEME INNOVANT



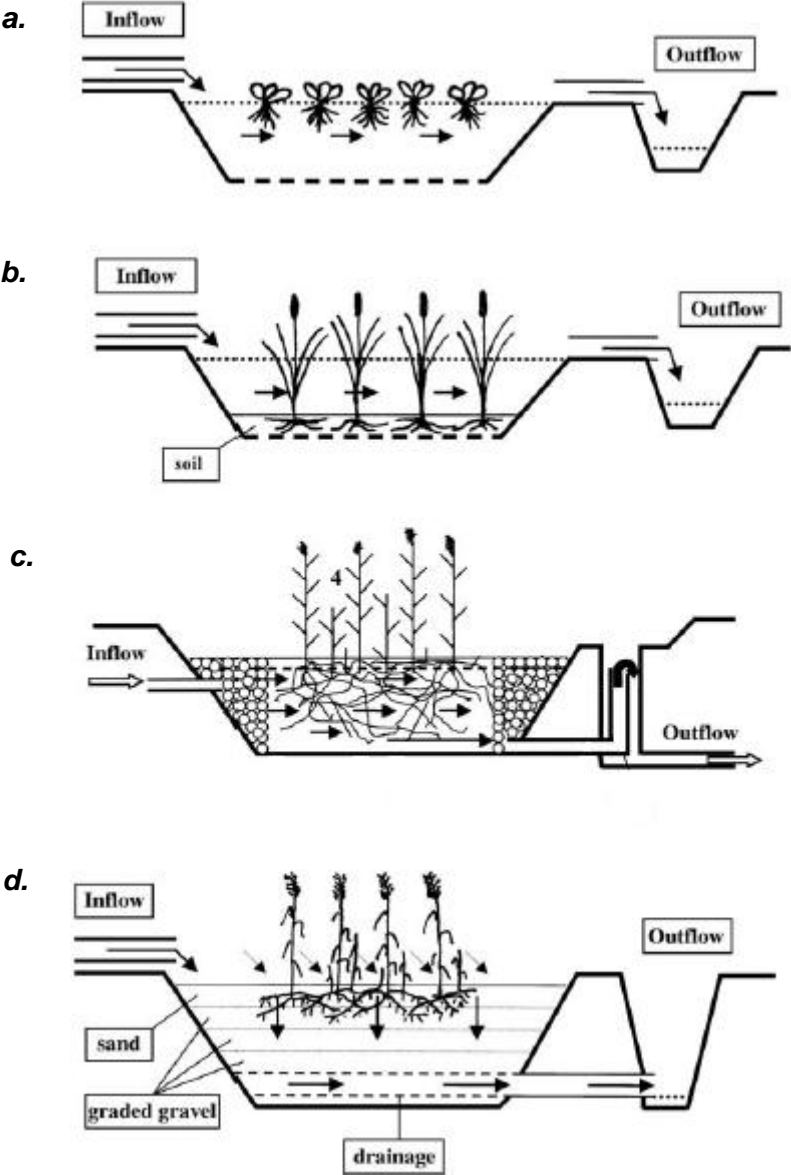
© ADAM M. 2013

SYSTEME TEMOIN

Annexe 13 : Calendrier du Projet 2 « Production de sandres par une utilisation maximale du zooplancton ».

| Semaine | Opération |
|-------------------------------|--|
| 16 | Introduction d'un kilo de gardons et d'un kilo de rotengles dans les cages. Introduction de 4 kg de gardons et de 4 kg de rotengles dans les témoins. |
| 17 | - |
| 18 | Fertilisation organique (10 t/ha soit 400 kg par bassin) et introduction de foin. Retrait des géniteurs ayant pondu et réintroduction d'un kilo de gardons et d'un kilo de rotengles. |
| 19 | Culture de VR (Vésicules Résorbées) de sandres |
| 20 | Retrait des géniteurs ayant pondu et réintroduction d'un kilo de gardons et d'un kilo de rotengles. |
| 21 | - |
| 22 | Retrait des géniteurs ayant pondu et réintroduction d'un kilo de gardons et d'un kilo de rotengles. |
| 23 | Mise en charge des sandres de 4-5 semaines (0,5/m ² soit 200 par bassin) |
| 24 | Retrait des géniteurs ayant pondu et réintroduction d'un kilo de gardons et d'un kilo de rotengles. |
| 25 | Retrait des géniteurs ayant pondu et réintroduction d'un kilo de gardons et d'un kilo de rotengles. |
| 27 | Introduction des VR de tanches (10 VR/m ²) |
| Mi-octobre : pêche des étangs | |

Annexe 14 : Schéma des différents types de lagune de traitements d'effluents : avec plantes flottantes (a.), avec l'eau de surface libre et des héliophytes (b.), avec de l'eau en profondeur avec circulation verticale et des héliophytes (c.), avec de l'eau en profondeur avec circulation horizontale et des héliophytes (d.).



D'après Vymazal, 2001 in Vymazal, 2007.

Annexe 15 : Fiche technique de la pompe New-Star 620.

NEW-STAR 620-920



bombas de pistón para agua fría

CARACTERISTICAS

Presión de trabajo hasta 6 BARS.

Caudal hasta 4.500 l/h.

Cuerpo de bomba de fundición gris. Camisa de cilindro recambiable. Las bombas 920.2 se fabrican también con el cuerpo enteramente en «BRONCE».

Cárter en baño de aceite.

Transmisión por correas trapeciales.

MONTAJES

Electrobombas con motor trifásico o monofásico (hasta 1,1 kW). Bombas sin motor. Bajo demanda con motor de corriente continua.

APLICACIONES

Uso doméstico, pequeños grupos de presión.

Gracias a su bajo consumo de electricidad y a que mantienen la altura manométrica máxima a cualquier régimen de revoluciones, son las bombas idóneas para ir conectadas a paneles solares.

pompes à piston pour eau froide

CARACTÉRISTIQUES

Pression de travail jusqu'à 6 BARS.

Débit jusqu'à 4.500 l/h.

Corps de pompe en fonte. Cylindre chemisé. Les pompes 920.2 sont aussi livrables avec le corps entièrement en «BRONZE».

Carter en bain d'huile.

Transmission par courroies trapézoïdales.

MONTAGES

Électropompes avec moteur triphasé ou monophasé (jusqu'à 1,1 kW). Pompes sans moteur. Sur demande avec moteur à courant continu.

UTILISATIONS

Usage domestique, petits groupes surpresseurs.

Puissance nécessaire très basse et maintien de la hauteur manométrique maxi à n'importe quel régime, ce qui les rend indispensables dans le domaine de l'énergie solaire.

piston pumps for cold water

FEATURES

Working pressure up to 6 BAR.

Flow up to 4,500 litres per hour.

Pump head is in cast iron grey. The cylinder casing is replaceable. The 920.2 pumps are also made with a head entirely in «BRONZE».

The crankcase is bathed in oil.

Transmission by trapezoidal belts.

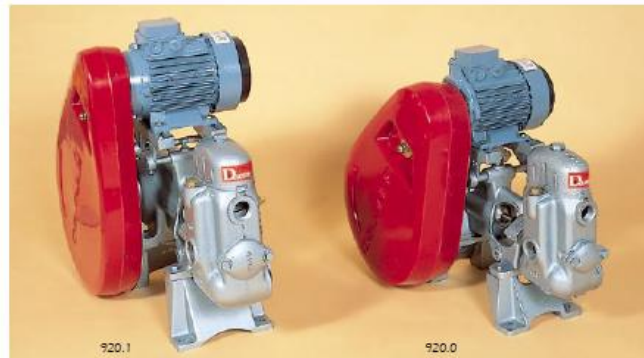
MOUNTINGS

Electric pumps with a three-phase motor or a single-phase motor (up to 1,1 kW). Pumps without a motor. Under order with a continuous current motor.

USES

Household use, small pressure units.

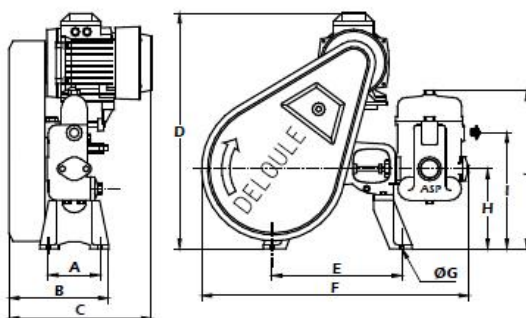
Their low electricity consumption and the fact that they maintain maximum static head at any motor speed makes these pumps ideal for connecting to solar panels.



| TIPO TYPE | CAUDAL DÉBIT - FLOW L/H | PRESION MAX. PRESSION MAX. MAX. PRESSURE BARS | POTENCIA PUISSANCE POWER kW | ROSCAS HEMBRA GAS ISO 228/1 FILETAGE FEMELLE ISO 228/1 GAS ISO 228/1 INTERNAL THREAD | | R.P.M. | PISTON | PESO POIDS WEIGHT Kg. |
|--------------|-------------------------------|--|--------------------------------------|--|-----------------|--------|----------|--------------------------------|
| | | | | ASP. SUCT. | IMP. REFOUL. | | | |
| 620.00-2 | 600 | 5,5 | 0,25 | 3/4" | 1/2" | 350 | D.30 mm. | 18 |
| 920.0-1 | 1.000 | 4 | 0,25 | 1" | 3/4" | 250 | D.35 mm. | 35 |
| 920.0-2 | 1.000 | 6 | 0,37 | 1" | 3/4" | 250 | D.35 mm. | 35 |
| 920.1-1 | 2.000 | 4 | 0,55 | 1 1/4" | 1" | 250 | D.45 mm. | 53 |
| 920.1-2 | 2.000 | 6 | 0,75 | 1 1/4" | 1" | 250 | D.45 mm. | 54 |
| 920.2-1* | 4.500 | 4 | 1,1 | 2" | 1 1/2" | 205 | D.60 mm. | 110 |
| 920.2-2* | 4.500 | 6 | 1,5 | 2" | 1 1/2" | 205 | D.60 mm. | 113 |

*Disponibles en bronze - Livrables en bronze - Available in bronze

NEW-STAR Y STARPRESS



| TIPO TYPE | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J |
|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|
| 620.00 627.00 | 102 | 175 | 230 | 340 | 114 | 400 | 8 | 122 | 168 | 167 |
| 920.0 927.0 | 130 | 220 | 260 | 500 | 267 | 565 | 9,5 | 170 | 250 | 358 |
| 920.1 927.1 | 160 | 250 | 300 | 560 | 323 | 680 | 11,5 | 200 | 287 | 400 |
| 920.2 927.2 | 185 | 300 | 370 | 700 | 413 | 895 | 13,5 | 297 | 345 | 550 |

Las cotas son únicamente a título orientativo.
Cotes uniquement à titre indicatif. - The measurements are purely orientative.

Los tipos 00 y 2 tienen la polea y la boca de ASP a la derecha.
Les types 00 et 2 ont le volant et l'aspiration à droite.
The pulley and the suction hole of types 00 and 2 are on the right.

Annexe 16 : Fiches de culture de plantes aquatiques.

| | |
|---------------------------|----|
| Nénuphar | 16 |
| Renoncule aquatique | 17 |
| Menthe aquatique..... | 18 |
| Cornifle nageant..... | 19 |



Le Nénuphar

FICHE TECHNIQUE

- Exposition : Mi ombre - Soleil
- Densité : 1 plant/m²
- Profondeur d'eau : 50 – 80 cm
- Substrat : Terreau aquatique
- Floraison : Mai - août

CONSEIL POUR L'ENTRETIEN ET LA MULTIPLICATION

1

A l'automne ou vers avril-mai, sortez le nénuphar de l'eau, égouttez-le et supprimez les feuilles en cours de décomposition.

2

Sortez le rhizome, enlevez la terre et démêlez les racines. Coupez-le en deux morceaux possédant racines et bourgeon.

3

Placez chaque fragment dans un panier aquatique avec un peu de terreau au fond. Recouvrez de terreau.

4

Recouvrez le tout d'un grillage fixé par des crochets pour éviter que le rhizome remonte à la surface.



La renoncule aquatique

FICHE TECHNIQUE

- Exposition : Mi ombre - Soleil
- Densité : 8 plants/m²
- Profondeur d'eau : 0 à 20 cm
- Substrat : Terreau aquatique
- Floraison : Mai - Août

CONSEIL POUR L'ENTRETIEN ET LA MULTIPLICATION

- 1** Vers la mi-juin, choisissez un rameau avec des feuilles et possédant au moins trois yeux (ramifications).
- 2** Sectionnez-le au dessous d'un œil, sous un angle de 45 °. Conservez que trois feuilles en haut de la tige.
- 3** Retirez le bourgeon terminal. Plantez la bouture dans 5 cm de terreau aquatique.
- 4** Recouvrez de pierres plates pour maintenir l'ensemble au fond du bassin.



La menthe aquatique

FICHE TECHNIQUE

- Exposition : Mi ombre - Soleil
- Densité : 3 plants/m²
- Profondeur d'eau : 0 à 20 cm
- Substrat : Terreau aquatique
- Floraison : Juillet - Août

CONSEIL POUR L'ENTRETIEN ET LA MULTIPLICATION

- 1** Vers la mi-juin, choisissez un rameau avec des feuilles et possédant au moins trois yeux (ramifications).
- 2** Sectionnez-le au dessous d'un œil, sous un angle de 45 °. Conservez que trois feuilles en haut de la tige.
- 3** Retirez le bourgeon terminal. Plantez la bouture dans 5 cm de terreau aquatique.
- 4** Recouvrez de pierres plates pour maintenir l'ensemble au fond du bassin.



Le cornifle nageant

FICHE TECHNIQUE

- Exposition : Mi ombre - Soleil
- Densité : 3 plants/m²
- Profondeur d'eau : 30 à 80 cm
- Substrat : Terreau aquatique

CONSEIL POUR L'ENTRETIEN ET LA MULTIPLICATION

- 1** Vers la mi-juin, choisissez un rameau avec des feuilles et possédant au moins trois yeux (ramifications).
- 2** Sectionnez-le au dessous d'un œil, sous un angle de 45 °. Conservez que trois feuilles en haut de la tige.
- 3** Retirez le bourgeon terminal. Plantez la bouture dans 5 cm de terreau aquatique.
- 4** Recouvrez de pierres plates pour maintenir l'ensemble au fond du bassin.



Diplôme : Ingénieur Agronome
Spécialité : Halieutique
Spécialisation / option : Aquaculture
Enseignant référent : M. Le Bris

Auteur : ADAM Matthieu

Organisme d'accueil : ITAVI

Date de naissance : 18/07/1990

Adresse :

28 Rue du Rocher

Nb pages : 40 p.

Annexe(s) : 24 p.

75 008 Paris

Année de soutenance : 2013

Maître de stage : M. Tocqueville

Titre : Mise en place expérimentale d'une intensification écologique de la pisciculture d'étang

Title: Experimental work about an ecological intensification of the fish farming in pond

Résumé :

Dans le cadre du projet PISCEnLIT, deux scénarios d'intensification écologique en pisciculture d'étang ont été testés. Le premier concerne la mise en évidence du rôle du compartiment végétal dans la gestion des effluents d'un élevage intensifié de carpes. Le second cherche à produire des sandres d'un été, plus gros qu'à l'habituel, en maximisant l'utilisation des ressources trophiques : des géniteurs de poissons fourrages régulièrement introduits apportent, en se reproduisant, des jeunes proies aux carnassiers qui ne doivent pas en manquer au cours de l'été. Des suivis physico-chimiques et zootechniques ont permis d'obtenir quelques résultats intermédiaires, mais rien de concluant quant à l'efficacité des systèmes. En attendant la suite du suivi, des propositions d'améliorations aux systèmes testés, en fonctions des problèmes rencontrés et des limites soulevées au cours de l'étude ont été formulées. Pour optimiser la gestion des effluents par les macrophytes, nous pouvons jouer sur la taille et la forme de la lagune ainsi que sur le choix des espèces de plantes, qui pourront apporter un complément de revenus si elles sont vendues. Au niveau de la production de sandres, nous pouvons augmenter la mise en charge initiale en carnassiers en intervenant sur la fertilisation ainsi que sur l'apport en poissons fourrages. L'ensemble de ces améliorations doivent permettre d'envisager de proposer des voies d'intensification écologique pour la pisciculture d'étangs en France.

Abstract :

Within the framework of the PISCEnLIT project, two scenarios of ecological intensification in pond fish farming were tested. The first deals with the identification of the role of the compartment of macrophytes in the effluents treatment of an intensive carp farming. The second tries to produce bigger fingerlings of pikeperch than usual thanks to a maximization of the using of trophic resources: forage fishes' genitors, regularly introduced, produce young preys by reproducing for the predators. Therefore, there mustn't lack food during all the summer. Some intermediate results were obtained, with the physic, chemical and zoothechnical monitoring, but we couldn't conclude about the system efficiency. However, based on problems and limits we met along the first part of the study, we were able to suggest improved systems. Regarding the treatment of effluents, the size and the form of the wetland can be changed and maybe also the macrophytes species, which can provide an additional income if they are sold. For the production of pikeperch, we can raise the number of predator fishes if we modify the fertilization and the number of forage fishes. All these improvements should allow proposing ways of an ecological intensification for the French fish farming in ponds.

Mots-clés : Aquaculture, Etang, Intensification écologique, Lagunage, Epuration, Carpes, Sandres

Key Words: Aquaculture, Pond, Ecological intensification, Wetlands, Wastewater, Carp, Pikeperch