

Effet de l'enrichissement physique sur une polyculture de sandre (*Sander lucioperca*) et d'esturgeon du Danube (*Acipenser ruthenus*) en circuit recirculé

Jean-Gabriel Reynaud

► **To cite this version:**

Jean-Gabriel Reynaud. Effet de l'enrichissement physique sur une polyculture de sandre (*Sander lucioperca*) et d'esturgeon du Danube (*Acipenser ruthenus*) en circuit recirculé. Sciences du Vivant [q-bio]. 2019. dumas-02371713

HAL Id: dumas-02371713

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02371713>

Submitted on 20 Nov 2019

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 Angers
 CFR Rennes



Année universitaire : **2018-2019**

Spécialité :
Ingénieur agronome

Spécialisation (et option éventuelle) :
**Sciences halieutiques et aquicoles
(Aquaculture)**

Mémoire de Fin d'études

d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Effet de l'enrichissement physique sur une polyculture de sandre (*Sander lucioperca*) et d'esturgeon du Danube (*Acipenser ruthenus*) en circuit recirculé

Par : Jean-Gabriel Reynaud



Sander lucioperca



Acipenser ruthenus

- Source : UR AFPA -

Soutenu à Rennes le 11 Septembre 2019

Devant le jury composé de :

Président : Mme. Dominique Ombredane

Maîtres de stage : Mme. Marielle Thomas,
M. Thomas Lecocq,
M. Alain Pasquet

Enseignant référent : Mme. Dominique Ombredane

Autres membres du Jury (Nom, Qualité) :

Mme. Elodie Reveillac (Enseignant-chercheur,
Agrocampus Ouest Rennes)
M. Christophe Jaeger (INRA, Rennes)

Non confidentiel

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

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation
« Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France »
disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement Marielle Thomas, Thomas Lecocq et Alain Pasquet, pour avoir été présents quand j'en avais besoin, pour m'avoir soutenu pendant ses 6 mois de stage mais aussi pour avoir partagé leur expérience et leur aide pour la rédaction de ce rapport.

Je n'oublie pas bien sûr toutes les personnes sans qui ce travail n'aurait pas été possible : Lola Toomey pour son aide précieuse pour les analyses de données et sa bonne humeur, Yannick Ledoré pour son professionnalisme et sa gentillesse lors des manipulations à la PEA et Joëlle Couturier pour son aide et sa disponibilité lors des analyses des paramètres d'eau.

Je tiens également à remercier toute l'équipe de l'UR AFPA ainsi que tous les stagiaires, avec qui j'ai passé de très bons moments.

Liste des abréviations

AE : Avec enrichissement

GB : Gain de biomasse

GCB : Gain cumulé de biomasse

HP : Hétérogénéité de poids

HT : Hétérogénéité de taille

IC : Indice de conversion alimentaire

ICM : Indice de condition moyen

L : Longueur

P : Poids

PEA : Plateforme Expérimentale en Aquaculture

RAS : *Recirculating Aquaculture System*

S : Taux de survie

SE : Sans enrichissement

TCS : Taux de croissance spécifique

UR AFPA : Unité de Recherche Animal et Fonctionnalités des Produits Animaux

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Planning d'enregistrement pour l'analyse de l'occupation de zones par les poissons

Tableau 2 : Variables zootechniques calculées pour chaque espèce

Tableau 3 : Variables zootechniques calculées à l'échelle de l'unité expérimentale

Tableau 4 : Valeurs moyennes des paramètres zootechniques de T(15) à T(46) pour les sandres

Tableau 5 : Valeurs moyennes des paramètres zootechniques de T(15) à T(46) pour les esturgeons

Tableau 6 : Valeurs moyennes des paramètres zootechniques de T(15) à T(46) pour les sandres et les esturgeons

Liste des Figures

Figure 1 : Unité expérimentale (bac d'élevage)

Figure 2 : Paramètres physico-chimiques des bacs d'élevage avec ou sans enrichissement de T(0) à T(46)

Figure 3 : Enrichissements physiques utilisés dans l'expérimentation

Figure 4 : Schéma à l'échelle de la disposition dans le bac d'élevage des enrichissements, des deux distributeurs automatiques d'aliment, de l'arrivée d'eau et du bulleur (vue horizontale)

Figure 5 : Schéma à l'échelle de la délimitation d'un bac avec enrichissement en deux zones et de l'intensité lumineuse à la surface de chacune d'elles

Figure 6 : Schéma représentant les deux zones analysées dans l'étude comportementale : position des deux caméras et des zones analysées

Figure 7 : Schéma représentant les deux zones analysées dans l'étude comportementale : superposition des zones 1 & 2 et de la zone analysée

Figure 8 : Nombre de sandres en zone 1 et en zone 2 en fonction de la période de la journée

Figure 9 : Nombre d'esturgeons en zone 1 et en zone 2 en fonction de la période de la journée

Figure 10 : Evolution du taux de survie, du gain de biomasse et de l'hétérogénéité de poids de T (0) à T (46) pour les sandres avec enrichissement (AE) ou sans enrichissement (SE)

Figure 11 : Evolution du taux de survie, du gain de biomasse et de l'hétérogénéité de poids de T (0) à T (46) pour les esturgeons avec enrichissement (AE) ou sans enrichissement (SE)

Figure 12 : Evolution du gain cumulé de biomasse et de l'indice de conversion alimentaire de T (15) à T (46) pour les sandres et les esturgeons avec enrichissement (AE) ou sans enrichissement (SE)

Sommaire

I. Introduction.....	1
II. Matériels et méthodes.....	3
II.1) Matériel biologique	3
II.2) Structures et conditions d'élevage.....	3
II.3) Paramètres étudiés	7
II.3.a) Etude de la répartition spatiale.....	7
II.3.b) Etude zootechnique	10
II.4) Analyses statistiques.....	12
III. Résultats.....	13
III.1) Influence de l'enrichissement sur l'occupation des zones 1 et 2 par les sandres et les esturgeons.....	13
III.1.a) Cas des sandres.....	13
III.1.b) Cas des esturgeons	14
III.2) Influence de l'enrichissement sur les paramètres zootechniques des sandres et les esturgeons.....	15
III.2.a) Cas des sandres.....	15
III.2.b) Cas des esturgeons	18
III.2.c) Cas mixte : sandres et esturgeons.....	20
Discussion et perspectives.....	22
Conclusion.....	23
Bibliographie.....	24
ANNEXES.....	29

I. Introduction

En Europe, en production aquacole d'eau douce, l'aquaculture en circuit recirculé (désignée aussi sous l'acronyme RAS pour *Recirculating Aquaculture Systems*) est l'une des pratiques d'élevage intensif (Blancheton *et al.*, 2009 ; Dalsgaard, 2013 ; Nielsen *et al.*, 2016). Ce mode de production hors sol en bassin artificiel se définit comme un élevage à forte densité (10 à 100 kg/m³) avec un apport complet d'aliment et un contrôle régulier des paramètres d'élevage (Remus, 1973 ; Ifremer, 2009). L'eau utilisée y est recyclée et réutilisée dans le système (Ifremer, 2009). Initialement développée au Japon dans les années 1950 (Murray *et al.*, 2014), cette pratique d'élevage s'est progressivement répandue en Europe entre les années 1980 et 1990 (Bergheim, 2007 ; Dalsgaard, 2013), pour dépasser en 2009 la barre des 8 % de la production aquacole européenne d'eau douce (Commission européenne, 2012), avec plus de 23 500 t produites (Martins *et al.*, 2010). Actuellement, dans un contexte où l'accès à l'espace et à l'utilisation de l'eau est de plus en plus restreint (Blancheton *et al.*, 2009 ; Martins *et al.*, 2010), ce type de système aquacole tend à se développer (Badiola *et al.*, 2012).

La production en RAS permet en effet de réutiliser et donc d'économiser l'eau des bassins d'élevage, de faciliter le traitement des déchets organiques issus de la production (ex : phosphore et ammoniacque). Elle permet également de mieux contrôler les paramètres d'élevage pour garantir à la fois une croissance optimale et limiter le développement de pathogènes, tout en pouvant produire à forte densité dans des volumes restreints (Blancheton *et al.*, 2007 ; Sturrock *et al.*, 2008 ; Blidariu et Grozea, 2011 ; Bregnballe, 2015). Néanmoins, l'élevage intensif en RAS est un système de production coûteux qui nécessite un apport d'aliment exogène constituant un poste important des dépenses annuelles (Bregnballe, 2015 ; Baki et Yücel, 2017). Dans certains cas, compte tenu du comportement alimentaire des poissons produits, une partie de l'aliment distribué n'est pas consommée. Ceci induit une perte sèche d'aliment et peut entraîner une dégradation des constantes de l'eau d'élevage pouvant rendre les poissons malades (Liu *et al.*, 2014), démultipliant ainsi la perte de gain économique finale. C'est le cas de l'élevage du sandre en RAS qui se nourrit dans la colonne d'eau et ne récupère pas ou peu la nourriture tombée sur le fond (Mihailov *et al.*, 2017).

Ce surplus de nourriture conduit à une accumulation et une dégradation des déchets organiques au fond des bassins pouvant influencer négativement la qualité de l'eau avec l'apparition d'ammoniacque par exemple (Muir, 1982 dans Van Rijn, 1996 ; Zakes, 1999). En excès, l'ammoniacque peut entraîner différents dommages sur les tissus des poissons (branchies et reins), réduire leur résistance aux maladies, leur croissance et entraîner leur mort (Blidariu et Grozea, 2011).

Aujourd'hui, l'essentiel de l'élevage intensif en RAS est réalisé en monoculture (Blancheton *et al.*, 2009). Jusqu'à présent, le modèle d'élevage plurispécifique (ou polyculture), c'est-à-dire l'association de deux espèces ou plus dans un même milieu d'élevage, est resté très peu utilisé pour ce mode de production (Martan, 2008). Néanmoins, la polyculture pourrait être un moyen de résoudre certains problèmes liés aux pratiques actuelles en système RAS. En effet,

l'application du concept de polyculture en RAS devrait permettre une meilleure utilisation de l'aliment par des espèces complémentaires dans l'exploitation des ressources spatiales et donc optimiser les gains économiques. Par exemple, la polyculture de carpe commune (*Cyprinus carpio*) et de tilapia (*Oreochromis aureus*) en RAS a démontré un meilleur gain de biomasse globale pour les deux espèces grâce à une meilleure utilisation de l'aliment distribué et un meilleur contrôle des paramètres d'élevage (alimentation et qualité de l'eau) (Papoutsoglou *et al.*, 1992). Kozłowski *et al.*, (2014) ont également observé que la polyculture de sandre (*Sander lucioperca*) et d'esturgeon du Danube (*Acipenser ruthenus*) en RAS permettait une meilleure utilisation de l'aliment grâce aux esturgeons, qui s'alimentaient sur le fond avec le reste de la nourriture non consommée par les sandres dans la colonne d'eau.

Mais le concept de polyculture en RAS pourrait s'avérer difficile à mettre en place. En effet, élever plusieurs espèces dans un même milieu nécessite de choisir au préalable des espèces qui ont les mêmes exigences physico-chimiques, qui ne se nuisent pas dans l'exploitation des ressources alimentaires et spatiales, et qui soient bien valorisables sur le marché pour maximiser le gain économique final (Sharma *et al.*, 1999 ; Bocek, 2004). De plus, la densité de poissons et le taux de rationnement doivent être bien déterminés afin de limiter des problématiques zootechniques interspécifiques et intraspécifiques comme de la compétition alimentaire (Sharma *et al.*, 1999). En polyculture d'étang par exemple, en fonction de la densité des espèces utilisées, l'association de carpes à grosse tête (*Hypophthalmichthys nobilis*) et de carpes communes (*C. carpio*) peut mener à une diminution de croissance des carpes communes à cause d'une compétition alimentaire directe (alimentation sur même source d'aliment) et indirecte pour la nourriture (consommation des larves planctoniques de chironomes par les carpes à grosse tête qui réduit la population des chironomes benthiques adultes, source d'alimentation des carpes communes) (Opuszyński, 1981).

Aussi, pour gérer au mieux ces problèmes zootechniques potentiels tout en assurant la rentabilité économique de l'exploitation, plusieurs solutions pourraient être envisagées pour rendre le système plus efficient. L'une d'entre elles porte sur la complexification physique du milieu d'élevage permettant ainsi à chaque espèce d'exploiter au mieux une même ressource trophique grâce à une meilleure complémentarité dans l'exploitation des ressources spatiales.

En effet, cette complexification du milieu par l'utilisation de structures physiques (ex : pierre, plante, sable, objets artificiels), définie sous le terme « enrichissement physique », a permis dans diverses monocultures d'améliorer les performances zootechniques d'élevage (croissance et taux de survie) (Näslund et Johnsson, 2016). White *et al.* (2019) ont observé que l'utilisation d'un occultant en haut de l'aquarium et de tubes plastiques immergés verticalement permettaient d'augmenter le gain de biomasse et de faire baisser l'indice de conversion chez les juvéniles de truites arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*) et fario (*Salmo trutta*) sans pour autant augmenter le temps de maintenance des bacs d'élevage. Krebs *et al.* (2016) et Walker *et al.* (2016) ont démontré que l'utilisation d'un occultant en haut de l'aquarium permettait d'augmenter le gain de biomasse et de faire baisser l'indice de conversion respectivement chez des juvéniles de truite fario (*S. trutta*) et des juvéniles de truites arc-en-ciel (*O. mykiss*). Enfin, Hyvärinen et Rodewald, (2013) ont montré que la triple association de graviers, pierres et

l'occultation partielle du haut du bac d'élevage permettait d'augmenter le taux de survie des jeunes saumons Atlantique (*Salmo salar*).

Jusqu'à présent, l'enrichissement physique a été principalement étudié en monoculture, généralement en circuit ouvert et en majorité sur les salmonidés, et les effets obtenus sont dépendant des espèces et du type d'enrichissement utilisé (Näslund et Johnsson, 2016). Les effets potentiellement positifs de l'enrichissement restent donc à démontrer dans des systèmes d'élevage en RAS exploités en polyculture.

Ainsi, cette étude a pour but de répondre à la question suivante :

Est-ce que l'enrichissement physique dans un système d'élevage en RAS exploité en polyculture modifie le comportement des espèces et améliore leurs performances de croissance et leur taux de survie ?

Pour ce faire, l'analyse se basera à la fois sur l'étude d'un paramètre comportemental et de plusieurs paramètres zootechniques de deux espèces d'intérêt aquacole : le sandre (*S. lucioperca*) et l'esturgeon du Danube (*A. ruthenus*) élevés ensemble dans un même milieu.

II. Matériels et méthodes

II.1) Matériel biologique

Deux espèces d'intérêt aquacole, à savoir le sandre (*S. lucioperca*) et l'esturgeon du Danube (*A. ruthenus*) ont été utilisées dans cette étude. Cette association d'espèces découle des résultats des précédentes études (Pasquet *et al.*, en cours) (Annexe I), mais également du fait que l'élevage en RAS et en polyculture de ces espèces est maîtrisé (Kozlowski *et al.*, 2014 ; Mihailov *et al.*, 2017). Elles sont également valorisables sur des marchés de niche (FAO, 2019) et leur qualité de chair est déjà reconnue et appréciée (sandre : Mihailov *et al.*, 2017 ; esturgeon: Prokeš *et al.*, 2011).

II.2) Structures et conditions d'élevage

Les expérimentations ont été menées à la Plateforme Expérimentale en Aquaculture (PEA) de l'Unité de Recherche Animal et Fonctionnalités des Produits Animaux (UR AFPA) de l'Université de Lorraine (Nancy, France) dans six écotrons thermorégulés.

Chaque écotron renferme une unité expérimentale (bac d'élevage) en matériaux composite (fibre et résine polyester), fonctionnant en eau recirculée d'un volume utile de 2400 L (Figure 1).



Figure 1 : Unité expérimentale (bac d'élevage). Source : UR AFPA, 2017.

(1) : écotron thermorégulé de la PEA fonctionnant en circuit recirculé ; (2) : cuve tampon de 300L ; (3) : filtre mécanique à tambour ; (4) : réacteur de stérilisation Ultraviolet

Chaque bac (L = 2 m ; l = 2 m ; h = 0,8 m) est relié à une cuve tampon de 300 L et a un débit de filtration de 5 000 L/h. Le système de filtration est composé d'un filtre mécanique à tambour (Faivre, 63 µm) puis d'un filtre à lit biologique fluidifié de 450 L, rempli de média (type Kaldnes) et enfin d'un réacteur de stérilisation Ultraviolet de 55 W (Figure 1).

Les conditions d'élevage ont été fixées en se référant prioritairement aux besoins physiologiques et comportementaux du sandre (Baekelandt *et al.*, 2018 ; Kozlowski *et al.*, 2010) et en considérant en parallèle les exigences de l'esturgeon du Danube (Akbulut *et al.*, 2013 ; Bayrami *et al.*, 2017).

Ainsi, la photophase a été fixée à 10h pour une intensité de 20 lux (source lumineuse blanche) avec une simulation de l'aube et du crépuscule sur une durée de 30 minutes. Tout au long de l'expérimentation, la température a été maintenue à 20,8°C (+/- 0,2°C), la concentration d'oxygène à 7,2 mg/L (+/- 0,4 mg/L) et le pH à 7,4 (+/- 0,2) (Figure 2). Le suivi de ces paramètres a été effectué trois fois par semaine à l'aide d'une sondes multi-paramètres (WTW pH/Oxi 340i). Par ailleurs, les concentrations des ions ammoniums et nitrites ([N-NH₄⁺] et [N-NO₂⁻]) ont également été vérifiées et les mesures ont été effectuées trois fois par semaine par spectrophotomètre (SECOMAM UviLine 9100) après dosage colorimétrique respectif au bleu d'indophénol et à la sulfanilamide (Annexes II et III).

A						B					
AE	T°C	O2 (mg/L)	pH	NH4+ (mg/L)	NO2- (mg/L)	SE	T°C	O2 (mg/L)	pH	NH4+ (mg/L)	NO2- (mg/L)
Moyenne	20,82	7,15	7,39	0,06	0,02	Moyenne	20,86	7,22	7,35	0,07	0,02
Ecart type moyen	0,12	0,49	0,18	0,04	0,02	Ecart type	0,21	0,38	0,13	0,04	0,01

C					
GLOBAL	T°C	O2 (mg/L)	pH	NH4+ (mg/L)	NO2- (mg/L)
Moyenne	20,8	7,2	7,4	0,06	0,02
Ecart type	0,2	0,4	0,2	0,04	0,01

Figure 2 : Paramètres physico-chimiques des bacs d'élevage avec ou sans enrichissement de T(0) à T(46) (AE : avec enrichissement ; SE : sans d'enrichissement)

- Paramètres physico-chimiques des bacs d'élevage avec enrichissement (AE)
- Paramètres physico-chimiques des bacs d'élevage sans enrichissement (SE)
- Paramètres physico-chimiques pour l'ensemble des bacs d'élevage, toutes conditions confondues

L'étude s'est déroulée sur une période de trois mois. En début de l'expérience, dans chaque unité expérimentale, l'association de sandre-esturgeon a été faite au ratio (%) de 60/40 (45 sandres et 30 esturgeons) pour privilégier l'espèce ayant le plus fort intérêt aquacole, à savoir le sandre. En moyenne, 10410 g (+/- 59,3 g) de poissons ont été ajoutés par bac lors de l'allotement.

Les sandres juvéniles ont été produits et élevés à la PEA (Vandœuvre-lès-Nancy, France). Ils étaient donc de fait déjà acclimatés aux conditions de la PEA dans un bac de 2400L. Au début des tests, les sandres étaient âgés de 15 mois (éclosion en février 2018) avec un poids moyen de 143 g (+/- 41 g).

Les esturgeons du Danube juvéniles provenaient quant à eux de la pisciculture allemande Fischzucht Rhönforelle GmbH & Co. (Gersfeld, Allemagne) et pesaient en moyenne 133 g (+/- 21 g) lors de l'allotement. Lors de leur arrivée à la PEA, les esturgeons du Danube ont été mis en phase d'acclimatation dans les mêmes conditions d'élevage que les sandres. Une unité expérimentale a été utilisée, avec un nourrissage quotidien à l'aide d'un nourrisseur automatique (granulé Sturgeon Grower, taille 3 de marque Le Gouessant) avec un taux de rationnement de 1,5% de la biomasse. La fin de la phase d'acclimatation a été considérée comme atteinte lorsque les esturgeons semblaient visuellement bien s'alimenter et étaient exempts de maladies.

Pendant la période de maintenance, qui a suivi soit la fin de l'acclimatation, soit la fin d'une expérimentation, les conditions d'élevage sont restées identiques. Au total, les esturgeons sont restés 10 semaines en phase acclimations-maintenance ; les sandres quant à eux ont été gardés en phase de maintenance durant 26 semaines.

L'allotement (considéré ici comme le T (0)) a été réalisé dans les six unités expérimentales à disposition, après un jour de jeûne des poissons. Les sandres et les esturgeons ont été conjointement et progressivement répartis dans les six bacs d'élevage, après avoir été respectivement anesthésiés au MS222 ([80 mg/L]), pesés et mesurés.

Un jour après l'association des deux espèces dans les bacs, l'ensemble des poissons a été nourri automatiquement tous les jours, à l'aide de deux distributeurs automatiques FIAP sur tapis roulant, en continu sur une période de trois heures durant la photophase. Comme pendant la phase d'acclimatation, les granulés Sturgeon Grower, taille 3 de marque Le Gouessant composé de 47% de protéines et de 13% de lipides ont été utilisés. Le taux de rationnement a été maintenu à 1,8% de la biomasse. A chaque contrôle de croissance (tous les 15 jours), la quantité d'aliment à distribuer a été recalculée. Enfin, l'augmentation de la quantité de granulés distribuée s'est faite progressivement sur 5 jours afin de laisser le temps au filtre biologique de s'adapter à cette augmentation d'apport de matières organiques.

Sur les six unités expérimentales à disposition, trois ont été équipées d'un enrichissement physique, les trois autres sans enrichissement ont servi d'unités témoins. L'enrichissement a donc été réalisé par la combinaison d'une occultation partielle du haut du

bac d'élevage et de tubes PVC immergés verticalement¹. Ces enrichissements ont été choisis au regard d'essais préliminaires et de résultats obtenus précédemment sur la croissance et l'indice de conversion chez les juvéniles de truites arc-en-ciel (*O. mykiss*) et fario (*S. trutta*), qui ont été soumis à des enrichissements similaires sans pour autant augmenter le temps de maintenance des bacs d'élevage (Kientz et Barnes, 2016 ; Krebs *et al.*, 2016 ; Walker *et al.*, 2016 ; Kientz *et al.*, 2018 ; White *et al.*, 2019).

Les aspects économiques et biologiques ont également été pris en compte. En effet, la mise en place d'une zone avec moins de luminosité est en adéquation avec la biologie des sandres qui préfèrent les zones à faible intensité lumineuse (Luchiari *et al.*, 2006). De plus, Moine *et al.*, (2016) ont montré que l'utilisation de tubes aluminium immergés pouvait réduire la vitesse du courant et créer des micro-zones plus calmes. Les sandres et les esturgeons ont généralement une préférence pour les eaux à faible courant (Sandre : Vehanen et Lathi, 2003 ; Esturgeon : Fieszl *et al.*, 2011). Aussi, en modifiant la courantologie des bacs d'élevage, les tubes PVC utilisés peuvent créer des conditions plus favorables aux deux espèces.

L'occultation d'une partie du bac d'élevage a été obtenue à l'aide d'une plaque opaque en PVC de 1 cm d'épaisseur, de 90 cm de longueur et 75,5 cm de largeur (Figure 3A). Cette plaque a été disposée sur deux chevrons (L=200 cm ; l=3,6 cm ; h=3,6 cm), qui ont également servi de support aux distributeurs automatiques d'aliment. Quatre structures constituées chacune de cinq tubes PVC de 3 cm de diamètre (quatre de 49 cm de longueur, et un central de 39 cm, percés de multiples trous) et fixées à un tube PVC de 3 cm de diamètre par leur extrémité haute ont été utilisées (Figure 3B).

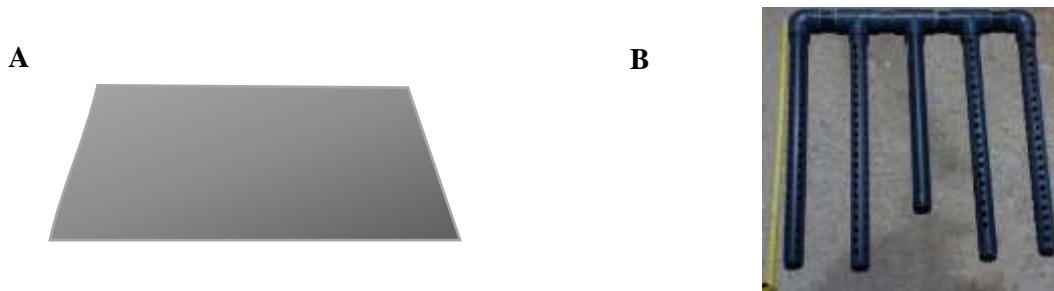


Figure 3 : Enrichissements physiques utilisés dans l'expérimentation

A : Schéma de la plaque opaque en PVC (90x75x1cm) ; **B** : Structure de cinq tubes PVC (4 de 49 cm de long, percés de multiples trous et 1 central de 39 cm de long) de 3 cm de diamètre fixés à un tube PVC de 3 cm de diamètre (Source : Jean-Gabriel Reynaud, 2019)

¹ Considérant la définition stricte de l'enrichissement utilisée dans cette étude, l'enrichissement utilisé devrait être considéré comme un enrichissement physique supplémentaire. En effet, l'utilisation de deux distributeurs automatiques FIAP ainsi que des chevrons de support est déjà considéré comme un enrichissement physique. Cependant, dans un souci de compréhension, les unités expérimentales « les plus enrichies », donc comportant la plaque opaque et les tubes PVC, seront définies ici comme les bacs avec enrichissement (notés AE) ; à l'inverse, les unités expérimentales témoins « les moins enrichies », seront définies ici comme les bacs sans enrichissement (notés SE).

Les structures de tubes pvc ont été immergées et maintenues verticalement à 10 cm du fond à l'aide de cordelette au niveau des chevrons comme indiqué sur la Figure 4 ci-dessous.

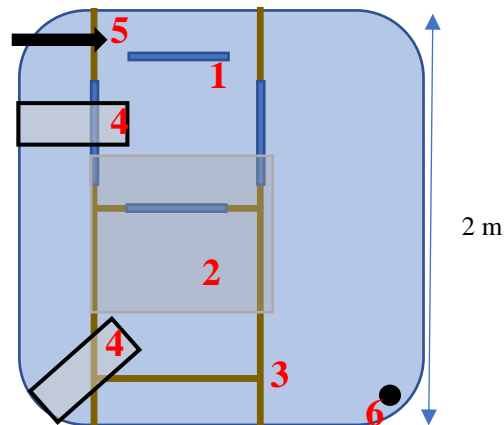


Figure 4 : Schéma à l'échelle de la disposition dans le bac d'élevage des enrichissements, des deux distributeurs automatiques d'aliment, de l'arrivée d'eau et du bulleur (vue horizontale)

(1) : zones d'accroche des structures de cinq tubes PVC sur les chevrons (3) ; (2) : plaque opaque en PVC ; (4) : distributeurs automatiques d'aliment ; (5) : zone d'arrivée d'eau ; (6) : bulleur (dispositif d'oxygénation)

II.3) Paramètres étudiés

Dans cette étude, nous avons évalué l'effet de l'enrichissement à la fois sur un paramètre comportemental et sur plusieurs paramètres zootechniques.

II.3.a) Etude de la répartition spatiale

Le paramètre comportemental pris en compte est l'occupation horizontale de l'espace par les deux espèces. L'étude de ce paramètre a été réalisée par observation vidéo de la répartition des poissons dans les différentes parties du bac définies au préalable.

Chaque bac a été divisé en deux zones d'occupation. La zone 1 correspond pour les bacs enrichis, à la zone ombragée induite par la plaque opaque et par les deux distributeurs automatiques d'aliments. La zone 2 correspond quant à elle, à l'autre zone du bac d'élevage (Figure 5).

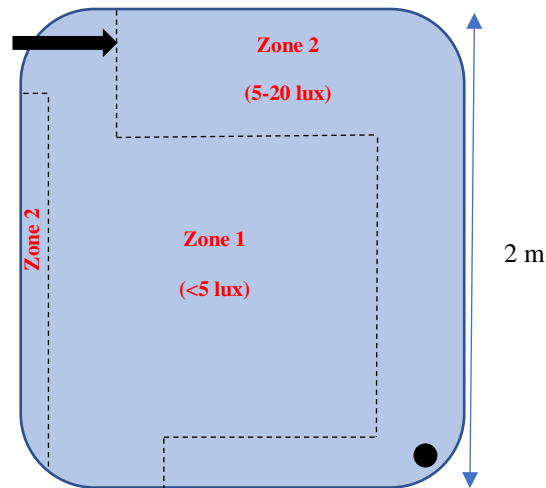


Figure 5 : Schéma à l'échelle de la délimitation d'un bac avec enrichissement en deux zones et de l'intensité lumineuse à la surface de chacune d'elles
 (zone 1) : zone ombragée pour les bacs les plus enrichis (<math><5 \text{ lux}</math>) ; (zone 2) : autre partie du bac ($5-20 \text{ lux}$)

Pour les bacs non enrichis, cette délimitation en deux zones a été effectuée à l'aide de repères disposés sur les bords des bacs ou sur les chevrons. Hormis sous les nourrisseurs automatiques, l'intensité lumineuse a oscillé entre 5 et 20 lux dans les deux zones des bacs non enrichis.

Les enregistrements vidéo ont été effectués à l'aide de deux caméras Sony (modèle HDR CX550 VE). Chaque caméra a été placée sur trépied à une des extrémités de l'unité expérimentale afin d'augmenter la surface observée analysable. Lors de cette expérience, 54% de la surface totale des bacs ont été pris en compte et analysés dans l'étude comportementale (54% de la zone 1 et 46% de la zone 2) (Figure 6 et 7).

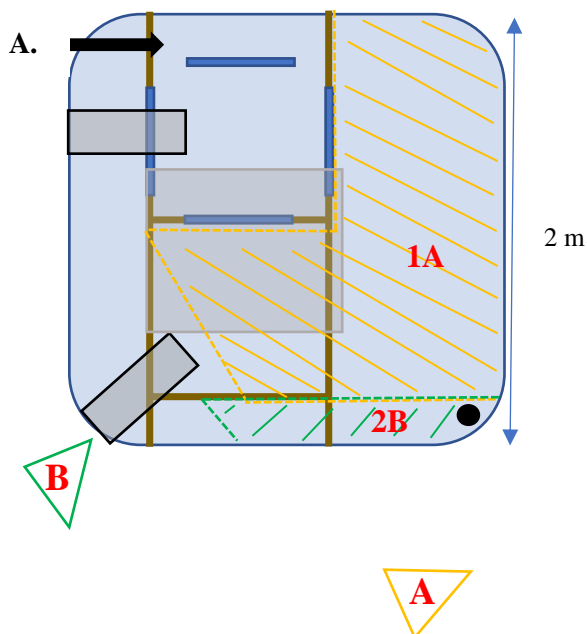


Figure 6 : Schéma représentant les deux zones analysées dans l'étude comportementale
 Schéma à l'échelle de la position des deux caméras Sony (modèle CX550 VE) sur trépieds et des zones analysées pour l'étude de l'occupation de l'espace : (A) : position trépied de la caméra A ; (1A) : zone observée par la caméra A et analysée ; (B) : position trépied de la caméra B ; (2B) : zone observée par la caméra B et analysée.

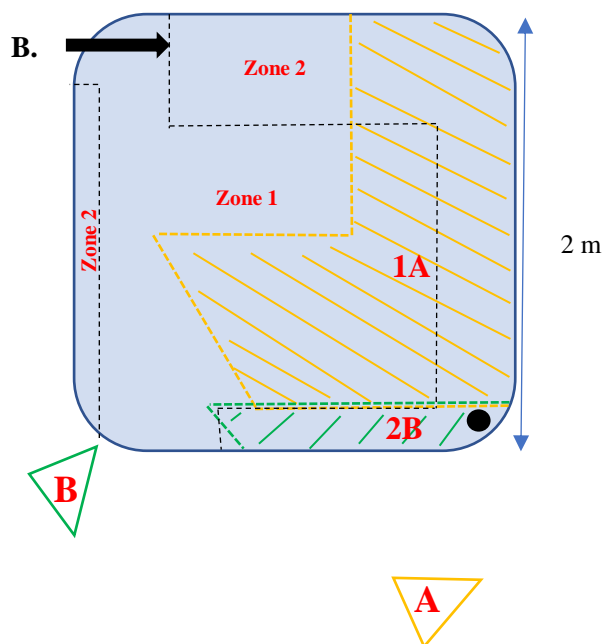


Figure 7 : Schéma représentant les deux zones analysées dans l'étude comportementale

Superposition des zones 1 & 2 définies initialement et de la zone analysée pour l'étude de l'occupation de l'espace : (zone 1) : zone ombragée pour les bacs enrichis ; (zone 2) : autre partie du bac ; (A) : position trépied de la caméra A ; (1A) : zone observée par la caméra A et analysée ; (B) : position trépied de la caméra B ; (2B) : zone observée par la caméra 2 et analysée.

Sur l'ensemble des trois mois d'expérience, deux séries d'enregistrement vidéo ont été réalisées puis analysées (T (20) et T (40)). Chaque série d'enregistrement s'est déroulée pendant quatre jours consécutifs sur deux périodes distinctes de la journée : le matin, correspondant à la phase d'alimentation et l'après-midi, correspondant à la période sans distribution d'aliment. Sur chaque demi-journée d'enregistrement, une combinaison d'un bac enrichi et d'un bac non enrichi a été filmée. Au total, trois combinaisons tirées aléatoirement sans remise ont été analysées sur ces quatre jours.

Pour standardiser et enlever le biais induit par l'heure d'enregistrement, l'ordre de passage a été interverti dans les trois combinaisons entre le bac enrichi et celui non enrichi. Sur les deux premiers jours d'enregistrement, les bacs enrichis ont été filmés en première session d'enregistrement de chaque demi-journée ; puis sur les deux jours suivants, ces bacs ont été filmés durant la seconde session (Tableau 1A et 1B).

Tableau 1 : Planning d'enregistrement pour l'analyse de l'occupation de zones par les poissons
A. Planning à T (20) (AE : avec enrichissement ; SE : sans d'enrichissement)

	Matin		Après-midi	
	10h15-10h45	11h05-11h35	14h15-14h45	15h05-15h35
Jour 1	Ecotron 1 AE	Ecotron 3 SE	Ecotron 2 AE	Ecotron 2 SE
Jour 2	Pas d'enregistrement	Pas d'enregistrement	Ecotron 3 AE	Ecotron 1 SE
Jour 3	Ecotron 3 SE	Ecotron 1 AE	Ecotron 2 SE	Ecotron 2 AE
Jour 4	Pas d'enregistrement	Pas d'enregistrement	Ecotron 1 SE	Ecotron 3 AE

B. Planning à T (40) (AE : avec enrichissement ; SE : sans d'enrichissement)

Jour 1	Ecotron 2 AE	Ecotron 3 SE	Ecotron 3 AE	Ecotron 2 SE
Jour 2	Ecotron 1 AE	Ecotron 1 SE	Pas d'enregistrement	Pas d'enregistrement
Jour 3	Ecotron 3 SE	Ecotron 2 AE	Ecotron 2 SE	Ecotron 3 AE
Jour 4	Ecotron 1 SE	Ecotron 1 AE	Pas d'enregistrement	Pas d'enregistrement

Chaque enregistrement vidéo d'un bac a duré 30 minutes, pendant lesquelles le diffuseur d'air (dispositif d'oxygénation) a été arrêté pour lisser la surface de l'eau et faciliter le comptage des poissons dans chaque zone. Sur chaque demi-journée, un total d'une heure d'enregistrement a été analysé. Pour synchroniser le début des enregistrements sur les deux caméras, un clap de début observable simultanément par le champ de vision des deux caméras a été effectué. Sur chaque vidéo, un arrêt sur image a été effectué toutes les 1,5 minutes pour comptabiliser le nombre de poissons par zone, et obtenir suffisamment de points de mesure pour le traitement statistique ultérieur (soit 20 arrêts sur image analysés par vidéo au total).

Par ailleurs, sur les cinq secondes précédant et succédant l'arrêt sur image défini pour comptabiliser le nombre de poissons, plusieurs arrêts sur image rapides ont été effectués afin de visualiser le mouvement et la position des poissons et d'être plus à même d'identifier correctement les espèces. Enfin, les 20 arrêts sur image ont été visionnés à plusieurs reprises pour s'assurer de comptabiliser le bon nombre de poissons par zone.

II.3.b) Etude zootechnique

Dix variables zootechniques ont été étudiées : le pourcentage de survie par espèce, le poids individuel par espèce, l'hétérogénéité de poids par espèce, le taux de croissance spécifique par espèce, l'indice de condition moyen par espèce (Indice de Fulton à l'échelle de l'individu), la taille par espèce, l'hétérogénéité de taille par espèce, le gain de biomasse piscicole cumulé et par espèce, et l'indice de conversion globale (Tableaux 2 et 3).

Tableau 2 : Variables zootechniques pour chaque espèce

Pourcentage de survie (S) (%)	$S(n) = (N(n)/N(0)) \times 100$	Avec N(n) et N(0), les nombres de poissons de l'espèce à T(n) et à T(0) respectivement
Poids (P) (g)	$P(n) = \sum P_n(n) / n_{tot}(n)$	Avec P _n (n), le poids d'un poisson (g) à T(n) et n _{tot} (n), le nombre total de poissons à T(n)
Hétérogénéité de poids (HP) (%)	$HP(n) = (\text{Ecart type de } P(n) \times 100) / P(n)$	Avec P(n), le poids moyen (g) à T(n)
Taux de croissance spécifique (TCS) (%/jour)	$TCS(n) = [(\ln P(n) - \ln P(0)) / T] \times 100$	Avec P(n), le poids moyen (g) à T(n) et P(0), le poids moyen (g) à T(0) et T, la durée de l'expérimentation (jour)

Indice de condition moyen (ICM)	$ICM(n) = (P(n) / L(n)^3) \times 100$	Avec P(n), le poids moyen (g) à T(n) et L(n), sa longueur totale moyenne (cm) à T(n)
Gain de biomasse piscicole (GB) (%)	$GB(n) = ((B(n) - B(0)) \times 100) / B(0)$	Avec, B(n), la biomasse totale (g) à T(n) et B(0), la biomasse totale (g) à T(0) ($B(n) = \sum Pn(n) (g)$)
Taille (L) (cm)	$L(n) = \sum Ln(n) / n \text{ tot}(n)$	Avec Ln(n), la taille d'un poisson (cm) à T(n) et n tot(n), le nombre total de poissons à T(n)
Hétérogénéité de taille (HT) (%)	$HT(n) = (\text{Ecart type de } L(n) \times 100) / L(n)$	Avec L(n), la longueur totale moyenne (cm) à T(n)

Les deux autres variables étudiées ont été calculées à l'échelle de l'unité expérimentale (Tableau 3) :

Tableau 3 : Variables zootechniques à l'échelle de l'unité expérimentale

Gain cumulé de biomasse piscicole (GCB) (%)	$GCB(n) = ((Bc(n) - Bc(0)) \times 100) / Bc(0)$	Avec Bc(n), la biomasse totale cumulée (g) à T(n) et Bc(0), la biomasse totale (g) à T(0)
Indice de conversion alimentaire global (IC)	$IC(n) = TF / (Bc(n) - Bc(0))$	Avec TF, le total d'apport d'aliment (g) sur la durée de l'expérience, Bc(n), la biomasse totale cumulée (g) à T(n) et Bc(0), la biomasse totale (g) à T(0)

Après l'allotement, ces paramètres ont été calculés tous les 15 jours jusqu'à la fin de l'expérience. Pour cette étude, quatre points de mesure de croissance ont été analysés : à T (0), T (15), T (32) et T (46). Vingt individus² par espèce et par unité expérimentale ont été utilisés pour calculer l'évolution des paramètres de croissance. Pour limiter le stress des poissons, une légère anesthésie a été faite avant chaque manipulation.

Par la suite, les données ont été stockées dans un tableur Excel puis traitées statistiquement par ordinateur.

² Etant donné que tous les poissons (sandres et esturgeons) ont été pesés et mesurés lors de l'allotement (T (0)), un échantillonnage de 20 poissons a donc été réalisé sur ce jeu de données pour avoir le même nombre de poissons échantillonnés que les autres points de suivi de croissance (T (15), T (32), T (46)). Au total, trois échantillonnages aléatoires ont été fait afin d'analyser statistiquement l'effet échantillon (résultats obtenus en annexe X).

II.4) Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel RStudio version 3.5.1. Pour traiter les données comportementales et zootechniques obtenues lors de la phase expérimentale, des analyses de variance ont été effectuées. La démarche utilisée est présentée ci-dessous.

La normalité des résidus a été obtenue à l'aide du test de Shapiro-Wilk (<50 valeurs), ou à l'aide du test de Kolmogorov-Smirnov (>50 valeurs). Pour l'homogénéité des variances, le test de Bartlett a été appliqué.

Si l'une ou l'ensemble deux conditions n'était pas respectée (p -value < 0,05), les variables ont été transformées pour obtenir la normalité des résidus et l'homogénéité des variances. Dans cette étude, six transformations ont permis de normaliser les résidus et d'homogénéiser les variances : $\text{Log}()$, $()^2$, $()^3$, $\text{Sin}()$, $\text{Cos}()$, $\text{Sqrt}()$.

Dans le cas où les deux conditions étaient respectées (p -value > 0,05), un test Akaike information criterion (AIC) a été réalisé pour étudier les effets aléatoires et les intégrer au modèle linéaire si nécessaire (Effet écovron pour les données zootechniques et effets écovron, période, session d'enregistrement, temps pour les données comportementales). Trois R-packages ont été utilisés pour étudier les effets aléatoires (lme4, lmerTest, MnMIn).

A la suite de cette étape, un test d'analyse de variance au moyen de la fonction *Anova()* a été fait pour déterminer si la variable explicative avait un effet ou non sur la variable à expliquer. Si la significativité était validée (p -value < 0,05), un test de Tuckey (R-packages multcomp) a été utilisé pour comparer les moyennes entre elles et déterminer quelle modalité influençait le plus la variable à expliquer.

Par ailleurs, dans le cas où aucune des transformations appliquées n'a réussi à normaliser les résidus et/ou à homogénéiser les variances (p -value < 0,05), un test non paramétrique de Kruskal-Wallis a été utilisé. Lorsque la significativité était validée (p -value < 0,05), un test de comparaison de moyenne (R-packages pgirmess) a été effectué avec la fonction *kruskalmc()*.

L'ensemble des démarches réalisées pour chaque variable étudiée est résumé dans l'Annexe IV.

III. Résultats

III.1) Influence de l'enrichissement sur l'occupation des zones 1 et 2 par les sandres et les esturgeons

Pour faciliter la compréhension, l'emploi des termes « zone 1 et zone 2 » correspondra respectivement ici aux 54% de la zone 1 analysés dans cette expérience et aux 46% de la zone 2 analysés dans cette expérience.

III.1.a) Cas des sandres (Annexes VI et VII)

Sur les 54 % de la **zone 1** analysés, respectivement 10 et 9 sandres ont été en moyenne observés dans les bacs avec et sans enrichissement. Le matin (phase d'alimentation) et l'après-midi, les sandres étaient plus présents en moyenne dans cette zone dans les bacs avec enrichissement que sans enrichissement : 10 et 11 sandres dans les bacs avec enrichissement respectivement le matin et l'après-midi, et 8 et 10 sandres dans les bacs sans enrichissement respectivement le matin et l'après-midi.

Sur les 46 % de la **zone 2** analysés, respectivement 1 et 3 sandres ont été en moyenne observés dans les bacs avec et sans enrichissement. Contrairement en zone 1, le matin (phase d'alimentation) et l'après-midi, les sandres étaient plus présents en moyenne dans cette zone dans les bacs sans enrichissement qu'avec enrichissement : 2 et 3 sandres dans les bacs sans enrichissement respectivement le matin et l'après-midi, et 1 et aucun sandre dans les bacs avec enrichissement respectivement le matin et l'après-midi.

Au total, sur l'ensemble de la surface observée (zones 1 et 2 confondus), 11 sandres ont été observés en moyenne dans les bacs avec enrichissement et 12 dans les bacs sans enrichissement, soit 26% et 29% du total de sandres des bacs. En termes de densité, 5 sandres/m² étaient donc présents en moyenne dans la zone globale observée que ce soit dans les bacs avec ou sans enrichissement.

Après l'analyse statistique du jeu de données (Annexe V), l'effet de l'enrichissement sur l'occupation des zones 1 et 2 par les sandres s'est révélé significatif (p-value < 0,05). En zone 1, le nombre moyen de sandre était significativement supérieur (p-value < 0,05) dans les bacs avec enrichissement que sans enrichissement et ce peu importe la période (matin ou après-midi) (Figure 8A). En zone 2, constat inverse, le nombre moyen de sandre était significativement supérieur (p-value < 0,05) dans les bacs sans enrichissement qu'avec enrichissement et ce peu importe la période (matin ou après-midi) (Figure 8B).

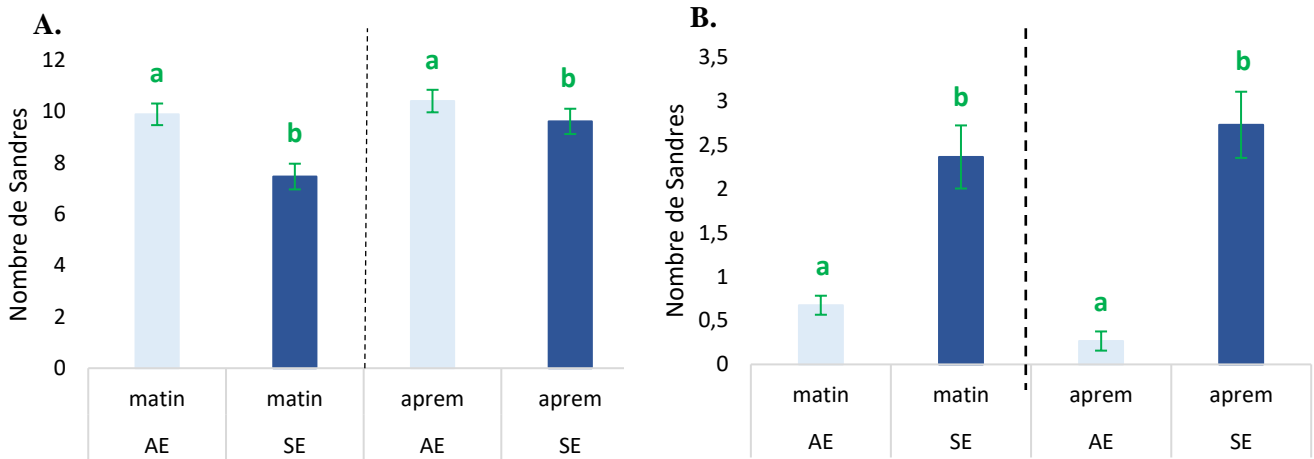


Figure 8 : Nombre de sandres en zone 1 et en zone 2 en fonction de la période de la journée

A : Nombre de sandres en zone 1 avec ou sans enrichissement en fonction de la période : Valeur moyenne du nombre de sandres avec intervalle de confiance (5%). Deux lettres différentes indiquent une différence significative (p -value<0,05).

B : Nombre de sandres en zone 2 avec ou sans enrichissement en fonction de la période : Valeur moyenne du nombre de sandres avec intervalle de confiance (5%). Deux lettres différentes indiquent une différence significative (p -value<0,05).

AE : avec enrichissement ; SE : sans enrichissement ; Période : matin ou aprem (après-midi) ; Période : matin ou après-midi (aprem)

III.1.b) Cas des esturgeons (Annexes VIII et IX)

Sur les 54 % de la **zone 1** analysés, respectivement 2 et 4 esturgeons ont été en moyenne observés dans les bacs avec et sans enrichissement. Le matin (phase d'alimentation) et l'après-midi, les esturgeons étaient plus présents en moyenne dans cette zone dans les bacs sans enrichissement qu'avec enrichissement : 5 et 4 esturgeons dans les bacs sans enrichissement respectivement le matin et l'après-midi, et 3 et 2 esturgeons dans les bacs avec enrichissement respectivement le matin et l'après-midi.

Sur les 46 % de la **zone 2** analysés, 5 esturgeons ont été en moyenne observés dans les bacs avec et sans enrichissement. Contrairement en zone 1, les esturgeons étaient plus présents en moyenne dans cette zone le matin dans les bacs avec enrichissement que sans enrichissement (4 esturgeons dans les bacs avec enrichissement et 3 esturgeons dans les bacs sans enrichissement). En revanche, l'après-midi, les esturgeons étaient avec en moyenne plus présents dans cette zone dans les bacs sans enrichissement qu'avec enrichissement (7 esturgeons dans les bacs sans enrichissement et 5 esturgeons dans les bacs avec enrichissement).

Au total, sur l'ensemble de la surface observée (zones 1 et 2 confondus), 7 esturgeons ont été observés en moyenne dans les bacs avec enrichissement et 9 dans les bacs sans enrichissement, soit 26% et 33% du total d'esturgeons des bacs. En termes de densité, 3 et 4 esturgeons/m² étaient donc présents en moyenne dans la zone globale observée respectivement dans les bacs avec et sans enrichissement.

Après l'analyse statistique du jeu de données (Annexe V), l'effet de l'enrichissement sur l'occupation des zones 1 et 2 par les esturgeons s'est révélé significatif (p -value $< 0,05$). En zone 1, le nombre moyen d'esturgeons était significativement supérieur (p -value $< 0,05$) dans les bacs sans enrichissement qu'avec enrichissement et ce peu importe la période (matin ou après-midi) (Figure 9A). En zone 2, même constat, le nombre moyen d'esturgeon était significativement supérieur (p -value $< 0,05$) dans les bacs sans enrichissement qu'avec enrichissement toute période confondue. Cependant, en prenant en compte que la période matin, aucune différence significative du nombre moyen d'esturgeon en zone 2 n'a été obtenue dans les bacs avec ou sans enrichissement (Figure 9B).

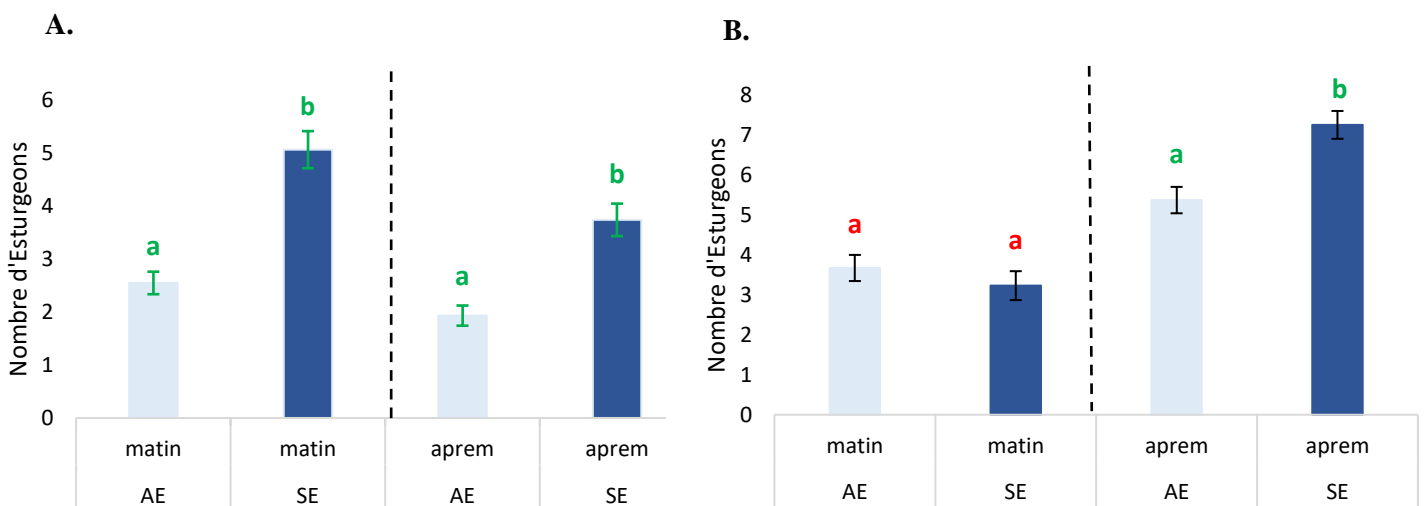


Figure 9 : Nombre d'esturgeons en zone 1 et en zone 2 en fonction de la période de la journée

A : Nombre d'esturgeons en zone 1 avec ou sans enrichissement en fonction de la période : Valeur moyenne du nombre d'esturgeons avec intervalle de confiance (5%). Deux lettres différentes indiquent une différence significative (p -value $< 0,05$).

B : Nombre d'esturgeons en zone 2 avec ou sans enrichissement en fonction de la période : Valeur moyenne du nombre d'esturgeons avec intervalle de confiance (5%). Deux lettres différentes indiquent une différence significative (p -value $< 0,05$).

III.2) Influence de l'enrichissement sur les paramètres zootechniques des sandres et les esturgeons

III.2.a) Cas des sandres

A la fin des 46 jours d'expérience, dans les bacs **avec enrichissement**, les sandres ont pris en moyenne 111,4 g et 3,9 cm. Un gain de biomasse de 59,3 % a été obtenu en moyenne, ce qui équivaut à un taux de croissance spécifique moyen de 1,2 %/j sur la période d'étude. Enfin, quel que soit le temps (T (15), T (32) et T (46) confondus), les hétérogénéités de poids et de taille sont restées relativement constantes avec respectivement 25,7 % \pm 1,9 et 7,4 % \pm 0,2.

Pour les bacs **sans enrichissement**, les sandres ont pris en moyenne 106,5 g et 3,6 cm. Un gain de biomasse de 55,7 % a été obtenu en moyenne, qui équivaut à un taux de croissance spécifique moyen de 1,2 %/j sur la période d'étude. Enfin, quel que soit le temps (T(15), T (32)

et T (46) confondus), les hétérogénéités de poids et de taille sont restées relativement constantes avec respectivement 27,7 % +/- 1,8 et 8,1 % +/- 0,6.

Aucune différence n'a été obtenue sur le taux de survie et l'indice de condition moyen des sandres avec ou sans enrichissement des bacs (100% de survie et 0,8 d'indice de condition) (Tableau 4).

Tableau 4 : Valeurs moyennes des paramètres zootechniques de T(15) à T(46) pour les sandres

(Variables étudiées : **S** : Taux de survie ; **P** : Poids moyen ; **HP** : Hétérogénéité de poids ; **TCS** : Taux de croissance spécifique moyen ; **ICM** : Indice de condition moyen ; **GB** : Gain de biomasse ; **L** : longueur ; **HT** : Hétérogénéité de taille)

	Sandre	S (%)	P(g)	HP (%)	TCS (%/j)	ICM	GB (%)	L(cm)	HT (%)
T15	AE	100	172,1	27,7	1,0	0,8	10,4	28,3	7,7
	SE	100	172,4	27,0	0,9	0,8	9,6	28,3	7,9
T32	AE	100	227,9	23,8	1,3	0,8	39,4	30,3	7,3
	SE	100	212,0	26,4	1,1	0,8	28,6	29,7	7,7
T46	AE	100	260,4	25,6	1,2	0,8	59,3	31,5	7,3
	SE	100	256,7	29,8	1,2	0,8	55,7	31,4	8,7

Après analyse statistique du jeu de données à T (15), à T (32) et à T (46), l'effet de l'enrichissement sur les 8 variables étudiées par espèce ne s'est pas révélé significatif sur aucune des variables (Annexe XI). Ci-dessous sont présentés les graphiques montrant l'évolution du taux de survie, du gain de biomasse et de l'hétérogénéité de poids (Figure 10A, 10B et 10c). Les graphiques montrant l'évolution des cinq autres variables sont présentés en annexe (Annexe XII).

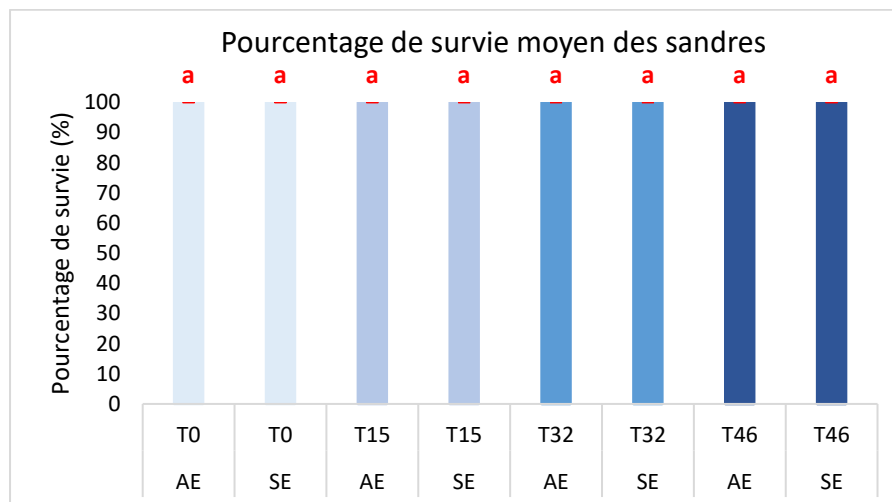


Figure 10A : Evolution du taux de survie de T (0) à T (46) pour les sandres avec enrichissement (AE) ou sans enrichissement (SE)

(Deux lettres différentes indiquent une différence significative par analyse de variance (p-value<0,05) ; IC, $\alpha=0.05$)

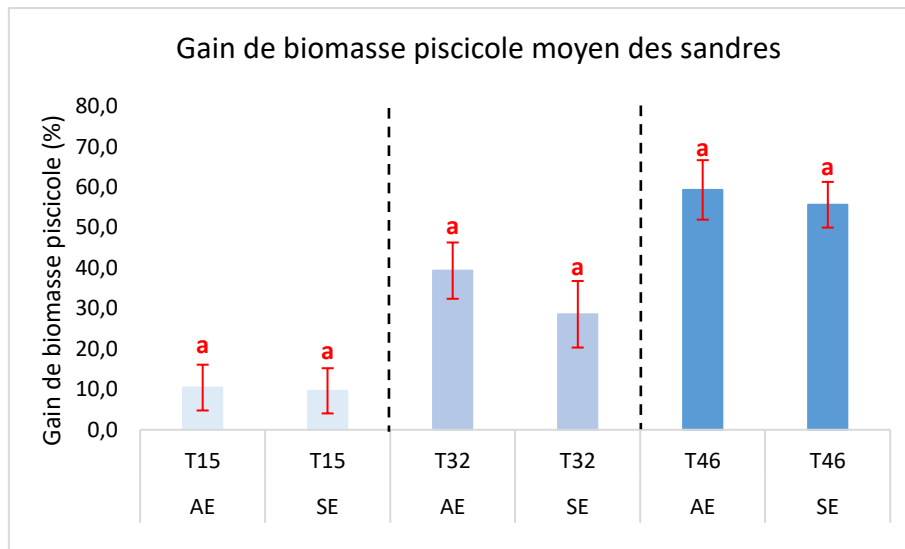


Figure 10B : Evolution du gain de biomasse de T (0) à T (46) pour les sables avec enrichissement (AE) ou sans enrichissement (SE)

(Deux lettres différentes indiquent une différence significative par analyse de variance (p-value<0,05) ; IC, $\alpha=0.05$)

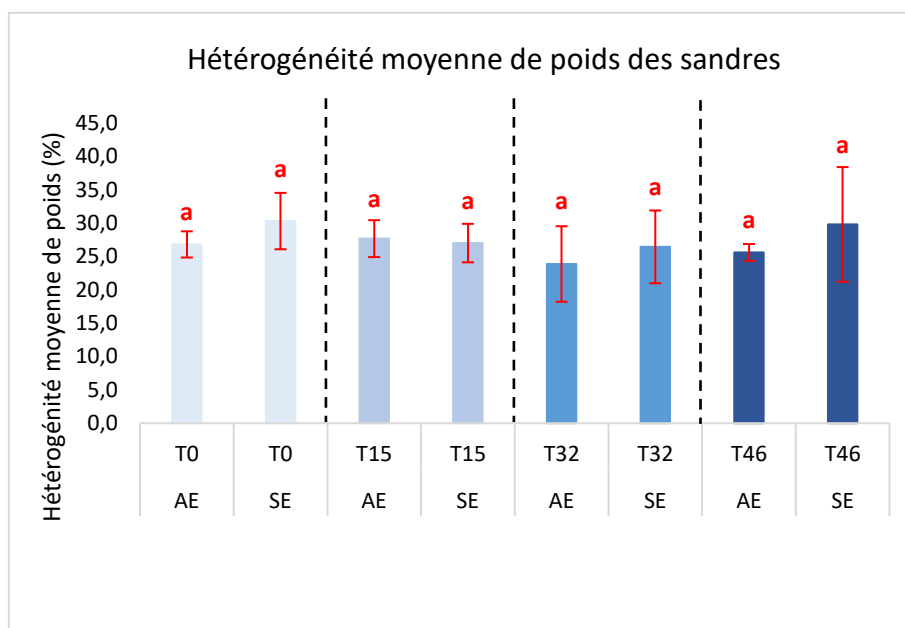


Figure 10C : Evolution de l'hétérogénéité de poids de T (0) à T (46) pour les sables avec enrichissement (AE) ou sans enrichissement (SE)

(Deux lettres différentes indiquent une différence significative par analyse de variance (p-value<0,05) ; IC, $\alpha=0.05$)

III.2.b) Cas des esturgeons

Sur les 46 jours d'expérience, dans les bacs avec enrichissement, les esturgeons ont pris en moyenne 104,1 g et 5,2 cm. Un taux de survie de 98,7% a été obtenu en moyenne ainsi qu'un gain de biomasse moyen de 77,1%, qui équivaut à un taux de croissance spécifique moyen de 1,2 %/j sur la période d'étude. Enfin, quel que soit le temps (T (15), T (32) et T (46) confondus), les hétérogénéités de poids et de taille sont restées relativement constantes avec respectivement 16,2 % +/- 0,7 et 5,3 % +/- 1,2.

Pour les bacs sans enrichissement, les esturgeons ont pris en moyenne 98 g et de 5,1 cm. Un taux de survie de 96% a été obtenu en moyenne ainsi qu'un gain de biomasse moyen de 72,5%, qui équivaut à un taux de croissance spécifique moyen de 1,2 %/j sur la période d'étude. Enfin, quel que soit le temps (T (15), T (32) et T (46) confondus), les hétérogénéités de poids et de taille sont restées relativement constantes avec respectivement 15 % +/- 1,3 et 5,2 % +/- 0,8.

Aucune différence n'a été obtenue sur l'indice de condition moyen des esturgeons avec ou sans enrichissement des bacs (1,1%/j de taux de croissance spécifique moyen et 0,4 d'indice de condition) (Tableau 5).

Tableau 5 : Valeurs moyennes des paramètres zootechniques de T(15) à T(46) pour les esturgeons
(Variables étudiées : **S** : Taux de survie ; **P** : Poids moyen ; **HP** : Hétérogénéité de poids ; **TCS** : Taux de croissance spécifique moyen ; **ICM** : Indice de condition moyen ; **GB** : Gain de biomasse ; **L** : longueur ; **HT** : Hétérogénéité de taille)

	Esturgeon	S (%)	P(g)	HP (%)	TCS (%/j)	ICM	GB (%)	L(cm)	HT (%)
T15	AE	98,7	157,6	16,0	1,0	0,4	16,3	34,3	4,7
	SE	100,0	157,9	15,9	1,0	0,4	16,8	34,1	6,1
T32	AE	98,7	198,4	15,6	1,2	0,4	46,4	36,2	6,6
	SE	97,3	201,1	13,5	1,2	0,4	48,8	36,6	4,9
T46	AE	98,7	239,8	17,0	1,2	0,4	77,1	38,3	4,4
	SE	96,0	233,2	15,6	1,2	0,4	72,5	38,1	4,7

Après analyse statistique du jeu de données à T (15), à T (32) et à T (46), l'effet de l'enrichissement sur les 8 variables étudiées par espèce ne s'est révélé significatif que sur l'hétérogénéité moyenne de taille à T (32). Toutefois, étant donné la valeur de la p-value du test de Kruskal-Wallis proche de 5% ($p = 0,046$) et le fait que les intervalles de confiance se recoupent, l'effet de l'enrichissement sur l'hétérogénéité de taille à T (32) ne sera pas considéré comme significatif. Ainsi, aucun effet de l'enrichissement sur les 8 variables étudiées par espèce n'a été observé (Annexe XI). Ci-dessous sont présentés les graphiques montrant l'évolution du taux de survie, du gain de biomasse et de l'hétérogénéité de poids (Figure 11A, 11B et 11c). Les graphiques montrant l'évolution des cinq autres variables sont présentés en annexe (Annexe XIII).

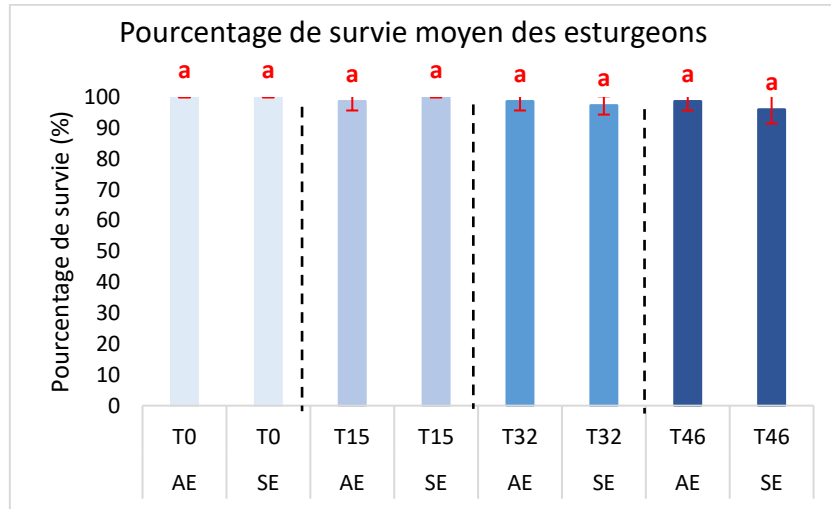


Figure 11A : Evolution du taux de survie de T (0) à T (46) pour les esturgeons avec enrichissement (AE) ou sans enrichissement (SE)

(Deux lettres différentes indiquent une différence significative par analyse de variance (p-value<0,05) ; IC, $\alpha=0.05$)

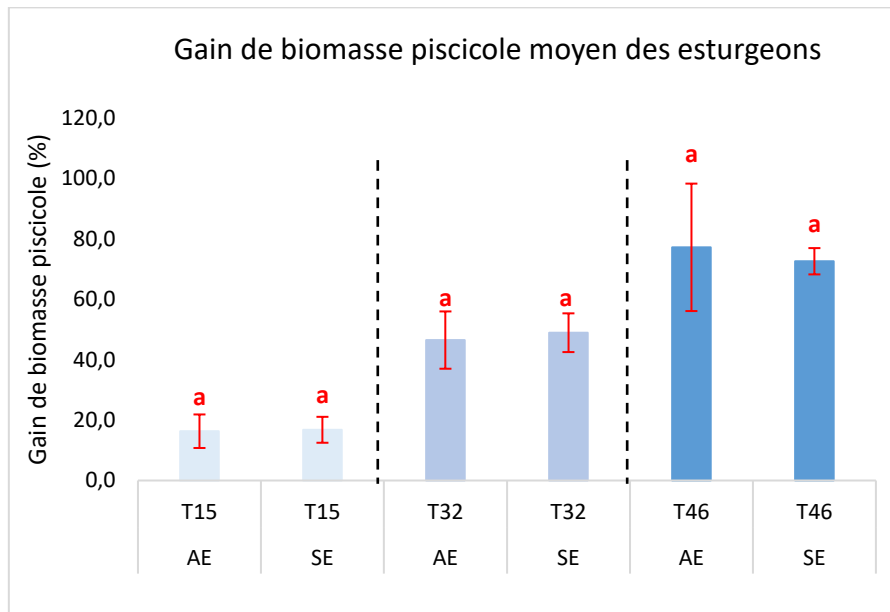


Figure 11B : Evolution du gain de biomasse de T (0) à T (46) pour les esturgeons avec enrichissement (AE) ou sans enrichissement (SE)

(Deux lettres différentes indiquent une différence significative par analyse de variance (p-value<0,05) ; IC, $\alpha=0.05$)

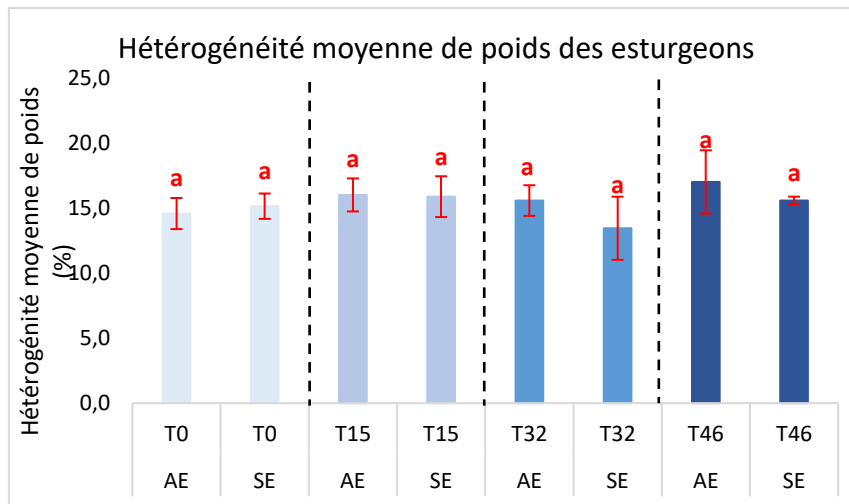


Figure 11C : Evolution de l'hétérogénéité de poids de T (0) à T (46) pour les esturgeons avec enrichissement (AE) ou sans enrichissement (SE)

(Deux lettres différentes indiquent une différence significative par analyse de variance (p-value<0,05) ; IC, $\alpha=0.05$)

III.2.c) Cas mixte : sandres et esturgeons

Sur les 46 jours d'expérience, le gain cumulé moyen de biomasse a été de 56,2 % dans les bacs avec enrichissement et de 52,6 % dans les bacs sans enrichissement. Une légère différence a été obtenue sur l'indice de conversion alimentaire moyen avec un IC de 1,5 pour les bacs avec enrichissement et de 1,6 pour les bacs sans enrichissement (Tableau 6).

Tableau 6 : Valeurs moyennes des paramètres zootechniques de T(15) à T(46) pour les sandres et les esturgeons

(Variables étudiées : **GCB** : Gain cumulé de biomasse ; **IC** : Indice de conversion alimentaire)

	Esturgeon + Sandre	GCB (%)	IC
T15	AE	9,6	2,5
	SE	10,4	2,3
T32	AE	34,5	1,6
	SE	28,6	1,9
T46	AE	56,2	1,5
	SE	52,6	1,6

Après analyse statistique du jeu de données de façon globale à T (15), à T (32) et à T (46), l'effet de l'enrichissement sur les deux variables étudiées ne s'est pas révélé significatif (p-value >0,05) (Annexe XI). Les deux graphiques montrant l'évolution des deux variables sont présentés ci-dessous (Figure 12A et 12B).

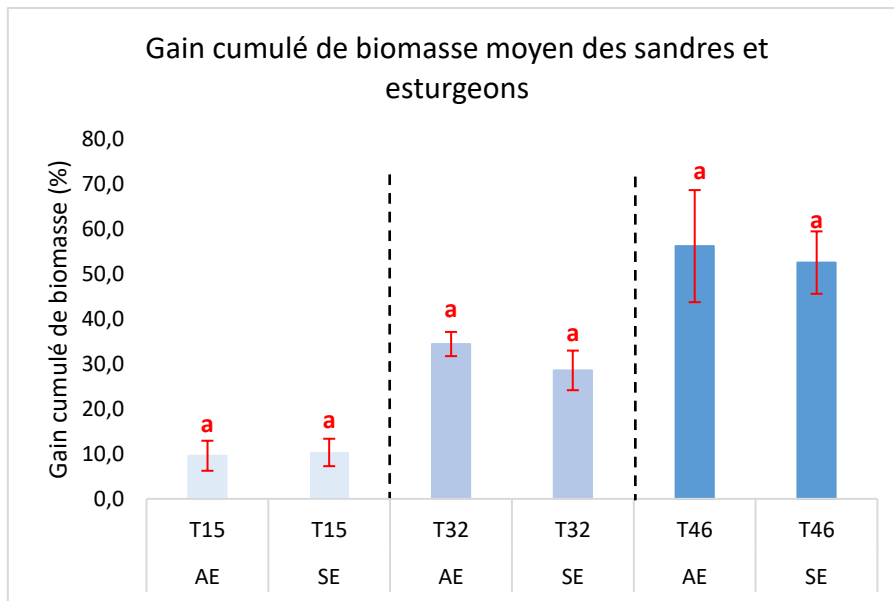


Figure 12A : Evolution du gain cumulé de biomasse de T (15) à T (46) pour les sandres et les esturgeons avec enrichissement (AE) ou sans enrichissement (SE)

(Deux lettres différentes indiquent une différence significative par analyse de variance (p-value<0,05) ; IC, $\alpha=0.05$)

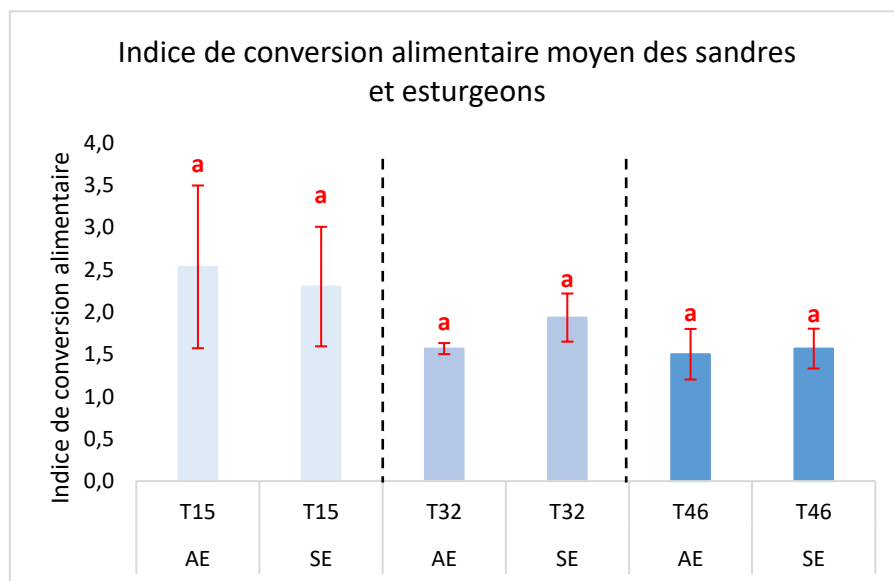


Figure 12B : Evolution de l'indice de conversion alimentaire de T (15) à T (46) pour les sandres et les esturgeons avec enrichissement (AE) ou sans enrichissement (SE)

(Deux lettres différentes indiquent une différence significative par analyse de variance (p-value<0,05) ; IC, $\alpha=0.05$)

Discussion et perspectives

On a pu montrer un effet de l'enrichissement sur la répartition spatiale des deux espèces. D'après les résultats obtenus, les sandres préfèrent les habitats soumis à de faibles intensités lumineuses. Comparativement aux bacs non enrichis, les sandres des bacs avec enrichissement étaient pratiquement absents de la zone 2 (intensité lumineuse de 20 lux) et plus présents en zone 1, zone ombragée avec une intensité lumineuse inférieure à 5 lux. Ces résultats concordent avec les résultats de Luchiari *et al.* (2006), qui ont également démontré la préférence des sandres juvéniles pour les environnements peu lumineux (1,2 lux). En milieu naturel, cette préférence s'explique par le fait que les sandres deviennent des prédateurs plus efficaces dans ces conditions. En effet, grâce à la présence d'une *tapetum lucidum* et de macro-récepteurs au niveau des yeux, les sandres possèdent une meilleure acuité visuelle que leurs proies en période de faible intensité lumineuse (spécialement au crépuscule et pendant la nuit) (Ali *et al.*, 1977 ; Luchiari *et al.*, 2006).

Aussi, on peut donc s'attendre à un meilleur gain de biomasse des sandres du fait d'un milieu plus propice à la prédation favorisant une meilleure prise d'aliment (dans notre cas les granulés).

Toutefois, cette modification de l'occupation de l'espace induite par l'enrichissement ne s'est pas traduite par une modification des performances de croissance des sandres ni des esturgeons. Ceci montre donc que l'enrichissement choisi dans ces conditions expérimentales n'aide pas à une amélioration significative des performances zootechniques du système.

Ces résultats sont en adéquation avec ceux obtenus par White *et al.* (2018). En effet, l'utilisation d'un occultant en haut du bac et de structures verticales rigides immergées n'a pas eu d'effet significatif sur le gain de biomasse, l'indice de conversion alimentaire et le taux de survie des juvéniles de truites fario (*S.tutta*), de saumons atlantique (*Salmo salar*) et chinook (*Oncorhynchus tshawytscha*). En revanche, Kientz et Barnes (2016) et Kientz *et al.* (2018) ont montré dans leur expérimentation que le même type d'enrichissement améliorait les performances de croissance (gain de biomasse et indice de conversion alimentaire) de truites arc-en-ciel (*O. mykiss*) juvéniles. Ces résultats divergents confortent les propos de Näslund et Johnsson (2016), qui stipulent que les effets de l'enrichissement sont dépendants des espèces, de leur stade physiologique, et du type d'enrichissement lui-même.

Concernant l'étude de l'occupation de l'espace, il est important de noter que moins d'un tiers de chacune des espèces a pu être observé dans les bacs avec et sans enrichissement ce qui limite les interprétations et les conclusions quant à l'effet réel de l'enrichissement sur la modification de l'occupation de l'espace par les deux espèces. Aussi, il serait important dans une prochaine analyse de pouvoir filmer la totalité du bac (ex : Grozea *et al.*, 2016) pour connaître la répartition spatiale exacte des deux espèces et confirmer l'effet de l'enrichissement sur l'occupation des deux zones par les sandres et les esturgeons. L'occupation verticale de l'espace pourrait également être pris en compte pour étoffer l'analyse et mieux comprendre

l'effet de l'enrichissement sur le comportement des poissons. Ainsi, l'utilisation de puces acoustiques implantées sur les poissons pourrait fournir des informations sur le positionnement exact dans la colonne d'eau des deux espèces (ex : Føre *et al.*, 2017).

Pour l'étude zootechnique, il serait également intéressant dans une prochaine étude de tester la préférence d'enrichissement des sandres et des esturgeons afin de déterminer le type d'enrichissement le plus adéquat pour améliorer les performances de croissance de l'élevage et ainsi augmenter la rentabilité de l'entreprise aquacole (ex : Rendon *et al.*, 2003). Une autre solution serait de prolonger l'expérience et de prendre en compte dans l'analyse statistique davantage de points de contrôle de croissance. En effet, la période de l'étude (46 jours) n'a pas été assez longue pour voir apparaître des différences dans les performances de croissance des bacs avec et sans enrichissement. A titre d'exemple, Brockmark *et al.* (2007) ont observé une amélioration de croissance des saumons atlantique qu'à partir du quatrième point de contrôle, 311 jours après l'ajout de structure dans les bacs.

Par ailleurs, afin de proposer des résultats directement exploitables par les pisciculteurs, il serait pertinent de se rapprocher des densités de poisson pratiquées en pisciculture pour tester l'effet de l'enrichissement. Ceci permettrait de statuer clairement si l'enrichissement utilisé dans cette expérience doit être considéré comme un levier ou non de l'amélioration de l'efficacité d'une production piscicole. Au 46^{ème} jour de l'expérience, 6900 g/m³ de poissons était en moyen présent dans les bacs avec et sans enrichissement. A titre indicatif, les données de la FAO (2019b) indiquent qu'en général pour des poissons de ce calibre (entre 200 et 250 g), une densité d'élevage oscillant entre 30 000 et 80 000 g/m³ de sandre est appliquée.

Enfin, pour continuer dans les améliorations possibles, une analyse physiologique pourrait être réalisée en complément des analyses comportementale et zootechnique pour tester l'effet de l'enrichissement sur le stress des poissons. Le dosage de la sérotonine, indicateur de stress social chronique (Backström et Winberg., 2017), pourrait s'avérer utile dans l'interprétation des résultats issus des deux autres analyses. En effet, les poissons soumis à un stress chronique peuvent inhiber certains de leurs comportements et voir leur croissance diminuer (Winberg *et al.*, 2016).

Ainsi, grâce à ces trois analyses (zootechnique, comportementale et physiologique), il sera possible de déterminer la meilleure solution qui maximiserait les performances de croissance des poissons tout en limitant leur stress.

Conclusion

Au bout de 46 jours d'expérience, l'analyse des données comportementale a pu montrer que l'utilisation d'un enrichissement modifiait la répartition spatiale des sandres et des esturgeons dans les bacs d'élevage. Cependant, aucun effet de l'enrichissement n'a été observé sur les performances de croissance ainsi que sur le taux de survie des deux espèces.

Aussi, malgré une modification du comportement des deux espèces, l'enrichissement physique utilisé ici n'a pas permis une meilleure croissance des sandres et des esturgeons.

On peut donc conclure que dans les conditions expérimentales utilisées, cet enrichissement ne constitue pas une solution intéressante à appliquer par les pisciculteurs pour améliorer les performances de croissance de leur système de production et les gains économiques finaux.

Cette étude étant la première à tester l'effet de l'enrichissement sur une polyculture exploitée en RAS, il serait donc utile de confirmer ces résultats par d'autres analyses qui pourraient intégrer d'autres paramètres d'étude comme le dosage de la sérotonine par exemple. Il serait également intéressant d'augmenter la durée de l'expérience, de faire varier la densité pour se rapprocher des conditions de production réelle voire d'utiliser d'autres types d'enrichissements physiques pour statuer sur l'intérêt ou non de l'enrichissement sur une polyculture de sandre et d'esturgeon du Danube en RAS.

Bibliographie

- Akbultut, B., Feledi, T., Lengyel, S., Ronyai, A., 2013. Effect of feeding rate on growth performance, food utilization and meat yield of starlet (*Acipenser ruthenus* Linné, 1758). *Journal of Fisheries Sciences [en ligne]*. Vol. 7, n°3, p. 216-224.
- Ali, M.A., Ryder, R.A., Anctil M., 1977. Photoreceptors and visual pigments as related to behavioral responses and preferred habitats of Perches (*Perca* spp.) and Pikeperches (*Stizostedion* spp.). *Journal of the Fisheries Research Board of Canada [en ligne]*. Vol. 34, p. 1475-1480.
- Baekelandt, S., Redivo, B., Mandiki, S.N.M., Bournonville, T., Houndji, A., Bernard, B., El Kertaoui, N., Schmitz, M., Fontaine, P., Gardeur, J.N., Ledoré, Y., Kestemon, P., 2018. Multifactorial analyses revealed optimal aquaculture modalities improving husbandry fitness without clear effect on stress and immune status of pikeperch *Sander lucioperca*. *General and Comparative Endocrinology [en ligne]*. Vol. 258, p. 194-204.
- Badiola, M., Mendiola, D., Bostock, J., 2012. Recirculating Aquaculture Systems (RAS) Analysis: Main Issues on Management and Future Challenges. *Aquacultural Engineering [en ligne]*. Vol. 5, p. 26-35. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.07.004>.
- Backström, T., Winberg, S., 2017. Serotonin coordinates responses to social stress—What we can learn from fish. *Frontiers in neuroscience [en ligne]*. Vol. 11, p. 595. <https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00595>
- Baki, B., Yücel, Ş., 2017. Feed Cost Production Income Analysis of Seabass (*Dicentrarchus Labrax*) Aquaculture. *In [en ligne]*. Vol.7, p. 859-64.
- Bayrami, A., Noverian, H.A., Sharif, E.A., 2017. Effects of background colour on growth indices and stress of young starlet (*Acipenser ruthenus*) in a closed circulated system. *Aquaculture Research [en ligne]*. Vol. 48, p. 2004-2011.
- Bergheim, A. *Aquacultural Engineering and Environment [en ligne]*. éd. 2007. Kerala, India : Research Signpost, 2007. 187 p. ISBN, 978-81-308-0199-5 [Consulté le 26 avril 2019].

- Blancheton, J., Bosc, P., Hussenot, J. M., Roque d'Orbcastel, E., Romain, R., 2009. Tendances pour la pisciculture européenne de demain : cages au large, systèmes en eau recirculée et systèmes intégrés. *Cahiers Agricultures [en ligne]*. Vol. 18, n°2, p. 227-34. <https://doi.org/10.1684/agr.2009.0294>.
- Blancheton, J., Piedrahita, R., Eding E. H., Bergheim, A., Fivelstad, S., 2007. Intensification of Landbased Aquaculture Production in Single Pass and Reuse Systems. *Aquacultural Engineering and Environment [en ligne]*. p. 21-47. ISBN, 978-81-308-0199-5.
- Blidariu, F., Grozea, A., 2011. Increasing the Economical Efficiency and Sustainability of Indoor Fish Farming by Means of Aquaponics - Review. *Scientific Papers Animal Science and Biotechnologies [en ligne]*. Vol. 44, n°2, p.1-8.
- Bocek, A., 2004. Introduction to polyculture of fish [en ligne]. <https://cals.arizona.edu/azaqua/AquacultureTIES/publications/English%20WHAP/GT5%20Polyculture.pdf>. (Consulté le 26/04/2019).
- Bregnballe, J. A Guide to Recirculation Aquaculture: An Introduction to the New Environmentally Friendly and Highly Productive Closed Fish Farming Systems [en ligne]. Copenhagen : Food and Agriculture Organization of the United Nations : Eurofish, 2015. 100 p. ISBN, 978-92-5-108776-3 [Consulté le 26 avril 2019].
- Brockmark, S., Neregård, L., Bohlin, T., Björnsson, B. T., & Johnsson, J. I., 2007. Effects of rearing density and structural complexity on the pre-and postrelease performance of Atlantic salmon. *Transactions of the American Fisheries Society [en ligne]*. p.136, n°5, p. 1453-1462.
- Commission Européenne., 2012. Facts and figures on the Common Fisheries policy: Basic statistical data [en ligne]. https://www.aipce-cep.org/wp-content/uploads/2017/04/Facts-and-figures-on-the-Common-Fisheries-Policy-2012_0.pdf (Consulté le 26/04/2019).
- Dalsgaard, J., Lund, I., Thorarinsdottir, R., Drengstig, As., Arvonen, K., Pedersen, P. B., 2013. Farming Different Species in RAS in Nordic Countries: Current Status and Future Perspectives. *Aquacultural Engineering [en ligne]*. Vol. 53, p. 2-13. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2012.11.008>.
- FAO., 2019. Global aquaculture Production 1950-2017 [en ligne]. <http://www.fao.org/fishery/statistics/global-aquaculture-production/query/en>. (Consulté le 26/04/2019).
- FAO., 2019b. Sander lucioperca (Linnaeus, 1758) - Cultured Aquatic Species Information Programme -[en ligne]. http://www.fao.org/fishery/culturedspecies/Sander_lucioperca/en. (Consulté le 26/04/2019).
- Fieszl, J., E. Bogacka-Kapusta, A. Kapusta, U. Szymańska, et A. Martyniak. 2011. Feeding Ecology of Sterlet Acipenser Ruthenus L. in the Hungarian Section of the Danube River. *Archives of Polish Fisheries [en ligne]*. Vol.19, n°2, p. 105-111. <https://doi.org/10.2478/v10086-011-0012-9>.
- Føre, M., Frank, K., Dempster, T., Alfredsen, J.A., Høy, E. 2017. Biomonitoring using tagged sentinel fish and acoustic telemetry in commercial salmon aquaculture: a feasibility study. *Aquacultural Engineering [en ligne]*. Vol. 78, p. 163-172.
- Grozea, A., Draşovean, A., Lalescu, D., Gál, D., Ciszter, L.T., Cristina, R.T. 2016. The Pikeperch (*Sander lucioperca*) Background Color First Choice in the Recirculating Aquaculture Systems. *Turkish journal of fisheries and aquatic sciences [en ligne]*. Vol. 16, n°4, p. 891-897.

- Hyvärinen, P., Rodewald, P., 2013. Enriched Rearing Improves Survival of Hatchery-Reared Atlantic Salmon Smolts during Migration in the River Tornionjoki. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences [en ligne]*. Vol.70, n°9, p. 1386-1395. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2013-0147>.
- Ifremer., 2009. Les systèmes en circuit recirculé: intérêt et cas d'utilisation [en ligne]. https://aquaculture.ifremer.fr/content/download/45906/file/IF_circuits_recircules09.pdf. (Consulté le 26/04/2019).
- Kientz, J. L., Barnes, M. E., 2016. Structural Complexity Improves the Rearing Performance of Rainbow Trout in Circular Tanks. *North American Journal of Aquaculture [en ligne]*. Vol. 78, n°3, p. 203-207. <https://doi.org/10.1080/15222055.2016.1159629>.
- Kientz, J. L., Crank, K. M., Barnes, M. E., 2018. Enrichment of Circular Tanks with Vertically Suspended Strings of Colored Balls Improves Rainbow Trout Rearing Performance. *North American Journal of Aquaculture [en ligne]*. Vol. 80, n°2: p. 162-167. <https://doi.org/10.1002/naaq.10017>.
- Kozłowski M., Zakêce Z., Szczepkowski M., Wunderlich K., Piotrowska I., Szczepkowska B., 2010. Impact of light intensity on the results of rearing juvenile pikeperch *Sander lucioperca* (L.), in recirculating aquaculture systems. *Arch. Pol. Fish [en ligne]*. Vol. 48, p. 77-84.
- Kozłowski, M., Szczepkowski, M., Wunderlich, K., Szczepkowska, B., Piotrowska, I., 2014. Polyculture of Juvenile Pikeperch (*Sander Lucioperca* (L.)) and Sterlet (*Acipenser Ruthenus* L.) in a Recirculating System. *Archives of Polish Fisheries [en ligne]*. Vol. 22, n°4, p. 6. <https://doi.org/10.2478/aopf-2014-0024>.
- Krebs, E., Barnes, M. E., Nero, P. A., 2016. Covering Rearing Tanks Improves Brown Trout Growth and Feed Conversion. *Agricultural Sciences [en ligne]*. Vol. 7, n°12, p. 869-78. <https://doi.org/10.4236/as.2016.712079>.
- Liu, H., Xu, L., Li, D., 2014. Detection and Recognition of Uneaten Fish Food Pellets in Aquaculture using Image Processing. *The International Society for Optical Engineering [en ligne]*. p. 2-8. DOI: 10.1117/12.2179138
- Luchiarri, A. C., F. A. De Moraes Freire, J. Koskela, et J. Pirhonen. 2006. Light Intensity Preference of Juvenile Pikeperch *Sander Lucioperca* (L.) ». *Aquaculture Research [en ligne]*. Vol. 37, n°15, p. 1572-1577. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2006.01599.x>.
- Martan, E., 2008. Polyculture of Fishes in Aquaponics and Recirculating Aquaculture. *Aquaponics Journal [en ligne]*. Vol. 48, n°1, p. 28-33.
- Martins, C, I, M., Eding, E, H., Verdegem, M, C, J., Heinsbroek, L.T.N., Schneider, O., Blancheton, J, P., Roque d'Orbcastel, E., Verreth, J, A. J., 2010. New Developments in Recirculating Aquaculture Systems in Europe: A Perspective on Environmental Sustainability. *Aquacultural Engineering [en ligne]*. Vol. 43, n°3, p. 83-93. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2010.09.002>.
- Mihailov, S, A., Mihoc, N, A., Lalescu, D., Grozea, A., 2017. Polyculture of the Pikeperch (*Sander Lucioperca*) Fingerlings into Recirculating Aquaculture System, with Sterlet (*Acipenser Ruthenus*) or European Catfish (*Silurus Glanis*) – a Preliminary Study. *Research Journal of Agricultural Science [en ligne]*. Vol.49, n°4, p. 6.

- Moine, J., Barnes, M. E., Kientz, J., Simpson, G., 2016. Flow Patterns in Circular Rearing Tanks Containing Vertical Structure. *Journal of Fisheries & Livestock Production [en ligne]*. Vol. 4, n°04, p1-4. <https://doi.org/10.4172/2332-2608.1000204>.
- Murray, F., Bostock, J., Fletcher, D. Review of Recirculation Aquaculture System Technologies and Their Commercial Application. Final report March 2014 : University of Stirling. 2014. 75 p. Disponible à l'adresse : <http://www.hie.co.uk/regional-information/economic-reports-and-research/archive/review-of-recirculation-aquaculture-systems-technologies.html>. [Consulté le 26/04/2019].
- Näslund, J., Johnsson, J., 2016. Environmental Enrichment for Fish in Captive Environments: Effects of Physical Structures and Substrates. *Fish and Fisheries [en ligne]*. Vol. 17, n°1, p. 1-30. <https://doi.org/10.1111/faf.12088>.
- Nielsen, R., Asche, F., Nielsen, M., 2016. Restructuring European Freshwater Aquaculture from Family-Owned to Large-Scale Firms - Lessons from Danish Aquaculture. *Aquaculture Research [en ligne]*. Vol, 47, n°12, p. 3852-3866. <https://doi.org/10.1111/are.12836>.
- Opuszyński, K., 1981. Comparison of the Usefulness of the Silver Carp and the Bighead Carp as Additional Fish in Carp Ponds. *Aquaculture [en ligne]*. Vol.25, n°2-3, p. 223-233. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(81\)90184-8](https://doi.org/10.1016/0044-8486(81)90184-8).
- Papoutsoglou, S, E., Petropoulos, G., Barbieri, R., 1992. Polyculture Rearing of *Cyprinus Carpio* (L.) and *Oreochromis Aureus* (St.) Using a Closed Circulated System. *Aquaculture [en ligne]*. Vol. 103, n°3-4, p. 311-320. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(92\)90174-J](https://doi.org/10.1016/0044-8486(92)90174-J).
- Prokeš, M., Baruš, V., Mareš, J., Meňáz, M., Baránek, V., 2011. Growth of Sterlet *Acipenser Ruthenus* under Experimental and Farm Conditions of the Czech Republic, with Remarks on Other Sturgeons. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis [en ligne]*. Vol. 59, n°6, p. 281-290. <https://doi.org/10.11118/actaun201159060281>.
- Rendon, P. M., Gallardo, J. M., Ceballos, E. G., Regadera, J. P., & García, J. E., 2003. Determination of substrate preferences of tench, *Tinca tinca* (L.), under controlled experimental conditions. *Journal of Applied Ichthyology [en ligne]*. Vol. 19, n°3, p.138-141.
- Remus, J., 1973. Inventaire des sites favorables à l'aquaculture : Côte Atlantique de Bordeaux à la Rochelle [en ligne]. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00020/13127/10142.pdf> (consulté le 26/04/2019).
- Sharma, K. R., Leung, P. S., Chen, H., Peterson, A., 1999. Economic efficiency and optimum stocking densities in fish polyculture: an application of data envelopment analysis (DEA) to Chinese fish farms. *Aquaculture [en ligne]*. Vol. 180, n°3-4, p. 207-221. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)00202-1](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00202-1)
- Sturrock, H., Newton, R., Paffrath, S., Bostock, J., Muir, J., Young, J., Immink, A., Dickson, M. Prospective Analysis of the Aquaculture Sector in the EU. Part 2: Characterisation of Emerging Aquaculture Systems [en ligne]. Luxembourg : Publications Office, 2008. 190 p. ISBN, 978-92-79-09442-2 [Consulté le 26 avril 2019].
- Van Rijn, J., 1996. The Potential for Integrated Biological Treatment Systems in Recirculating Fish Culture—A Review. *Aquaculture [en ligne]*. Vol. 139, n°3-4, p. 181-201. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(95\)01151-X](https://doi.org/10.1016/0044-8486(95)01151-X).

- Vehanen, T., Lahti, M., 2003. Movements and Habitat Use by Pikeperch (*Stizostedion Lucioperca* (L.)) in a Hydropeaking Reservoir. *Ecology of Freshwater Fish [en ligne]*. Vol. 12, n°3, p. 203-215. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0633.2003.00026.x>.
- Walker, L, M., Parker, T, M., Barnes, M, E., 2016. Full and Partial Overhead Tank Cover Improves Rainbow Trout Rearing Performance. *North American Journal of Aquaculture [en ligne]*. Vol. 78, n°1, p. 20-24. <https://doi.org/10.1080/15222055.2015.1090504>.
- White, S. C., Barnes, M.E., Krebs, E. Huysman, N., Voorhees, J, M., 2018. Addition of Vertical Enrichment Structures Does Not Improve Growth of Three Salmonid Species during Hatchery Rearing. *J Marine Biol Aquacult [en ligne]*. Vol. 4, n°1, p.48- 52. DOI: 10.15436/2381-0750.18.1957
- White, S, C., Krebs, E., Huysman, N., Voorhees, J, M., Barnes, M, E., 2019. Use of Suspended Plastic Conduit Arrays during Brown Trout and Rainbow Trout Rearing in Circular Tanks. *North American Journal of Aquaculture [en ligne]*. Vol. 81, n°1, p. 101-106. <https://doi.org/10.1002/naaq.10076>.
- Zakes, Z., 1999. Influence of water temperature on oxygen consumption and ammonia excretion of juvenile pikeperch, *Stizostedion lucioperca* (L.) reared in a recirculating system. *Aquaculture Research [en ligne]*. Vol. 30, n°2, p. 109-114. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2109.1999.00304.x>.
- Winberg, S., Höglund, E., Øverli, Ø. 2016. Variation in the neuroendocrine stress response. *Fish Physiol [en ligne]*. Vol. 35, p. 35–74. doi: 10.1016/B978-0-12-802728-8.00002-3

ANNEXES

Liste des annexes

Annexe I : Résultats des métaprogrammes EcoSerV INRA, Aquaspecies et ICTHYOSERV

Annexe II : Protocole de dosage des ions nitrites

Annexe III : Protocole de dosage des ions ammoniums

Annexe IV : Tests et transformations effectués sur les variables zootechniques et comportementales

Annexe V : Résultats des tests statistiques (analyse de variance et Kruskal-Wallis) sur l'occupation des zones 1 et 2 par les sandres et les esturgeons

Annexe VI : Occupation de la zone 1 par les sandres dans les bacs avec enrichissement (AE) et sans enrichissement (SE)

Annexe VII : Occupation de la zone 2 par les sandres dans les bacs avec enrichissement (AE) et sans enrichissement (SE)

Annexe VIII : Occupation de la zone 1 par les esturgeons dans les bacs avec enrichissement (AE) et sans enrichissement (SE)

Annexe IX : Occupation de la zone 2 par les esturgeons dans les bacs avec enrichissement (AE) et sans enrichissement (SE)

Annexe X : Résultats des analyses de variance sur les variables Poids et Taille à T(0) sur les échantillons 1, 2 et 3 pour les sandres et les esturgeons

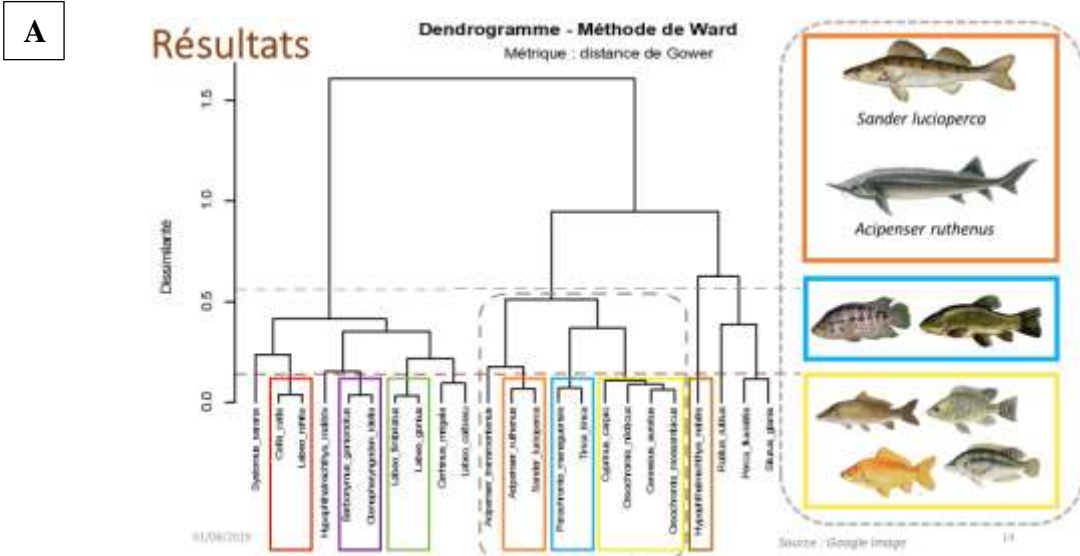
Annexe XI : Résultats des tests statistiques (analyse de variance et Kruskal-Wallis) sur les variables zootechniques de T(15) à T(46) pour les sandres et les esturgeons

Annexe XII : Evolution des paramètres zootechniques de T (0) à T (46) pour les sandres avec enrichissement (AE) ou sans enrichissement (SE)

Annexe XIII : Evolution des paramètres zootechniques de T (0) à T (46) pour les esturgeons avec enrichissement (AE) ou sans enrichissement (SE)

Annexe I : Résultats des métaprogrammes EcoSerV INRA, Aquaspecies et ICTHYOSERV (Pasquet *et al.*, en cours)

- A. Résultats Metaprogramme EcoSerV INRA, Aquaspecies (Source : Iris Lang)
- B. Résultats Metaprogramme ICTHYOSERV : analyse espèce par espèce (Source : UR AFPA)
- C. Résultats Metaprogramme ICTHYOSERV : Analyse en composantes principale (Source : UR AFPA)



B

RÉSULTATS – ESTURGEON

	WI (g)	WF (g)	CV (%)	SGR (%)	FCF	BG (%)	Survie (%)
Esturgeon	17,6 (4,6)	45 (18,6)	41	1,44	0,347 (0,050)	87	73
Est/Sandre	18,0 (4,5)	52(29,5)	57	1,63	0,376 (0,084)	120	76
Est/Tanche	18,1 (5,1)	59 (29,6)	43	2,06	0,390 (0,063)	200	91
Est/San/Tanche	17,9 (4,3)	61,8 (31,2)	50	1,90	0,385 (0,092)	178	81

Paramètres	F	p	S
WF	3,92	0,05	S
CV	5,89	0,005	S
SGR	3,87	0,05	S
FCF	5,83	0,02	S
BG	2,93	0,14	ns
Survie	1,01	0,4	ns

Causes de la mortalité :

- Pathologie (3 poissons)
- Saut hors du bac
- Compétition intraspécifique
- Taux de rationnement ?
- Qualité du lot ?

RÉSULTATS – SANDRE

	WI (g)	WF (g)	CV (%)	SGR (%)	FCF	BG (%)	Survie (%)
Sandre	58,1 (11,2)	99,5 (21,1)	21	0,83	0,756 (0,069)	71	100
San/Esturgeon	58,3 (10,3)	109 (25)	23	0,93	0,755 (0,049)	83	98
San/Tanche	57,5 (10,9)	107 (26,6)	25	0,96	0,764 (0,064)	86	100
San/Est/Tanche	59,6 (10,2)	115 (25,8)	22	1,01	0,751 (0,077)	93	100

Paramètres	F	p	S
WF	1,37	0,31	ns
CV	0,1	0,95	ns
SGR	1,31	0,33	ns
FCF	0,23	0,87	ns
BG	1,69	0,24	ns
Survie	1	0,44	ns

INTERPRÉTATION

Sandre

- Pas d'influence sur la survie
- Pas de différence statistique entre les modalités, mais il semble avoir une meilleure croissance avec une ou deux autres espèces que seul

Tanche

- Pas d'influence sur la survie
- Croissance et indice de condition sont moins bons en présence de l'esturgeon ; peut être interprété comme une compétition pour la ressource alimentaire
- En règle générale, contrairement au Sandre, la tanche se porte mieux quand elle est seule

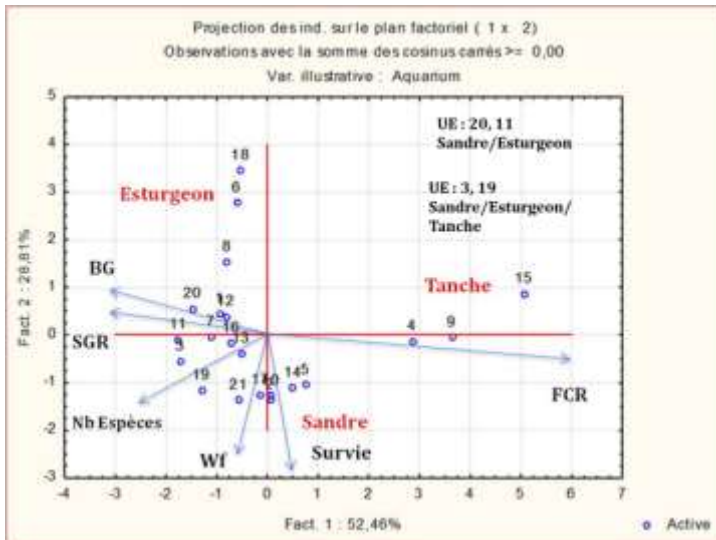
Esturgeon

- Le taux de survie est plus faible que pour les autres espèces
- Il a une meilleure croissance et un meilleur indice de condition en présence d'une autre espèce. Ce qui pourrait être en faveur d'une compétition intra spécifique très forte pour la nourriture lorsqu'il est seul.
- C'est avec la tanche qu'il a ses meilleures performances ce qui confirmerait une compétition avec cette dernière

Paramètres	F	p	S
WF	1,48	0,25	ns
CV	2,06	0,18	ns
SGR	3,24	0,08	ns
FCF	4,53	0,04	S
BG	1,62	0,26	ns
Survie	0,94	0,47	ns

TE<E, ES, STE

C



INTERPRETATION

De l'ACP, on peut déduire que :

- ➔ Les trois espèces sont clairement **séparées par leurs performances**
 - La tanche est l'espèce qui présente **le moins bon taux de croissance et le moins bon indice de conversion alimentaire**
 - L'esturgeon et le sandre **se séparent par leur taux de survie et le poids moyen final**
- ➔ Les associations d'espèces (Sandre/Esturgeon et Sandre/tanche/Esturgeon) sont celles qui présentent **les meilleurs taux croissance, la meilleure biomasse finale avec un bon taux de conversion alimentaire**

Ces résultats couplés avec ceux obtenus lors de l'analyse espèce par espèce, indiquent que les meilleures combinaisons sont :
- SANDRE/ESTURGEON
- SANDRE/TANCHE/ESTURGEON

Annexe II : Protocole de dosage des ions nitrites (Source : UR AFPA)

Principe

L'analyse consiste en une méthode colorimétrique à la sulfanilamide. La diazotation de la sulfanilamide en milieu acide et sa copulation avec la N-1 naphtyléthylènediamine donne un complexe coloré pourpre susceptible d'un dosage colorimétrique.

Domaines d'application

Analyse de la qualité d'eaux douces ou marines, prélevées dans des structures d'élevage ou dans le milieu naturel. L'eau destinée à l'analyse doit être limpide, si nécessaire, effectuer un traitement par suspension d'hydroxyde d'aluminium.

Références

RODIER J., 1984. L'analyse de l'eau (eaux naturelles, eaux résiduelles, eau de mer). Dunod. p 168, 1365 p.

Norme AFNOR : T 90-013.

Durée / Contraintes de temps

L'analyse de 10 échantillons d'eau réclame 30 minutes.

La préparation des réactifs demande 1 heure.

Hygiène et sécurité

→ Nettoyage du matériel :

Nettoyer les béchers à l'eau chaude puis distillée et les ranger.

Passer deux fois de l'eau distillée dans le circuit du spectrophotomètre en fin de lecture.

→ Référence fiches toxicologiques :

Acide chlorhydrique :

http://www.ineris.fr/index.php?module=doc&action=getDoc&id_doc_object=1893

Sulfanilamide :

<http://www.merck-chemicals.com/documents/sds/emd/fra/fr/1117/111799.pdf>

Dichlorohydrate N-1 naphtyléthylènediamine :

<http://www.alfa.com/content/msds/canadian/A17164.pdf>

Nitrite de sodium :

[http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/intranetobject-accesparreference/FT%20169/\\$file/ft169.pdf](http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/intranetobject-accesparreference/FT%20169/$file/ft169.pdf)

→ Élimination des déchets :

Après passage au spectrophotomètre, les échantillons doivent être jetés dans les bidons jaunes qui sont ensuite collectés par la société ONYX EST pour retraitement.

Matériel et produits nécessaires

Matériels :

→ Un spectrophotomètre à la longueur d'onde de 543 nm, pour la lecture des échantillons colorés.

→ Béchers en verre de 100 mL

→ Burette graduée de 100 mL.

→ Fiole en verre de 1 litre

→ Balance de précision (d=0.001g)

Produits nécessaires à la préparation des réactifs :

→ Sulfanilamide : Acide chlorhydrique, sulfanilamide

→ Dihydrochloride : Dichlorohydrate N-1 naphtyléthylènediamine

→ Solution mère étalon : nitrite de sodium.

Réactifs chimiques et biochimiques

Pour 1 litre de réactifs chimiques :

→Sulfanilamide :

Dissoudre 10 g de sulfanilamide dans de l'acide chlorhydrique dilué à 10% (qsp 1 litre)

→Dihydrochloride :

Solution de dichlorohydrate N-1 naphthyléthylènediamine à 0,1% (1g/L)

→Solution mère étalon d'azote nitreux :

Dissoudre 0,4928 g de nitrite de sodium dans de l'eau distillée

Amener le volume à 1 litre dans une fiole jaugée.

Conserver ces solutions dans un flacon en verre brun à l'obscurité.

Mode opératoire :

→Prélever 50 mL de l'échantillon à analyser à l'aide d'une burette graduée.

→Verser dans un bécher de 100 mL.

→Ajouter 1 mL de Sulfanilamide et 1 mL de Dihydrochloride. La quantité de réactif est ajustée directement avec le système de dosage des flacons.

→Attendre 15 minutes avant de passer les échantillons au spectrophotomètre.

L'échantillon doit se colorer en rose pâle. Si la coloration vire trop au rouge foncé, il faudra diluer l'échantillon de départ jusqu'à obtenir une coloration rose pâle (ne pas oublier de reconvertir le résultat affiché sur le spectrophotomètre). La coloration est stable 2 heures.

Expression des résultats

Pour un échantillon de 50 mL d'eau, le spectrophotomètre donne une teneur en azote nitreux exprimée en mg/L. Pour obtenir les nitrites, multiplier le résultat par 3,28.

Annexe III : Protocole de dosage des ions ammoniums (Source : UR AFPA)

Principe

L'analyse consiste en une méthode colorimétrique au bleu d'indophénol.

En milieu alcalin ($10,4 < \text{pH} < 11,5$) et en présence de nitroprussiate qui agit comme un catalyseur, les ions ammonium traités par une solution de chlore et de phénol donnent du bleu d'indophénol susceptible d'un dosage colorimétrique.

Domaines d'application

Analyse d'eaux douces ou marines, prélevées dans des structures d'élevage de poissons ou dans le milieu naturel.

En présence d'eaux troubles ou colorées, la méthode n'est pas utilisable sauf si trouble et couleur sont supprimés par dilution.

Références

RODIER J., 1984. L'analyse de l'eau (eaux naturelles, eaux résiduelles, eau de mer). Dunod. p 150, 1365 p.

Norme AFNOR : NF T 90-015.

Durée / Contraintes de temps

La préparation des réactifs demande 4 heures.

Pour doser l'ammonium dans 10 échantillons d'eau, la méthode nécessite :

→ 10 min pour la préparation des échantillons.

→ et au moins 6 heures d'attente (échantillons placés à l'abri de la lumière) avant la lecture au spectrophotomètre.

Hygiène et sécurité

→ Nettoyage du matériel :

Nettoyer les béchers à l'eau chaude puis distillée et les ranger.

Passer deux fois de l'eau distillée dans le circuit du spectrophotomètre en fin de lecture.

→ Référence fiches toxicologiques :

Hydroxyde de sodium :

[http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/intranetobject-accesparreference/FT%2020/\\$file/ft20.pdf](http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/intranetobject-accesparreference/FT%2020/$file/ft20.pdf)

Citrate trisodique :

<http://www.merck-chemicals.com/documents/sds/emd/fra/fr/1064/106448.pdf>

Acide dichlorocyanurique :

http://www.hach-lange.it/shop/action_q/download%3Bmsds/msds_document/fr%252F2893000%252Epdf/lkz/GB/spkz/en/TOKEN/81WT5uQYNsx5jvH_bJSoYchhEWY/M/eoU4Pw

Phénol :

[http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/intranetobject-accesparreference/FT%2015/\\$file/ft15.pdf](http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/intranetobject-accesparreference/FT%2015/$file/ft15.pdf)

Nitroprussiate de sodium :

<http://www.merck-chemicals.com/documents/sds/emd/fra/fr/1065/106541.pdf>

Chlorure d'ammonium :

http://msds.chem.ox.ac.uk/AM/ammonium_chloride.html

→Élimination des déchets :

Après passage au spectrophotomètre, les échantillons doivent être jetés dans les bidons rouges qui sont ensuite collectés par la société ONYX EST pour retraitement.

Matériels et produits nécessaires

Matériels :

→Un spectrophotomètre à la longueur d'onde de 630 nm, pour effectuer la lecture des échantillons colorés.

→Béchers, burette graduée de 100 mL.

Produits nécessaires pour la préparation des réactifs :

→Solution chlorée :

Hydroxyde de sodium, citrate trisodique, acide dichlorocyanurique

→Solution de phénol et de nitroprussiate :

Phénol, nitroprussiate de sodium

→Solution mère étalon :

Chlorure d'ammonium

Réactifs chimiques et biochimiques

→Solution chlorée :

Dissoudre 20 g d'hydroxyde de sodium en pastilles et 380 g de citrate trisodique ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7, 2\text{H}_2\text{O}$) dans 800 mL d'eau fraîchement distillée.

Porter cette solution à ébullition, maintenir celle-ci pendant 20 min.

Après refroidissement, ajouter 4 g d'acide dichlorocyanurique ($\text{C}_3\text{HCl}_2\text{N}_3\text{O}_3$) et ajuster le volume à 1 litre en fiole jaugée.

Conserver cette solution au réfrigérateur.

→Solution de phénol et de nitroprussiate :

Dissoudre dans de l'eau fraîchement distillée 35 g de phénol et 0,4 g de nitroprussiate de sodium ($\text{Na}_2\text{Fe}(\text{CN})_5\text{NO}, 2\text{H}_2\text{O}$) et amener le volume à 1 litre en fiole jaugée.

Conserver cette solution dans un flacon en verre brun au réfrigérateur.

→ Solution mère étalon :

Dissoudre dans de l'eau fraîchement distillée 297 g de chlorure d'ammonium et amener le volume à 1 litre en fiole jaugée.

Mode opératoire

→Prélever 20 mL de l'échantillon à analyser à l'aide d'une burette graduée.

→Verser dans un bécher de 50 mL.

→Ajouter 1 mL de solution de phénol et de nitroprussiate et 1 mL de solution chlorée. La quantité de réactif est ajustée directement avec le système de dosage des flacons.

→Placer les échantillons au minimum 6 heures à l'obscurité avant de passer les échantillons au spectrophotomètre.

L'échantillon doit se colorer en bleu pâle. Si la coloration vire trop au bleu, il faudra diluer l'échantillon de départ jusqu'à obtenir une coloration bleue pâle (ne pas oublier de reconvertir le résultat affiché sur le spectrophotomètre).

Expression des résultats

Pour un échantillon de 20 mL d'eau, le spectrophotomètre donne une teneur en ions ammonium exprimée en mg/L.

Annexe IV : Tests et transformations effectués sur les variables zootechniques et comportementales

Espèce	Paramètres	Test de normalité et d'homogénéité des variance	Transformation	Normalité des résidus et Homogénéité des variances	Effet aléatoire	Modèle linéaire	Test non paramétrique	Analyse de variance	comparaison de moyenne
Sandre	Poids (échantillon 1 T (0))	Kolmogorov-Smirnov ; Bartlett	Log	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandre	Taille (échantillon 1 T (0))	Kolmogorov-Smirnov ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandre	Poids (échantillon 2 T (0))	Kolmogorov-Smirnov ; Bartlett	Log	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandre	Taille (échantillon 2 T (0))	Kolmogorov-Smirnov ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandre	Poids (échantillon 3 T (0))	Kolmogorov-Smirnov ; Bartlett	Log	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandre	Taille (échantillon 3 T (0))	Kolmogorov-Smirnov ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandre	Poids (T (15))	Kolmogorov-Smirnov ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Oui	Lmer ()	/	Anova ()	/
Sandre	Taille (T (15))	Kolmogorov-Smirnov ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandre	Poids (T (32))	Kolmogorov-Smirnov ; Bartlett	Log	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandre	Taille (T (32))	Kolmogorov-Smirnov ; Bartlett	Log	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandre	Poids (T (46))	Kolmogorov-Smirnov ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Oui	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandre	Taille (T (46))	Kolmogorov-Smirnov ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandre	Poids moyen	Shapiro ; Bartlett	Cos	Oui, Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/

Sandr e	Hétérogénéité moyenne de poids	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Oui	Lmer ()	/	Anova ()	/
Sandr e	Taux de croissance spécifique	Shapiro ; Bartlett	χ^2	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandr e	Gain de biomasse	Shapiro ; Bartlett	Sin	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	Tukey
Sandr e	Taille moyenne	Shapiro ; Bartlett	Sin	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandr e	Hétérogénéité moyenne de taille	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandr e	Poids moyen T (15)	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandr e	Hétérogénéité moyenne de poids T (15)	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandr e	Taux de croissance spécifique T (15)	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandr e	Gain de biomasse T (15)	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandr e	Taille moyenne T (15)	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandr e	Hétérogénéité moyenne de taille T (15)	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandr e	Poids moyen T (32)	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandr e	Hétérogénéité moyenne de poids T (32)	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandr e	Taux de croissance spécifique T (32)	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/

Sandre	Gain de biomasse T (32)	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandre	Taille moyenne T (32)	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandre	Hétérogénéité moyenne de taille T (32)	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandre	Poids moyen T (46)	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandre	Hétérogénéité moyenne de poids T (46)	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandre	Taux de croissance spécifique T (46)	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandre	Gain de biomasse T (46)	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandre	Taille moyenne T (46)	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandre	Hétérogénéité moyenne de taille T (46)	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Esturgeon	Poids (échantillon 1 T (0))	Kolmogorov-Smirnov ; Bartlett	Log	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Esturgeon	Taille (échantillon 1 T (0))	Kolmogorov-Smirnov ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Esturgeon	Poids (échantillon 2 T (0))	Kolmogorov-Smirnov ; Bartlett	Log	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Esturgeon	Taille (échantillon 2 T (0))	Kolmogorov-Smirnov ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Esturgeon	Poids (échantillon 3 T (0))	Kolmogorov-Smirnov ; Bartlett	Log	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/

Estur geon	Taille (échantillon 3 T (0))	Kolmogorov- Smirnov ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Estur geon	Poids (T (15))	Kolmogorov- Smirnov ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Oui	Lmer ()	/	Anova ()	/
Estur geon	Taille (T (15))	Kolmogorov- Smirnov ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Estur geon	Poids (T (32))	Kolmogorov- Smirnov ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Oui	Lmer ()	/	Anova ()	/
Estur geon	Taille (T (32))	Kolmogorov- Smirnov ; Bartlett	χ^2	Oui ; Oui	Oui	Lmer ()	/	Anova ()	/
Estur geon	Poids (T (46))	Kolmogorov- Smirnov ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Oui	Lmer ()	/	Anova ()	/
Estur geon	Taille (T (46))	Kolmogorov- Smirnov ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Estur geon	Poids moyen	Shapiro ; Bartlett	Cos	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Estur geon	Hétérogénéité moyenne de poids	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Estur geon	Taux de survie	Shapiro ; Bartlett	Aucune ne fonctionne	Non ; Oui	Non	/	Kruskal- Wallis	/	/
Estur geon	Gain de biomasse	Shapiro ; Bartlett	Aucune ne fonctionne	Non ; Oui	Non	/	Kruskal- Wallis	/	/
Estur geon	Taille moyenne	Shapiro ; Bartlett	Cos	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Estur geon	Hétérogénéité moyenne de taille	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Estur geon	Poids moyen T (15)	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Estur geon	Hétérogénéité moyenne de poids T (15)	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/

Esturgeon	Taux de survie T (15)	Shapiro ; Bartlett	Aucune ne fonctionne	Oui ; Non	Non	/	Kruskal-Wallis	/	/
Esturgeon	Gain de biomasse T (15)	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Esturgeon	Taille moyenne T (15)	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Esturgeon	Hétérogénéité moyenne de taille T (15)	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Esturgeon	Poids moyen T (32)	Shapiro ; Bartlett	Cos	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Esturgeon	Hétérogénéité moyenne de poids T (32)	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Esturgeon	Taux de survie T (32)	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Esturgeon	Gain de biomasse T (32)	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Esturgeon	Taille moyenne T (32)	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Esturgeon	Hétérogénéité moyenne de taille T (32)	Shapiro ; Bartlett	Aucune ne fonctionne	Oui ; Non	Non	/	Kruskal-Wallis	/	Kruskalmc ()
Esturgeon	Poids moyen T (46)	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Esturgeon	Hétérogénéité moyenne de poids T (46)	Shapiro ; Bartlett	Sin	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Esturgeon	Taux de survie T (46)	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Esturgeon	Gain de biomasse T (46)	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/

Esturgeon	Taille moyenne T (46)	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Esturgeon	Hétérogénéité moyenne de taille T (46)	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandre + Esturgeon	Gain cumulé de biomasse	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Oui	Lmer ()	/	Anova ()	/
Sandre + Esturgeon	Indice de conversion	Shapiro ; Bartlett	Cos	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandre + Esturgeon T(15)	Gain cumulé de biomasse	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandre + Esturgeon T(15)	Indice de conversion	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandre + Esturgeon T(32)	Gain cumulé de biomasse	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandre + Esturgeon T(32)	Indice de conversion	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandre + Esturgeon T(46)	Gain cumulé de biomasse	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandre + Esturgeon T(46)	Indice de conversion	Shapiro ; Bartlett	/	Oui ; Oui	Non	Lm ()	/	Anova ()	/
Sandre	Nombre poisson Zone 1	Kolmogorov-Smirnov ; Bartlett	Aucune ne fonctionne	Oui ; Non	Oui	/	Kruskal-Wallis	/	Kruskalmc ()

Sandre	Nombre poisson Zone 2	Kolmogorov-Smirnov ; Bartlett	Aucune ne fonctionne	Non ; Non	Oui	/	Kruskal-Wallis	/	Kruskalmc ()
Sandre (matin)	Nombre poisson Zone 1	Kolmogorov-Smirnov ; Bartlett	Aucune ne fonctionne	Oui ; Non	Oui	/	Kruskal-Wallis	/	Kruskalmc ()
Sandre (matin)	Nombre poisson Zone 2	Kolmogorov-Smirnov ; Bartlett	Aucune ne fonctionne	Non ; Non	Oui	/	Kruskal-Wallis	/	Kruskalmc ()
Sandre (aprem)	Nombre poisson Zone 1	Kolmogorov-Smirnov ; Bartlett	Sqrt	Oui ; Oui	Oui	Lmer ()	/	Anova ()	Tukey ()
Sandre (aprem)	Nombre poisson Zone 2	Kolmogorov-Smirnov ; Bartlett	Aucune ne fonctionne	Non ; Non	Oui	/	Kruskal-Wallis	/	Kruskalmc ()
Esturgeon	Nombre poisson Zone 1	Kolmogorov-Smirnov ; Bartlett	Aucune ne fonctionne	Non ; Oui	Oui	/	Kruskal-Wallis	/	Kruskalmc ()
Esturgeon	Nombre poisson Zone 2	Kolmogorov-Smirnov ; Bartlett	Aucune ne fonctionne	Non ; Oui	Oui	/	Kruskal-Wallis	/	Kruskalmc ()
Esturgeon (matin)	Nombre poisson Zone 1	Kolmogorov-Smirnov ; Bartlett	Aucune ne fonctionne	Non ; Oui	Oui	/	Kruskal-Wallis	/	Kruskalmc ()
Esturgeon (matin)	Nombre poisson Zone 2	Kolmogorov-Smirnov ; Bartlett	Aucune ne fonctionne	Non ; Oui	Oui	/	Kruskal-Wallis	/	/
Esturgeon (aprem)	Nombre poisson Zone 1	Kolmogorov-Smirnov ; Bartlett	Aucune ne fonctionne	Non ; Oui	Oui	/	Kruskal-Wallis	/	Kruskalmc ()
Esturgeon (aprem)	Nombre poisson Zone 2	Kolmogorov-Smirnov ; Bartlett	Aucune ne fonctionne	Oui ; Non	Oui	/	Kruskal-Wallis	/	Kruskalmc ()

Annexe V : Résultats des tests statistiques (analyse de variance et Kruskal-Wallis) sur l'occupation des zones 1 et 2 par les sandres et les esturgeons (AE : avec enrichissement ; SE : sans enrichissement)

(F : F-value (analyse de variance); * : l'étoile indique que le test utilisé est un test de Kruskal-Wallis ; P : P-value ; S : Significativité (S : significative ; NS : Non significative))

Sandre : Global				
Paramètres	Kruskal-Wallis chi-squared	P	S	
Nombre zone 1*	25.86	3.671e-07	S	AE>SE
Nombre zone 2*	117.11	2.2e-16	S	SE>AE

Esturgeon : Global				
Paramètres	F ou Kruskal-Wallis chi-squared (*)	P	S	
Nombre zone 1*	92.242	2.2e-16	S	SE>AE
Nombre zone 2*	8.7569	0.003084	S	SE>AE

Sandre : matin				
Paramètres	Kruskal-Wallis chi-squared	P	S	
Nombre zone 1*	29.232	6.42e-08	S	AE>SE
Nombre zone 2*	25.715	3.957e-07	S	SE>AE

Esturgeon : matin				
Paramètres	Kruskal-Wallis chi-squared	P	S	
Nombre zone 1*	48.917	2.67e-12	S	SE>AE
Nombre zone 2*	0.97286	0.324	NS	

Sandre : aprem				
Paramètres	F ou Kruskal-Wallis chi-squared (*)	P	S	
Nombre zone 1	6.4934	0.01267	S	AE>SE
Nombre zone 2*	100.07	2.2e-16	S	SE>AE

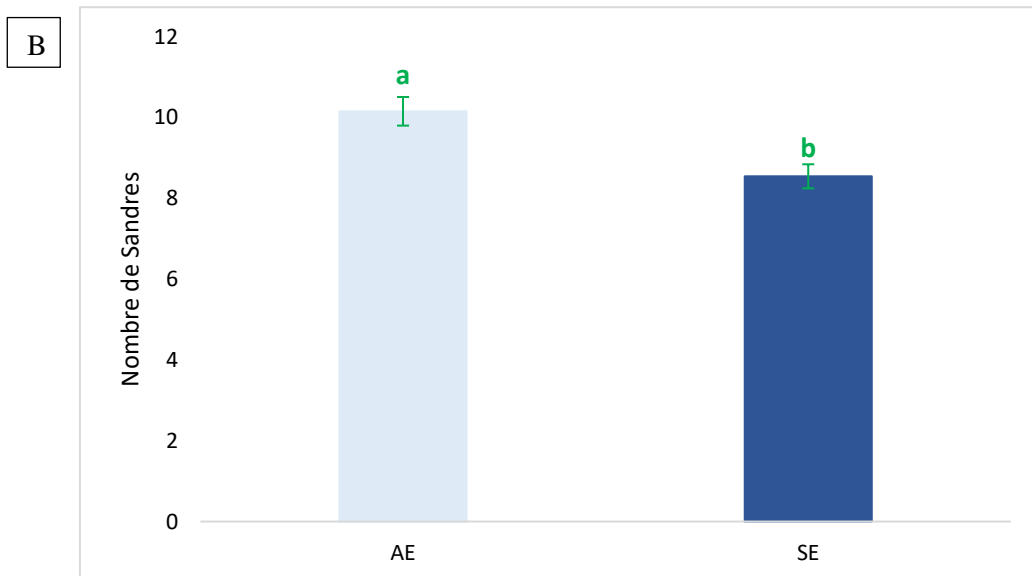
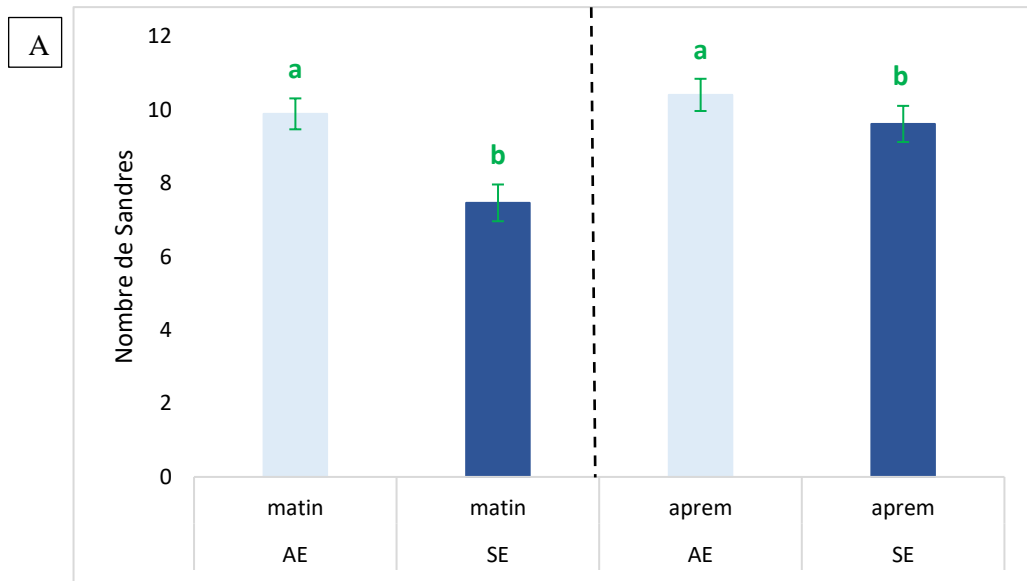
Esturgeon : aprem				
Paramètres	Kruskal-Wallis chi-squared	P	S	
Nombre zone 1*	46.135	1.104e-11	S	SE>AE
Nombre zone 2*	35.263	2.881e-09	S	SE>AE

Annexe VI : Occupation de la zone 1 par les sandres dans les bacs avec enrichissement (AE) et sans enrichissement (SE)

A. Nombre de sandres en zone 1 avec ou sans enrichissement en fonction de la période (matin ou après-midi (aprem))

B. Nombre de sandres en zone 1 avec ou sans enrichissement dans la journée

(Deux lettres différentes indiquent une différence significative par analyse de variance (p -value $<0,05$) ; IC, $\alpha=0,05$)

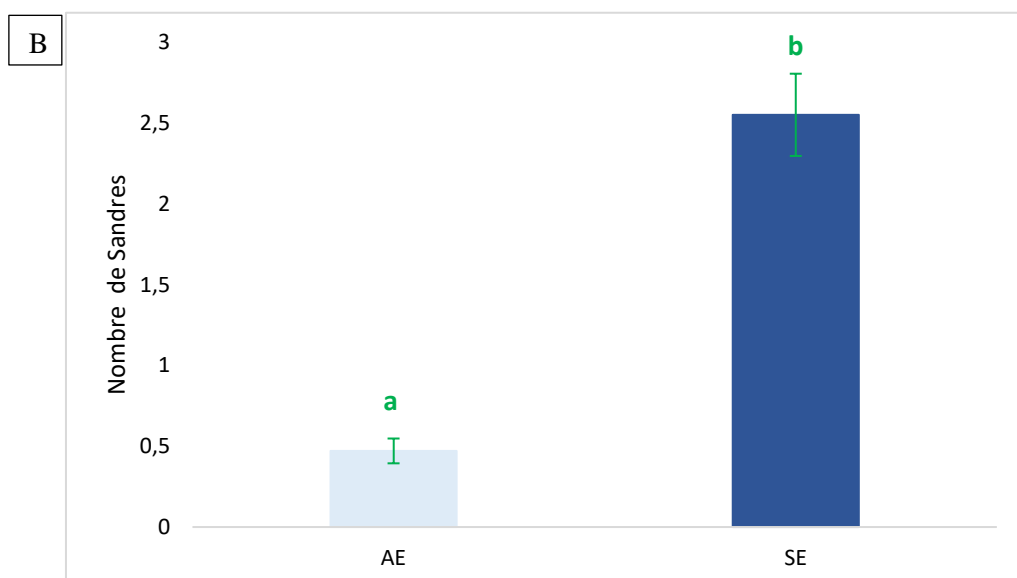
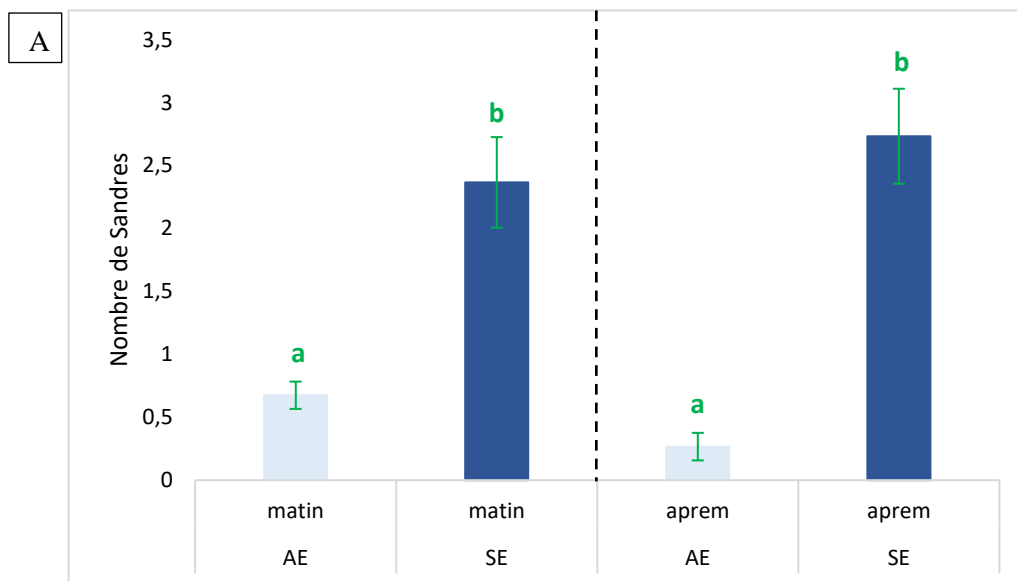


Annexe VII : Occupation de la zone 2 par les sandres dans les bacs avec enrichissement (AE) et sans enrichissement (SE)

A. Nombre de sandres en zone 2 avec ou sans enrichissement en fonction de la période (matin ou après-midi (aprem))

B. Nombre de sandres en zone 2 avec ou sans enrichissement dans la journée

(Deux lettres différentes indiquent une différence significative par analyse de variance (p-value<0,05) ; IC, $\alpha=0.05$)

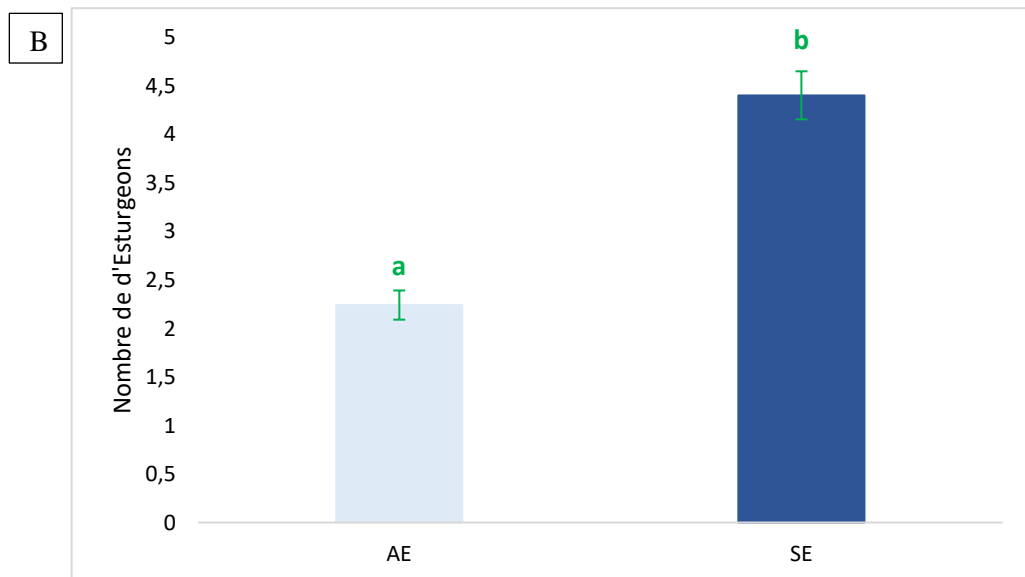
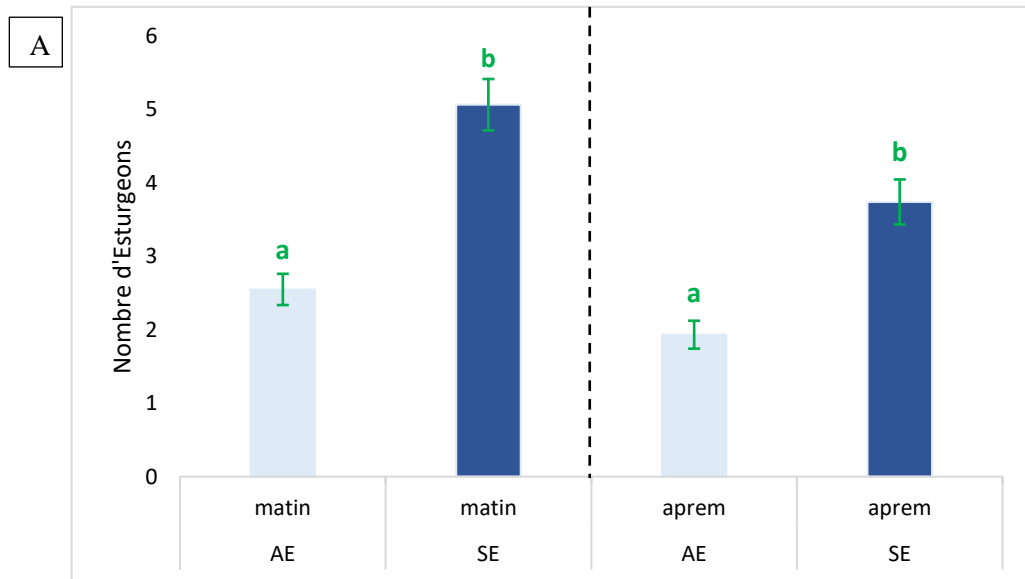


Annexe VIII : Occupation de la zone 1 par les esturgeons dans les bacs avec enrichissement (AE) et sans enrichissement (SE)

A. Nombre d'esturgeons en zone 1 avec ou sans enrichissement en fonction de la période (matin ou après-midi (aprem))

B. Nombre d'esturgeons en zone 1 avec ou sans enrichissement dans la journée

(Deux lettres différentes indiquent une différence significative par analyse de variance (p-value<0,05) ; IC, $\alpha=0.05$)

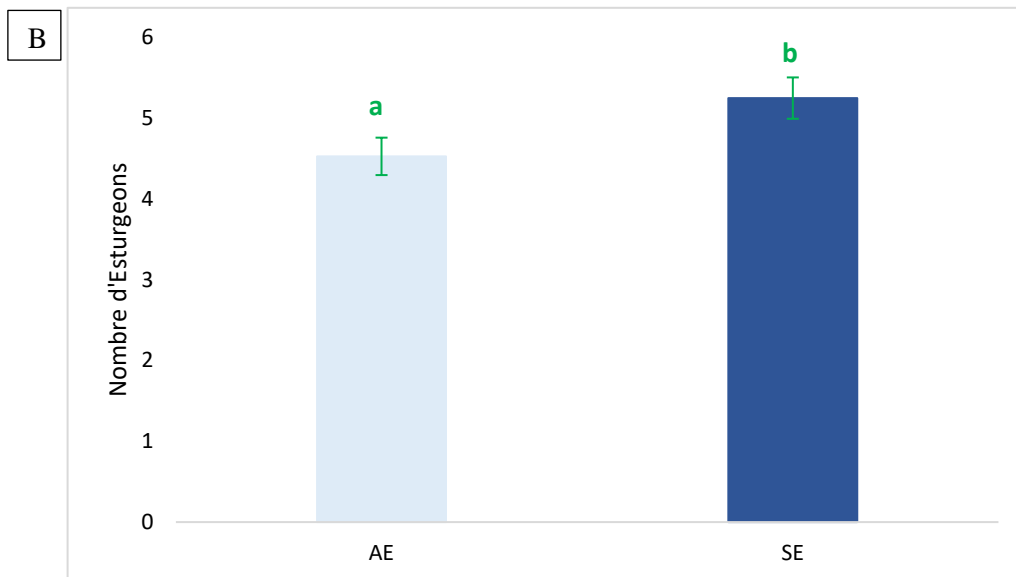
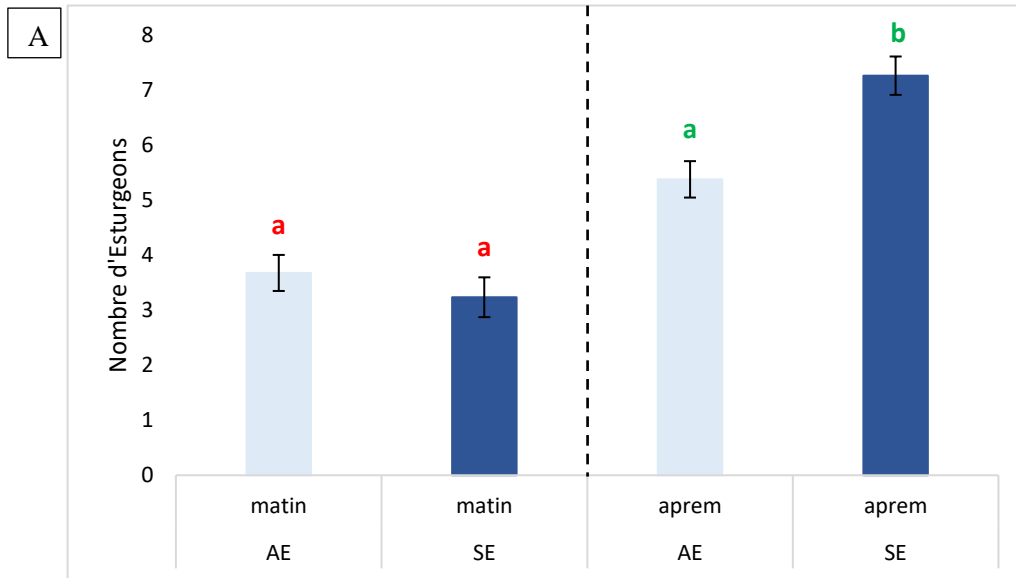


Annexe IX : Occupation de la zone 2 par les esturgeons dans les bacs avec enrichissement (AE) et sans enrichissement (SE)

A. Nombre d'esturgeons en zone 2 avec ou sans enrichissement en fonction de la période (matin ou après-midi (aprem))

B. Nombre d'esturgeons en zone 2 avec ou sans enrichissement dans la journée

(Deux lettres différentes indiquent une différence significative par analyse de variance (p-value<0,05) ; IC, $\alpha=0.05$)



Annexe X : Résultats des analyses de variance sur les variables Poids et Taille à T(0) sur les échantillons 1, 2 et 3 pour les sandres et les esturgeons

(F : F-value ; P : P-value ; S : Significativité (S : significative ; NS : Non significative))

		Sandre : Global			
		Paramètres	F	P	S
Echantillon 1 (T (0))	Taille	0.3914	0.5319	NS	
	Poids	0.3261	0.5682	NS	
Echantillon 2 (T (0))	Taille	0.2274	0.6336	NS	
	Poids	0.2299	0.6318	NS	
Echantillon 3 (T (0))	Taille	0.5915	0.4422	NS	
	Poids	0.6095	0.4354	NS	

		Esturgeon : Global			
		Paramètres	F	P	S
Echantillon 1 (T (0))	Taille	0.0222	0.8817	NS	
	Poids	0.0014	0.9699	NS	
Echantillon 2 (T (0))	Taille	0.0806	0.7766	NS	
	Poids	0.0191	0.89	NS	
Echantillon 3 (T (0))	Taille	0	0.9947	NS	
	Poids	0.0446	0.8329	NS	

Annexe XI : Résultats des tests statistiques (analyse de variance et Kruskal-Wallis) sur les variables zootechniques de T(15) à T(46) pour les sandres et les esturgeons

(Variables étudiées : **S** : Taux de survie ; **P** : Poids moyen ; **HP** : Hétérogénéité de poids ; **TCS** : Taux de croissance spécifique moyen ; **ICM** : Indice de condition moyen ; **GB** : Gain de biomasse ; **L** : longueur ; **HT** : Hétérogénéité de taille ; **GCB** : Gain cumulé de biomasse ; **IC** : Indice de conversion alimentaire)

(F : F-value (analyse de variance); * : l'étoile indique que le test utilisé est un test de Kruskal-Wallis ; P : P-value ; S : Significativité (S : significative ; NS : Non significative))

Sandre : T15			
Paramètres	F	P	S
S	même S --> NS		
P	0.0017	0.9693	NS
HP	0.1068	0.7602	NS
TCS	0.0189	0.8974	NS
ICM	même ICM --> NS		
GB	0.0388	0.8534	NS
L	0	1	NS
HT	0.1534	0.7153	NS

Esturgeon : T15			
Paramètres	F ou Kruskal-Wallis chi-squared (*)	P	S
S*	1	0.3173	NS
P	0.0045	0.9496	NS
HP	0.0167	0.9034	NS
TCS	même TCS --> NS		
ICM	même ICM --> NS		
GB	0.017	0.9025	NS
L	1.5	0.2879	NS
HT	1.509	0.2866	NS

Sandre + Esturgeon : T15			
Paramètres	F	P	S
GCB	0.1009	0.7667	NS
IC	0.1467	0.7212	NS

Sandre : T32			
Paramètres	F	P	S
S	même S --> NS		
P	2.5716	0.1841	NS
HP	0.4093	0.5571	NS
TCS	3.2	0.1481	NS
ICM	même ICM --> NS		
GB	3.8556	0.1211	NS
L	3.5217	0.1338	NS
HT	0.0743	0.7987	NS

Esturgeon : T32			
Paramètres	F ou Kruskal-Wallis chi-squared (*)	P	S
S	0.5	0.5185	NS
P	3.1829	0.149	NS
HP	2.3897	0.197	NS
TCS	même TCS --> NS		
ICM	même ICM --> NS		
GB	0.174	0.698	NS
L	4.225	0.109	NS
HT*	3.9706	0.0463	S

SE>AE

Sandre + Esturgeon : T32			
Paramètres	F	P	S
GCB	4.9514	0.09009	NS
IC	6.05	0.06972	NS

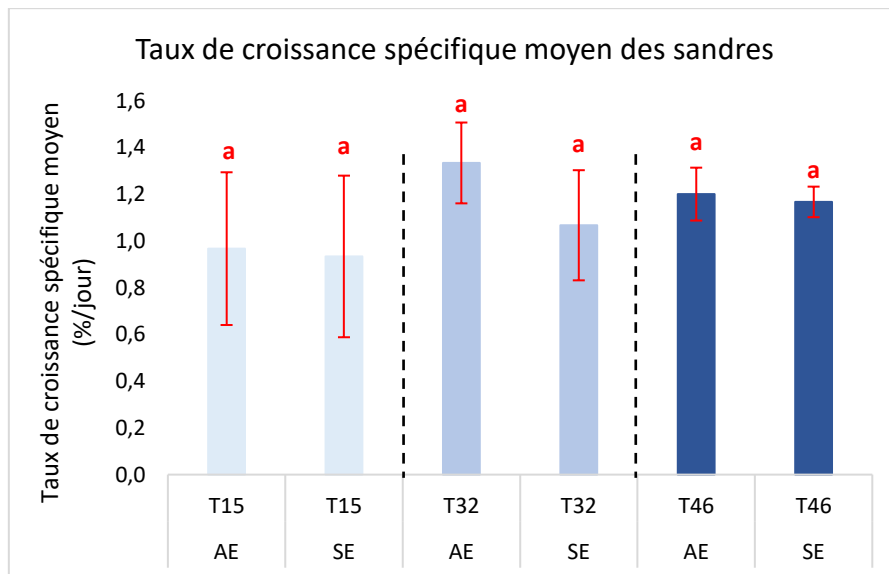
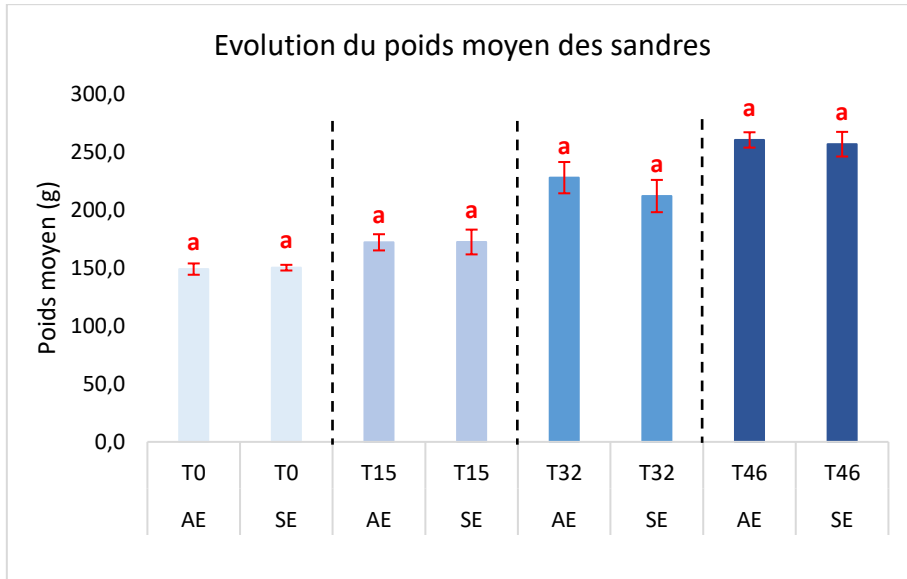
Sandre : T46			
Paramètres	F	P	S
S	même S --> NS		
P	0.3295	0.5967	NS
HP	0.8983	0.3969	NS
TCS	0.25	0.6433	NS
ICM	NS		
GB	0.6	0.4818	NS
L	0.2286	0.6575	NS
HT	1.5161	0.2857	NS

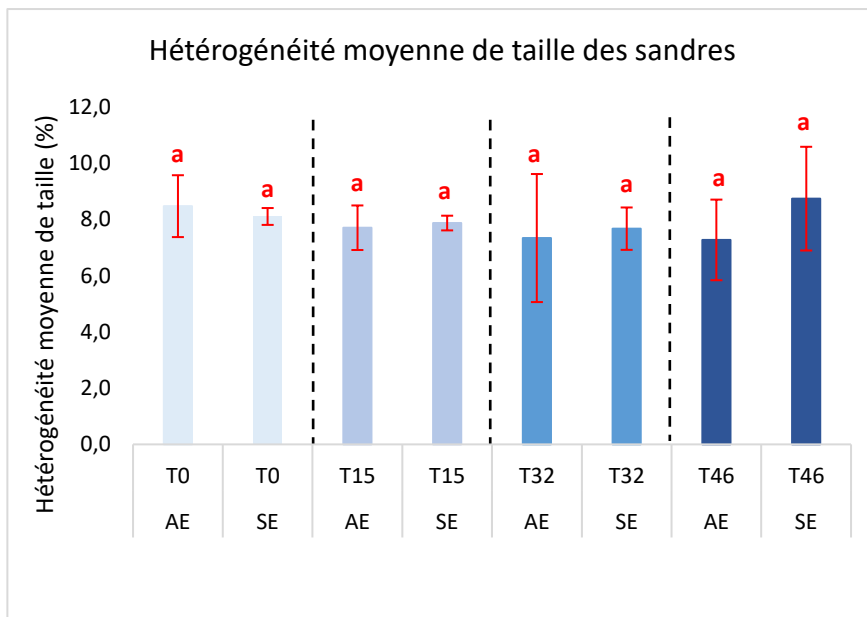
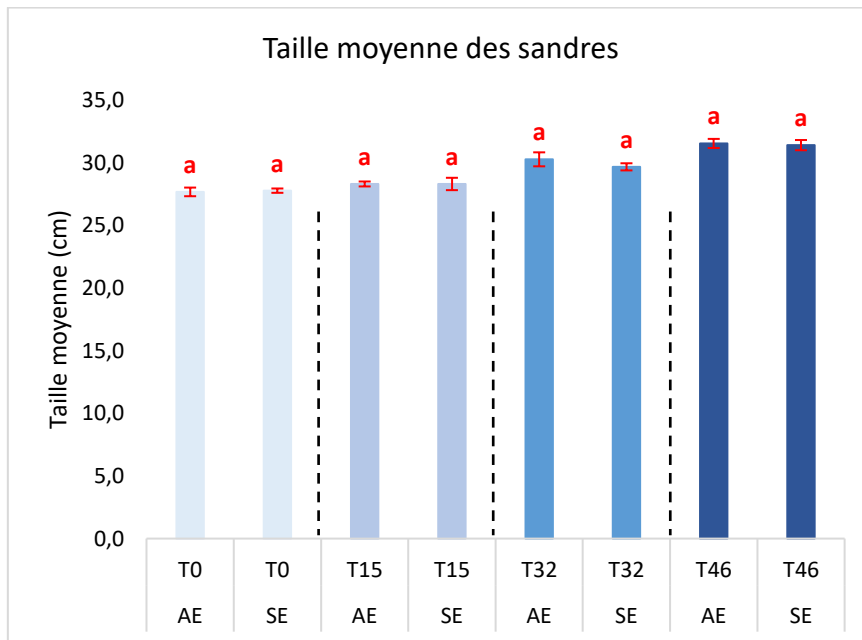
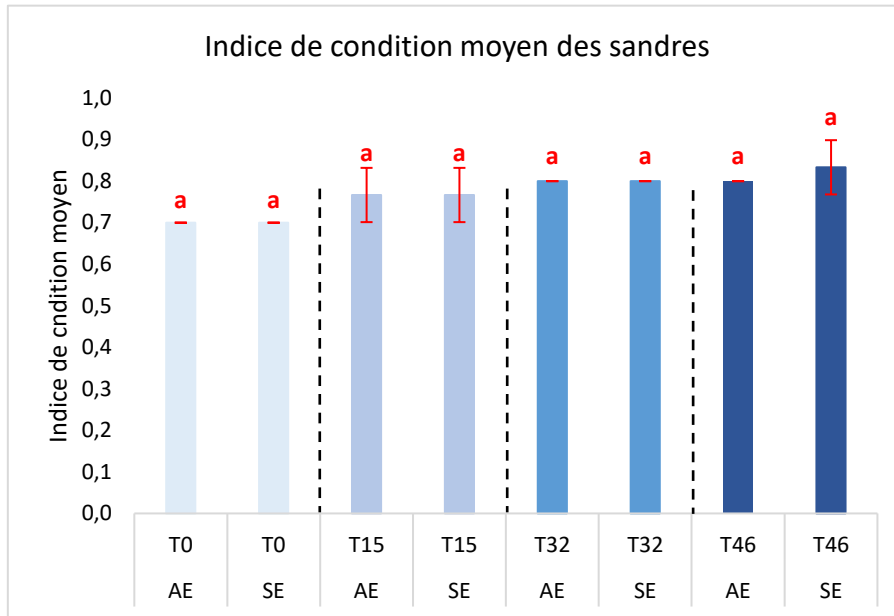
Esturgeon : T46			
Paramètres	F	P	S
S	1	0.3739	NS
P	0.3132	0.6056	NS
HP	0.0738	0.7993	NS
TCS	même TCS --> NS		
ICM	même ICM --> NS		
GB	0.1756	0.6967	NS
L	0.4224	0.5512	NS
HT	0.4337	0.5461	NS

Sandre + Esturgeon : T46			
Paramètres	F	P	S
GCB	0.2531	0.6413	NS
IC	0.1176	0.7489	NS

Annexe XII : Evolution des paramètres zootechniques de T (0) à T (46) pour les sandres avec enrichissement (AE) ou sans enrichissement (SE)

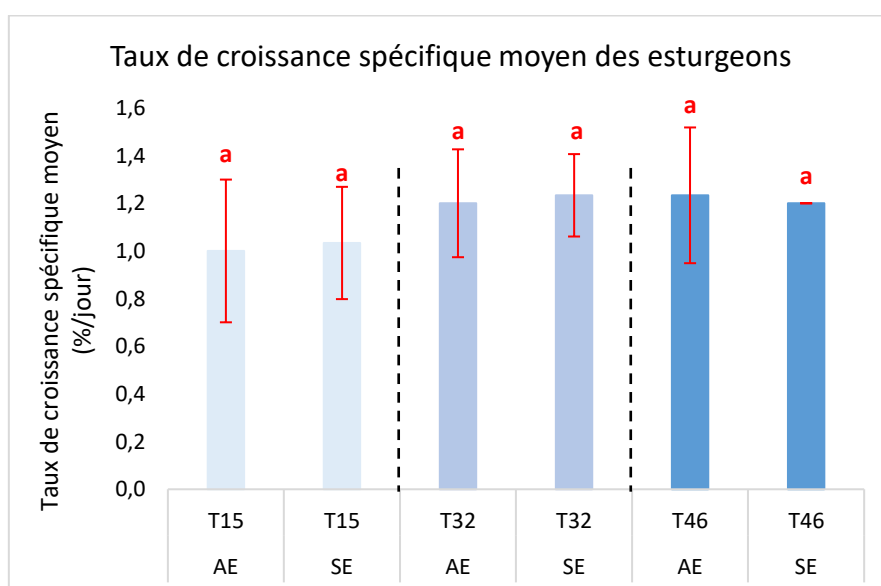
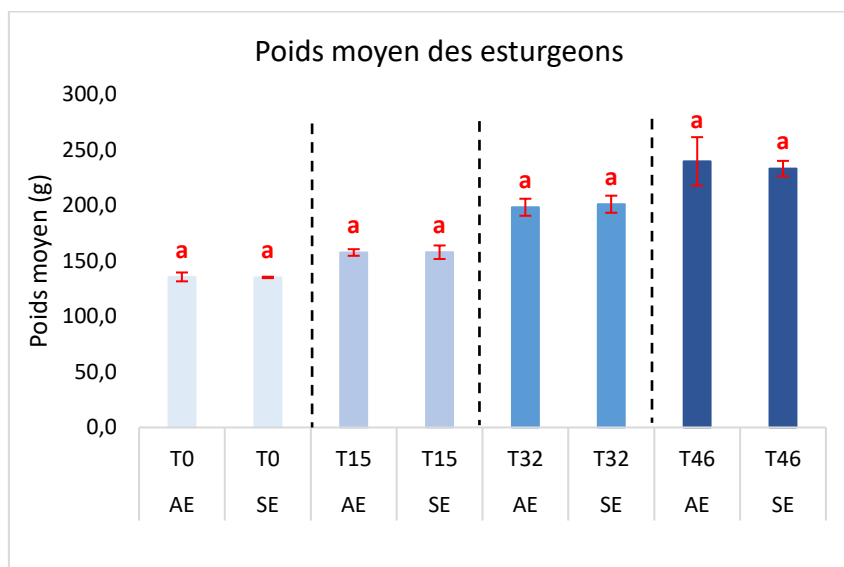
(Deux lettres différentes indiquent une différence significative par analyse de variance (p-value<0,05) ; IC, $\alpha=0.05$)

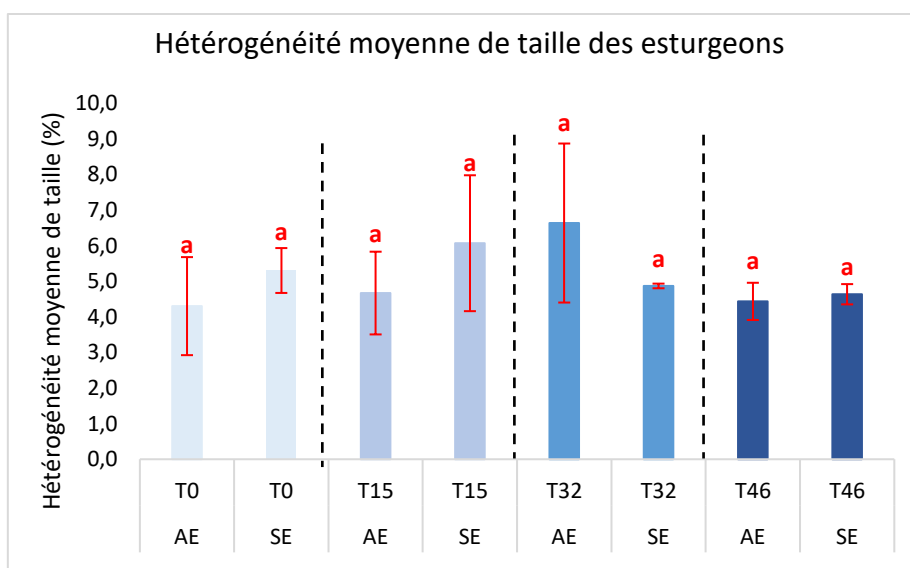
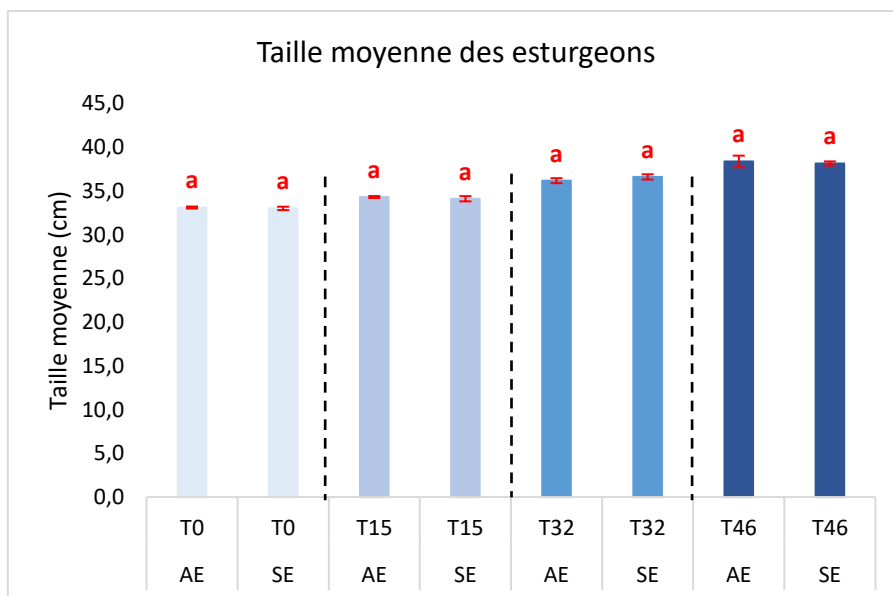
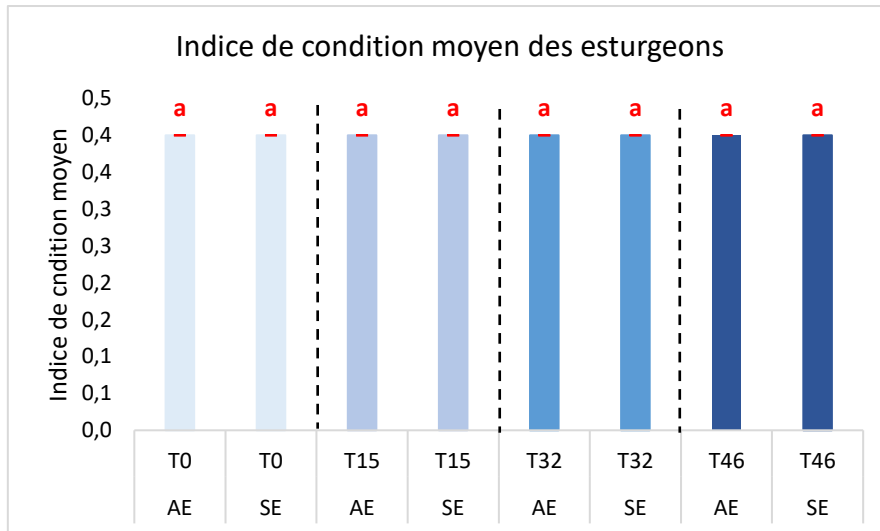




Annexe XIII : Evolution des paramètres zootechniques de T (0) à T (46) pour les esturgeons avec enrichissement (AE) ou sans enrichissement (SE)

(Deux lettres différentes indiquent une différence significative par analyse de variance (p-value<0,05) ; IC, $\alpha=0.05$)







Diplôme : Ingénieur Agronome
Spécialité : Sciences halieutiques et aquacoles
Spécialisation / option : Aquaculture
Enseignant référent : Mme. Dominique Ombredane

Auteur(s) : Jean-Gabriel Reynaud

Date de naissance* : 02/06/1994

Organisme d'accueil : UR AFPA

Adresse : Université de Lorraine
Campus des Aiguillettes, 54506 Vandoeuvre-lès-Nancy

Maître(s) de stage : Mme. Marielle Thomas, M. Thomas Lecocq, M. Alain Pasquet

Nb pages : 22 **Annexe(s)** : 17

Année de soutenance : 2019

Titre français : Effet de l'enrichissement physique sur une polyculture de sandre (*Sander lucioperca*) et d'esturgeon du Danube (*Acipenser ruthenus*) en circuit recirculé

Titre anglais: Effect of physical enrichment on a polyculture of pikeperch and sterlet in Recirculating Aquaculture Systems

Résumé (1600 caractères maximum):

L'enrichissement physique est une complexification du milieu d'élevage par l'utilisation de structures physiques (ex : pierre, plante, sable, objets artificiels) utilisé pour créer un milieu plus propice permettant potentiellement d'accroître les performances de croissance par exemple. L'objectif de cette étude est d'étudier l'effet d'une combinaison d'une plaque opaque en PVC et de tubes en PVC immergés verticalement sur l'occupation de l'espace et les performances de croissance d'une polyculture exploitée en RAS (Recirculating Aquaculture Systems) de sandre (*Sander lucioperca*) et d'esturgeons du Danube (*Acipenser ruthenus*).

Il a pu être montré que l'utilisation de ce type d'enrichissement a modifié significativement l'occupation de l'espace des deux espèces mais n'a pas eu d'effet sur les 10 variables zootechniques étudiées. Aussi dans ces conditions expérimentales, cet enrichissement ne constitue pas une solution intéressante à utiliser pour les pisciculteurs. Cette étude étant pionnière dans le domaine, il est nécessaire de la compléter par d'autres expériences jouant sur d'autres paramètres tels que la durée de l'expérimentation, ou la densité pour se rapprocher des conditions de production réelle voire utilisant d'autres types d'enrichissements physiques. Ceci permettrait de confirmer ou de réfuter l'intérêt de l'enrichissement physique en polyculture en RAS.

Abstract (1600 caractères maximum) :

The physical enrichment is the deliberate addition of physical structures – rock, plant, sand, artificial objects- in the rearing unit to make the environment more suitable for fish in order to potentially improve their growth. The objective of this study is to evaluate the effect of vertically suspended rod arrays and an opaque tank cover on the land use and the growth performance of a polyculture of pikeperch (*Sander lucioperca*) and sterlet (*Acipenser ruthenus*) in Recirculating Aquaculture Systems (RAS).

After analysis, this type of physical enrichment has significantly affected the land use of the two species but there was no significant difference for the 10 studied zootechnic parameters. Then, this type of enrichment is not an interesting option for fish farmers to improve the rearing performances. This study is the first one in this domain so future studies should evaluate other parameters as experiment's duration, fish density or using other types of physical enrichment. It could validate or refute the physical enrichment as a solution to improve growth conditions in a polyculture in RAS.

Mots-clés : Enrichissement physique, Polyculture, Circuit recirculé, Performances d'élevage, Occupation de l'espace, Sandre, Esturgeon du Danube.

Key Words: Physical enrichment, Polyculture, Multi-species, Recirculating aquaculture systems, Rearing efficiency, Land use, Pikeperch, Sterlet sturgeon.