



**HAL**  
open science

# Mise en place de l'étude visant à caractériser des capacités cognitives élaborées chez la truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*)

Manon Peyrafort

## ► To cite this version:

Manon Peyrafort. Mise en place de l'étude visant à caractériser des capacités cognitives élaborées chez la truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*). Sciences du Vivant [q-bio]. 2018. dumas-01972033

**HAL Id: dumas-01972033**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01972033>**

Submitted on 7 Jan 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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



**AGROCAMPUS OUEST**

CFR Angers  CFR Rennes



<p><u>Année universitaire</u> : 2017 - 2018</p> <p><u>Spécialité</u> : Sciences de la Mer et du Littoral – Biologie</p> <p><u>Parcours</u> : Sciences Halieutiques et Aquacoles</p> <p><u>Option</u> : Aquaculture</p>	<p><b>Mémoire de fin d'études</b></p> <p><input type="checkbox"/> d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage</p> <p><input type="checkbox"/> de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage</p> <p><input type="checkbox"/> d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)</p>
--	--



Par Manon PEYRAFORT

**Soutenu à Agrocampus Rennes**

**le 14 septembre 2018**

**Devant le jury composé de :**

Président : Hervé LE BRIS, enseignant-chercheur, Agrocampus-Ouest

Maître de stage : Violaine COLSON, ingénieur de recherche, LPGP, INRA

Autres membres du jury :

Yannick OUTREMAN, enseignant-chercheur Agrocampus-Ouest

Céline TALLET-SAIGHI, enseignant-chercheur, UMR 1348 PEGASE, INRA

*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  
«Patrimoine-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France»  
disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



*« C'est déroutant. Certaines personnes vous disent : « je suis végétarien, je mange juste du poisson, pas de viande ». J'imagine le poisson vraiment offensé : « Qu'est-ce que vous voulez dire ? Je suis aussi fait de chair ! J'ai des muscles, j'ai un cœur, j'ai un cerveau. » On a tendance à percevoir les poissons uniquement comme des denrées. »*

- Sylvia EARLE, biologiste, océanographe et exploratrice.

## REMERCIEMENTS

---

Tout d'abord je tiens à dire un grand merci à Violaine COLSON, ma maîtresse de stage pour le suivi de mon travail, la confiance qu'elle m'a accordée, son soutien pour mes candidatures en thèse, sa bonne humeur et les délicieux petits financiers.

Merci à Julien BOBE de m'avoir permis d'intégrer le laboratoire dans l'équipe « Sexe, Ovogenèse et Comportement », ainsi que pour ses conseils pour mes candidatures en thèse.

Également un grand merci à Claudiane VALOTAIRE pour ses petits cours de bricolages, son aide précieuse, ses conseils et la bonne ambiance partagée lors des manipulations « en bas » dans les IE.

Je tiens également à remercier toutes les personnes du LPGP qui ont contribué à mes expériences.

Merci aux animaliers, Amélie PATINOTE, Cécile DURET, Pierre-Lô SUDAND, Jean-Marc AUBRY et Frédéric BOREL pour avoir pris soin de mes poissons, les petits moments de discussion dans les IE et vos sourires matinaux.

Merci à Lény LEGOFF et Pierre-Lô SUDAND pour la confection de ma salle d'expérimentation.

Merci à Anne-Sophie GOUPIL pour l'aide à la vérification de ploïdie de mes poissons.

Merci à Émilie CARDONA pour les tests sur l'impact de la lidocaïne sur le comportement et les deux belles journées passées à la PEIMA.

Je tiens également à remercier mes partenaires extérieurs.

Merci à Nicolas BONNEAU et Audrey DURANT de la société IMETRONIC pour la mise en place du dispositif, la confection du logiciel et leur réactivité lors des petits problèmes de programmation.

Merci à Vincent FOURNIER de la société DianaAqua pour l'enrobage de nos aliments gracieusement réalisés et offerts.

Merci à Ludovic CALANDREAU et Léa LANSADE de l'INRA, unité Physiologie de la Reproduction et des Comportements, pour la collaboration sur le projet PHASE, leurs petits conseils et leurs avis sur les protocoles.

Pour finir je tiens à remercier l'ensemble de l'équipe du LPGP pour le très bon accueil que vous m'avez fait et les conviviales et gourmandes pauses café.

Je tiens plus particulièrement à remercier les thésards (Diane, Charlène, Ahmed, Laury, Sabrina) et les stagiaires (Laura, Elise, Gwendoline, Thibault, Arthur et Arthur) pour les conseils pour mes candidatures en thèses, les pauses pleines de rire et de vitalité qui permettent de faire le plein de forces pour travailler, les soirées et les week-end passés ensemble.

Encore un grand merci à vous tous. C'est la tête remplie de souvenirs et de nouvelles connaissances que je quitte le LPGP. Vous allez me manquer.

1. Introduction.....	1
2. Matériel et méthodes.....	7
2.1. Bien-être et réglementation.....	7
2.2. Modèle d'étude.....	7
2.2.1. La souche.....	7
2.2.2. Les conditions d'élevage.....	8
2.2.3. L'alimentation.....	8
2.2.4. Vérification de la triploïdie.....	9
2.3. Expérience 1 : Environnement enrichi et interactions des truites avec les éléments qui le composent.....	9
2.4. Expérience 2 : Évaluation des capacités d'apprentissage et sélection.....	11
2.4.1. Motivation alimentaire et apprentissage.....	11
2.4.2. Apprentissage en labyrinthe.....	11
2.4.3. Marquage.....	12
2.5. Expérience 3 : Conditionnement opérant au vu de l'apprentissage de concepts.....	13
2.5.1. Le dispositif.....	13
2.5.2. Entraînement à l'utilisation du dispositif.....	15
2.5.2.1. Exercice 1 : Entraînement à l'activation d'une tige.....	15
2.5.2.2. Exercice 2 : Entraînement à l'activation de la tige en lien avec un stimulus....	16
2.6. Analyses statistiques.....	19
3. Résultats.....	21
3.1. Expérience 1 : Environnement enrichi et interactions des truites avec les éléments qui le composent.....	21
3.2. Expérience 2 : Apprentissage spatial et motivation d'alimentaire.....	22
3.3. Expérience 3 : Conditionnement opérant au vu de l'apprentissage de concepts.....	24
3.3.1. Acclimatation au bassin de test.....	24
3.3.2. Exercice 1 : Entraînement à l'activation de la tige.....	25
3.3.3. Exercice 2 : Entraînements à l'activation de la tige en lien avec un stimulus.....	26
4. Discussion.....	27
5. Conclusions.....	31
6. Perspectives et suite du projet.....	32

**Acuité visuelle** : capacité de l'œil à discerner des détails à une distance plus ou moins importante.

**Aliment extrudé** : aliment ayant subi une extrusion au cours de son processus de fabrication. L'extrusion consiste à faire passer l'aliment sous forme de pâte dans un tube et dans des conditions de haute pression et haute température. Par ce processus l'aliment cuit. Puis lorsque la température et la pression diminuent rapidement en sortie de tube l'eau s'évapore et une gélatinisation de l'amidon s'opère. L'aliment est ensuite coupé mécaniquement afin d'obtenir la granulométrie souhaitée.

**Analgésiant** : produit chimique non létal à faible dose, permettant de réduire la douleur par une forme d'anesthésie.

**Animaux de rente** : animaux domestiques élevés pour leur rentabilité, c'est à dire pour la production de denrées alimentaires, de laine, de peaux, de lait et à d'autres fins agricoles.

**Bien-être** : état à la fois mental et physique, où l'individu est en harmonie avec son environnement, c'est à dire que ses besoins et ses désirs sont satisfaits et que l'animal est capable de s'adapter à son milieu. Cette notion est directement associée à la capacité de l'animal à ressentir la douleur et d'autres formes de souffrance.

**Chromaticité** : valeur utilisée pour déterminer une couleur sans considérer sa luminosité. Elle rassemble les informations de saturation et de teinte des stimuli de couleur.

**Code RAL** : code couleur européen couramment utilisé pour définir la couleur d'une peinture

**Code RGB** : abréviation anglaise qui indique le code d'une couleur indiquant les proportions de rouge (Red), vert (Green) et bleu (Blue) qui la compose.

**Concept** : règle généralisée à un ensemble de stimuli de nature différente.

**Conditionnement opérant** : processus par lequel un animal modifie son comportement naturel pour des conditions expérimentales. L'animal tient compte des conséquences de son action en fonction d'un renforcement donné, l'incitant alors à reproduire ce comportement dans le cas d'un renforcement positif, ou au contraire à le réduire dans le cas d'un renforcement négatif.

**Flavobactérie** : bactérie qui induit l'érosion et la nécrose des nageoires. Elle peut aussi induire une dépigmentation qui est due à une nécrose de la peau et qui peut aller jusqu'à l'ulcère. Cette bactérie entraîne la flavobactériose, une maladie soignable par un traitement antibiotique (Florfénicol).

**Hydrolysat de poissons** : produit essentiellement azoté résultant de la désintégration des protéines du poisson et essentiellement composé d'un mélange de polypeptides plus ou moins complexes et d'acides aminés.

**Paradigme** : manière dont un animal répond à une problématique posée en condition expérimentale.

**Pool** : lot d'individus expérimentaux subissant des conditions expérimentales similaires.

**Scan sampling** : observation comportementale visant à balayer sur une période donnée les comportements de l'ensemble des individus d'un groupe à des intervalles de temps réguliers.

**Self-feeder** : dispositif couramment utilisé en aquaculture, permettant aux poissons de s'auto-alimenter en activant une tige présente en surface qui fait tomber une dose définie d'aliment.

**Session** : ensemble de trials réalisés successivement.

**Stade œillé** : chez les poissons il s'agit du stade de développement au moment duquel apparaissent les yeux. Chez la truite ce stade survient à 20 jpf.

**Trial** : essai réalisé par l'animal d'une durée définie et dans des conditions expérimentales particulières.

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

---

**AIC** : critère d'information d' Akaike

**CO** : cut-off

**ESM** : erreur standard à la moyennes

**hpf** : heure post-fécondation

**ITI** : intervalle entre trials

**jpf** : jour post-fécondation

**MTSd** : test matching-to-sample retardé

**MTSs** : test matching-to-sample simultané

**OFSd** : test oddity-from-sample retardé

**OFSs** : test oddity-from-sample simultané

**OOO** : test odd-one-out

**RC** : réponse correcte

**S** : sample

**S-** : stimulus distrayant

**S+** : stimulus positif

## LISTE DES FIGURES

---

<b>Figure 1:</b> Taxonomie des systèmes de mémoire chez les mammifères.....	2
<b>Figure 2 :</b> Représentation schématique d'une section parasagittale à travers le cerveau d'oiseaux, d'un poisson téléostéen, et d'un rongeur, montrant la position relative du ventricule latéral par rapport au cortex des mammifères et aux domaines subpalliaux .....	3
<b>Figure 3 :</b> Nombre de cellules marquées (représentant la quantité d'ADN) en fonction de l'intensité de la fluorescence.....	9
<b>Figure 4 :</b> Déroulement type d'un « scan sampling » visant à évaluer les interactions des truites avec les objets présents dans leur environnement.....	10
<b>Figure 5 :</b> Méthode de comptage utilisée pour évaluer la proximité des poissons avec les objets de leur environnement.....	10
<b>Figure 6:</b> Représentation schématique du déroulement du test d'apprentissage en labyrinthe en T et son design expérimental .....	12
<b>Figure 7 :</b> Marquage des truites.....	13
<b>Figure 8 :</b> Bassin de test pour l'apprentissage des concepts.....	14
<b>Figure 9:</b> Positions des stimuli et du sample sur l'écran.....	14
<b>Figure 10 :</b> Entraînement à l'activation de la tige.....	16
<b>Figure 11:</b> Entraînement à l'activation d'une tige en lien avec un stimulus.....	18
<b>Figure 12 :</b> Proximité des truites avec les objets de leur environnement en fonction des bassins (401 et 402).....	21
<b>Figure 13 :</b> Fréquence de passage dans le tube PVC au sein de chaque bassin (401 et 402) et pour chaque heure d'observation (11h et 15h).....	22
<b>Figure 14 :</b> Evolution du temps de latence de sortie de la zone d'acclimatation et du temps de latence entre la sortie de la zone d'acclimatation et le choix de la bonne branche du labyrinthe, au cours des trials et en fonction de la récompense (aliment enrobé et non enrobé).....	23
<b>Figure 15 :</b> Proportion de truites issues des sessions 5 à 12 ayant consommées la totalité de la récompense (aliment enrobé et non enrobé) au cours des trials, répartis sur deux jours.....	23
<b>Figure 16 :</b> Vision in situ des déplacements d'une truite sur quelques secondes successives le long de l'écran du bassin de test.....	24
<b>Figure 17 :</b> Evolution du taux d'activation des tiges (RC) des 15 truites .....	25

<b>Figure 18</b> : Positions des activations de tige réalisées par les truites sur les trials des sessions 1 à 6.....	26
<b>Figure 19</b> : Score d'activation de la truite n°4459 au cours des sessions 1 à 5.....	26

## LISTES DES TABLEAUX

---

<b>Tableau 1</b> : Synthèse de l'évolution de la granulométrie de l'aliment distribué et du taux de rationnement journalier au cours de la croissance des truites.....	8
<b>Tableau 2</b> : Formes des stimuli présentées aux truites lors des phases d'habituation, des pré-entraînements et des tests d'application de concept.....	17
<b>Tableau 3</b> : Couleurs des stimuli présentés aux truites lors des phase d'habituation, des pré-entraînements et des tests d'application de concept.....	18
<b>Tableau 4</b> : Modèles utilisés pour les analyses multifactorielles des différentes expériences.....	20

**Annexe I** : Processus de création d'une souche expérimentale (monosex femelle et triploïde)

**Annexe II** : Evolution de la croissance, de la densité d'élevage et de l'effectif des truites expérimentales au sein des bassins d'élevage

**Annexe III** : Normalité et homoscedasticité des modèles créés pour les analyses statistiques

**Annexe IV** : Déroulement des pré-entraînements aux tests d'application de concepts

**Annexe V** : Déroulement des tests d'application de concepts

**Annexe VI** : Illustrations sur trois trials des neufs types de stimuli présentés aux truites lors des tests d'application de concepts - Cas des tests MTSs et OFSs

**Annexe VII** : Stimuli de catégories différentes et stimuli composés d'un nombre de formes différentes présentés aux truites lors des tests d'application de concept

## 1. INTRODUCTION

---

Au début des années 1800, des psychologues et des philosophes ont tenté de définir les fonctions cognitives, les menant à diverses visions suggestives sur la question (Squire, 2004). Darwin avait depuis longtemps déjà, reconnu leur importance par rapport à leurs intérêts dans les instincts, les interactions sociales, la moralité, le contrôle moteur-sensoriel, les origines de la conscience et la cognition.

Vers la fin des années 1800, des études se sont intéressées à l'importance du cerveau dans ces mêmes fonctions. Celles-ci ont ensuite été étendues au système nerveux, à un large éventail de mammifères et de vertébrés non mammifères, ces derniers attirant beaucoup moins l'intérêt (Karten, 2015). Cependant, ces études étaient limitées et subjectives.

Au début des années 1960, l'apparition des méthodes expérimentales modernes ont permis d'initier l'ère expérimentale, basée sur des faits biologiques concrets. Cette ère débute sur des patients humains atteints d'amnésie puis s'étend progressivement à des animaux non humains (Squire, 2004).

Selon Shettleworth, le terme « cognition » se réfère aux « mécanismes par lesquels les animaux acquièrent, traitent, stockent et agissent sur des informations provenant de l'environnement » (Gierszewski, Bleckmann & Schluessel, 2013). La cognition fait appel à deux types de mémoire qui se distinguent selon le type d'informations traitées et les principes selon lesquels ils opèrent.

Le premier type de mémoire est la mémoire déclarative. Elle est représentationnelle et perceptuelle. Elle permet de modéliser le monde extérieur en codant chaque fait et événement séparément les uns des autres, pour en discerner le vrai du faux. La récupération des données stockées est faite consciemment par l'individu qui peut les exprimer verbalement (dans le cas de l'humain), d'où le terme « déclarative ». Elle fait appel à la fois à la mémoire sémantique, qui interprète les faits sur le monde, et à la mémoire épisodique, qui permet de ré-expérimenter un événement dans un contexte différent du contexte originel.

Le second type de mémoire est la mémoire non déclarative. Elle est dispositionnelle. Elle permet d'extraire progressivement les éléments communs à partir d'une série d'événements distincts. Selon la tâche à apprendre et la stratégie d'apprentissage, différentes formes de mémoire non déclarative sont engagées. Il peut s'agir d'associations ou encore de savoir-faire, comme le vélo, non accessibles à la conscience (Figure 1).

Ces deux types de mémoire, déclarative et non déclarative, fonctionnent indépendamment et en parallèle. Néanmoins, il existe un lien entre elles. La mémoire non déclarative peut substituer la mémoire déclarative, ou encore, la mémoire déclarative est progressivement relayée par la mémoire non déclarative, par exemple au cours de l'apprentissage (Squire, 2004). Lors de ces relais de mémorisation, la mémoire déclarative et non déclarative, vont toutes deux faire intervenir la mémoire à court terme et la mémoire à long terme (Calandreau, communication personnelle).

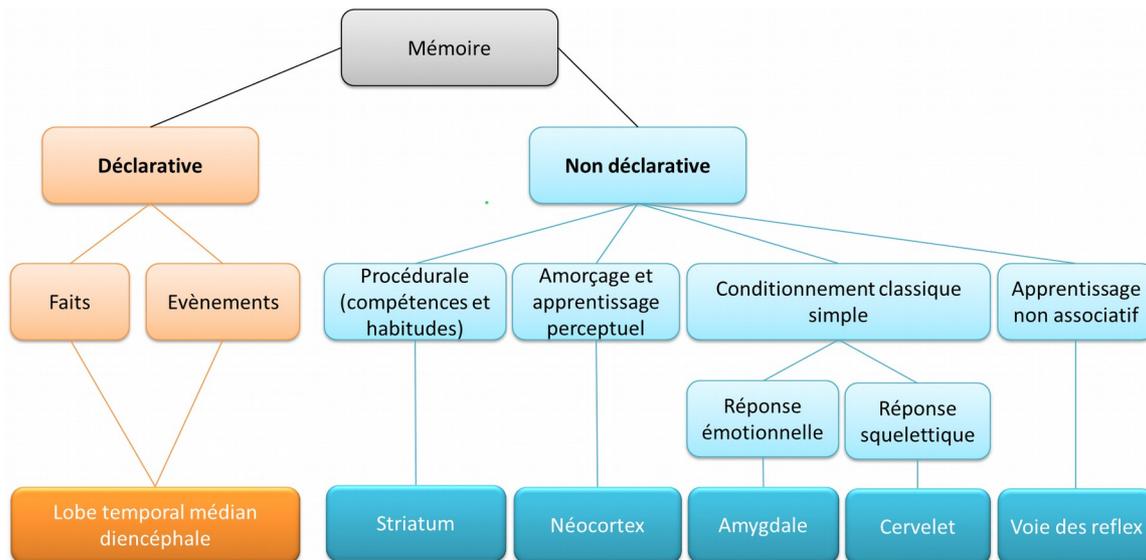


Figure 1: Taxonomie des systèmes de mémoire chez les mammifères. La taxonomie énumère les structures cérébrales de chaque forme de mémoire déclarative et non déclarative et les structures cérébrales associées. Figure traduite de Squire, 2004. © Manon PEYRAFORT, 2018, INRA-LPGP

Les aptitudes cognitives jouent un rôle important dans la recherche de nourriture, le choix du partenaire, l'évitement des prédateurs, la navigation et l'orientation. Pour ces comportements, la perception des stimuli environnementaux à travers les systèmes sensoriels de l'animal est essentielle. Elles sont adaptées aux besoins spécifiques de l'animal et à son habitat. On peut donc supposer que plus les aptitudes cognitives d'un animal sont développées, plus il peut réagir avec souplesse à des environnements changeants ou à des situations difficiles (Gierszewski, Bleckmann, & Schluessel, 2013). Cette hypothèse devrait donc être en accord avec la théorie de l'évolution. Elle permettrait de classer les espèces de vertébrés phylogénétiquement différentes en groupes basés sur des critères comportementaux (Berryman *et al.*, 1965; Bitterman, 1965), tel que leurs performances à exécuter différentes tâches (Bitterman, 1965).

Les poissons, apparus il y a 300 millions d'années, partagent des capacités d'apprentissage et de mémoire avec les autres vertébrés, basées sur des mécanismes neuronaux et des systèmes cérébraux équivalents ou similaires. En effet, chez les poissons téléostéens les connexions uniques, les caractéristiques moléculaires des émetteurs et les récepteurs des ganglions de la base sont pratiquement identiques à ceux qui définissent les caractéristiques des ganglions basaux des mammifères et des oiseaux (Ganz *et al.*, 2012). Les voies mono-sensorielles ascendantes à destination du thalamus puis du télencéphale qui transportent des informations auditives et électro-sensorielles de la périphérie vers diverses régions de la «crête dorsale» du cerveau des téléostéens, ont des ressemblances frappantes avec les voies correspondantes chez les mammifères et les oiseaux. Le conditionnement classique de réponses motrices simples tel que la réponse de clignements des yeux se produit dans le cervelet chez les mammifères (Thompson & Steinmetz, 2009) et chez les poissons téléostéens (Gómez *et al.*, 2010; Fraser *et al.*, 2012). De même, le conditionnement émotionnel et la mémoire spatiale sont liés au télencéphale (Salas *et al.*, 1996) et au cervelet des poissons, des structures homologues à l'amygdale et au cervelet chez les mammifères (Broglia *et al.*, 2011). La région dorso-centrale du télencéphale des téléostéens émet sur le tronc cérébral des projections spécifiques avec des patrons similaires à ceux des mammifères et des oiseaux, respectivement dans le cortex et la région cortico-équivalentes (Ito & Yamamoto, 2009; Giassi *et al.*, 2012). En revanche, contrairement aux mammifères, qui possèdent un cortex, les poissons téléostéens n'en possèdent pas (Figure 2). Aucune structure dans le prosencéphale (zone

du télencéphale qui contient le cortex) non-mammifère, qui pourrait être comparée au cortex des mammifères, n'a été trouvée (Karten, 2015). Ces zones cérébrales sont impliquées dans la capacité à décoder les entrées auditives générées par la communication vocale, la reconnaissance visuelle des formes, la stéréopsie visuelle, le déchiffrement des entrées somatosensibles complexes et, plus particulièrement, les fonctions cognitives dites supérieures (Karten, 2015) tel que l'apprentissage abstrait de règles et de concepts (Newport, Wallis & Siebeck, 2014).

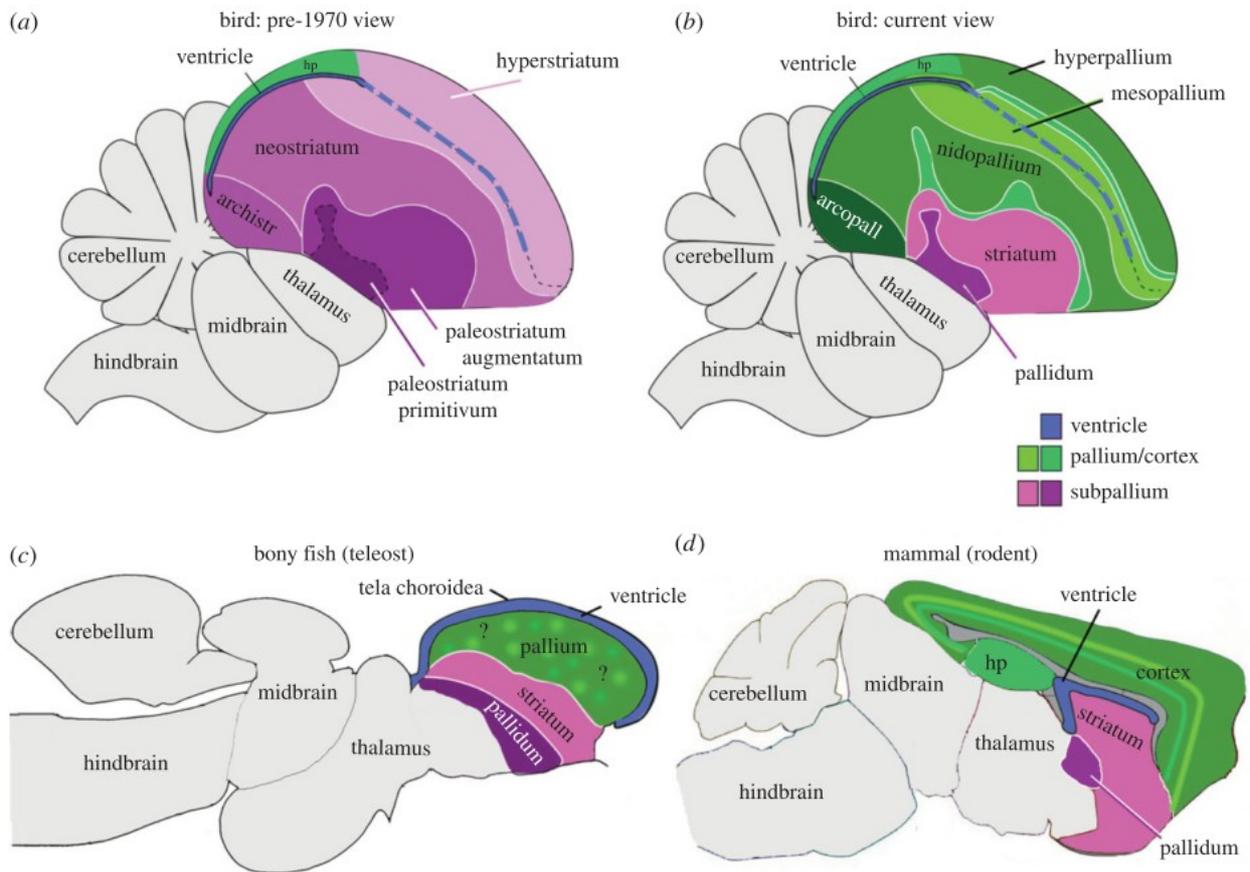


Figure 2 : Représentation schématique d'une section parasagittale à travers le cerveau d'oiseaux (a, b), d'un poisson téléostéen (c), et d'un rongeur (d), montrant la position relative du ventricule latéral (bleue) par rapport au cortex des mammifères (vert) et aux domaines subpalliaux (violet). Chez les mammifères (d), le néocortex (pallium) se situe entièrement au-dessus du ventricule. L'organisation détaillée et les homologues des groupes de cellules palliales chez les téléostéens restent encore à élucider ((Karten, 2015)

Malgré un cerveau moins développé et une acuité visuelle comportementale médiocre (1,75 cycles.degré<sup>-1</sup> pour *Rhinecanthus aculeatus*, Champ *et al.*, 2014, et pour *Carassius auratus*, Hester, 1968; Neumeyer, 2003; entre 1,29 et 1,36 cycles.degré<sup>-1</sup> pour *Pomacentrus amboinensis*, Parker *et al.*, 2017, entre 1,61 et 1,71 cycles.degré<sup>-1</sup> pour *Pseudochromis fuscus*, Parker *et al.*, 2017, et entre 0,075 et 0,15 cycles.degré<sup>-1</sup> pour *Toxotes chatareus*, Ben-Simon *et al.*, 2012) comparé à celle de l'Homme (30-70 cycles.degré<sup>-1</sup>; Campbell & Gubisch, 1966), les poissons téléostéens sont capables de voir des motifs complexes et contrastés. En effet, les poissons discriminent des couleurs, des lignes directives (*Danio rerio*: Colwill *et al.*, 2005; Arthur & Levin, 2001) et des formes bidimensionnelles et tridimensionnelles (*Gnathonemus petersii*: Schuster & Amtsfeld, 2002; *Pseudothropheus sp.*: Schluessel, Fricke & Bleckmann, 2012; *Pomacentrus amboinensis*: Siebeck, Litherland & Wallis, 2009; *Carassius auratus*: Wyzisk & Neumeyer, 2007), même

lorsque des stimuli de différentes profondeurs spatiales leurs sont présentés (*Carassius auratus* : Frech, Vogtsberger & Neumeyer, 2012). Si les poissons ont le choix entre réaliser une discrimination sur la chromaticité et le motif, ils privilégient le choix basé sur la chromaticité, le motif pouvant limiter leur acuité visuelle (*Rhinecanthus aculeatus* : Newport *et al.*, 2017). Néanmoins, lorsque l'acuité visuelle n'est pas impactée, les poissons préfèrent porter leur choix sur une grande chromaticité plutôt que sur un motif précis (*Carassius auratus* : Ohnishi, 1991)). Plus étonnant encore, les poissons sont capables de discriminer des formes subjectives (*Xenotoca eiseni* : Sovrano & Bisazza, 2009), et illusoire (*Carassius auratus* : Wyzisk & Neumeyer, 2007) comme les figures de Kanisza, ou encore de reconnaître des objets partiellement obstrués (on parle alors d'achèvement amodal ; *Xenotoca eiseni* : Sovrano & Bisazza 2008). Ils sont aussi capables de reconnaître des congénères sur des motifs faciaux visibles aux UV (*Pomacentrus amboinensis* et *Pomacentrus moluccensis* : Siebeck *et al.*, 2010) et sur la reconnaissance de couleurs de longue longueur d'onde ( $\lambda_{\max} = 611 \text{ nm}$  ; *Coris julis* : Braun *et al.*, 2014), ou encore de discriminer un grand nombre de visages humains (44 faces ; *Toxotes chatareus* : Newport *et al.*, 2016). Les poissons réussissent également à catégoriser des images, comme par exemple, entre la catégorie « poisson » et la catégorie « escargot » (*Pseudotropheus sp.* : Schluessel, Fricke & Bleckmann, 2012).

Les poissons ont aussi d'excellentes capacités d'orientation. Ils se basent principalement sur des indices géométriques, mais aussi sur des informations naturelles (*Xenotoca eiseni* : Sovrano, Bisazza, & Vallortigara, 2005, 2007).

Ils sont par ailleurs capables de dénombrer. Ils dénombrent davantage en se basant sur une « numération relative », comme par exemple sur la reconnaissance individuelle de congénère (si les poissons sont familiarisés depuis au minimum 5 jours ; Griffiths & Magurran, 1997), sur la luminescence totale, sur la somme des périmètres des figures (*Gambusia holbrooki* : Agrillo *et al.*, 2009), sur la quantité de mouvements et la surface totale (*Gambusia holbrooki* : Agrillo *et al.*, 2008). Lorsque ces éléments ne sont pas présents, ils sont capables de dénombrer sur une « numération absolue » en se basant sur des nombres (*Gambusia holbrooki* : Agrillo *et al.*, 2009). Pour ces deux types de numération, plus le rapport numérique est important, meilleure est la capacité de numération des poissons (loi de Weber ; *Gambusia holbrooki* : Christian Agrillo, Dadda, & Bisazza, 2007 ; Agrillo *et al.*, 2008 ; *Xiphophorus helleri* : Buckingham *et al.*, 2007).

La plupart des tests qui évaluent les capacités visuelles des poissons sont des tests de discrimination où les poissons sont préalablement conditionnés à reconnaître un stimulus particulier par un renforcement positif (récompense alimentaire si le stimulus est choisi) ou négatif (chocs électriques en cas de mauvaise réponse ; *Carassius auratus* : Goldman & Shapiro, 1979 ; Zerbolio & Royalty, 1983). Ainsi le renforcement, positif ou négatif, stimule le poisson à réaliser la tâche. On parle alors de conditionnement opérant. Ces tests permettent d'étudier directement les capacités d'apprentissage et de discrimination des animaux. Le test le plus couramment utilisé est l'AFC (« Alternative Forced Choice »). Il s'agit d'un test dans lequel des stimuli sont présentés simultanément aux poissons. Le plus souvent, les poissons sont soumis à un test 2-AFC, c'est à dire qu'ils doivent choisir entre deux stimuli, l'un des deux étant récompensé (*Pseudotropheus sp.* : Schluessel, Fricke & Bleckmann, 2012 ; *Xenotoca eiseni* : Sovrano & Bisazza, 2008 ; *Carassius auratus* : Wyzisk & Neumeyer, 2007). D'autres auteurs ont poussé leurs études plus loin en réalisant un test 4-AFC où les poissons doivent choisir un stimulus cible (S+) parmi trois autres stimuli distrayants (S-) identiques (Ben-Simon *et al.*, 2012 ; Newport *et al.*, 2013 ; Newport, Wallis, & Siebeck, 2014, 2015). Ce test, plus complexe, permet plus de flexibilité car il est possible de substituer S+ ou un S- par un nouveau stimulus (N) et ainsi évaluer la stratégie mise en place par les poissons lors du choix du stimulus (Newport *et al.*, 2013).

D'autres tests se basent sur la capacité des poissons à former des concepts et à généraliser des règles apprises. Pour cela, de nombreux stimuli peuvent être utilisés. Les poissons peuvent se baser soit sur des concepts naturels, c'est à dire sur la catégorisation de stimuli sur des critères communs (Katz, Wright & Bodily, 2007), soit sur des concepts abstraits, c'est à dire sur des relations non associées à des stimuli particuliers (Newport, Wallis & Siebeck, 2014).

Les tests basés sur des concepts abstraits nécessitent que les poissons engagent un raisonnement d'ordre supérieur (Katz, Wright & Bodily, 2007). Or, les poissons téléostéens ne possèdent pas de cortex, zone cérébrale impliquée dans l'apprentissage de concepts chez les mammifères. Ils ne devraient donc pas être capables d'apprendre des concepts. Actuellement, les études se sont essentiellement concentrées sur des espèces qui possèdent un cortex. Quelques unes ont mis en évidence que des animaux dépourvus de cortex sont capables d'apprendre des concepts (insectes: Giurfa *et al.*, 2001 ; oiseaux : Zentall & Hogan, 1974; Blough, 1986). De plus, d'autres études ont mis en évidence que des espèces de vertébrés supérieurs ont une conscience, montrent des comportements d'intelligences, d'altruisme social et des capacités à utiliser des outils, ainsi qu'une variété de compétences qui, chez les mammifères, nécessitent un circuit ganglionnaire corticobasal fonctionnel intact (Karten, 2015). Aussi, utiliser des modèles beaucoup plus simples peuvent suffire à expliquer l'importance du cortex dans l'apprentissage des concepts. Si des animaux sans cortex sont capables d'effectuer des tâches spécifiques, des systèmes corticaux spécialisés pourraient ne pas être nécessaires. Mais dans ce cas, quel est le substrat neurobiologique de ce comportement commun ? Inversement, s'ils ont du mal à accomplir une tâche, cela peut indiquer que le cortex contribue grandement au traitement de la tâche (Newport, Wallis & Siebeck, 2014; Karten, 2015).

Deux concepts abstraits communément étudiés sont ceux de l'appariement et de l'étrangeté. Le concept de l'appariement est testé à l'aide d'un test MTS (« Matching-To-Sample »). Il s'agit d'un test en deux temps. Dans un premier le poisson visualise une première image appelé un « sample » (S). Dans un second temps, il doit le faire correspondre à un stimulus de comparaison (S+) en présence d'un stimuli distrayant (S-). Lors de ce test, le sample peut rester présent quand les stimuli apparaissent. On parle alors de MTS simultané (MTSs). Mais, il peut aussi disparaître. On parle alors de MTS retardé (MTSd). Ce dernier fait alors appel à la mémoire de travail. Le concept de l'étrangeté, quant à lui, peut être réalisé à l'aide de deux tests. Le premier est le test OFS (« Oddity-From-Sample »). Il est réalisé sur le même principe que le MTS sauf que l'animal ne doit pas sélectionner le stimulus de comparaison mais le stimulus distrayant. Il peut être simultané (OFSs) ou retardé (OFSd). Le second est le test OOO («Odd-One-Out »). A l'inverse des autres tests où les images apparaissent progressivement, pour ce test, l'ensemble des images apparaissent simultanément. L'animal doit alors identifier le stimulus différent d'un groupe de stimuli distrayants identiques.

Selon le test et son concept, la finalité de l'étude est différente. Les tests MTSs, OFSs et OOO permettent d'évaluer si les animaux sont en capacité d'apprendre des concepts en se basant sur de la discrimination visuelle. Ces tests sollicitent ainsi l'ensemble des mémoires précédemment décrites, sur le long terme, pour l'apprentissage de l'utilisation du dispositif expérimental (passage au travers une trappe, vision d'un écran, activation d'un poussoir...), et le court terme, pour l'application des concepts (Calandreau, communication personnelle). Le MTSd et le OFSd le permettent également et évaluent, en plus, la capacité de mémoire de travail des poissons (Newport, Wallis & Siebeck, 2014), une forme de mémoire déclarative, sémantique et à court terme, faisant peut être appel à la mémoire épisodique (Calandreau, communication personnelle).

Ces tests ont tous été réalisés chez les poissons. En 1979, Goldman et Shapiro ont réalisé les tests OFSs, MTSs et OOO, basés sur un choix de couleurs chez le poisson rouge (*Carassius*

*auratus*). Les poissons ont réussi à apprendre les consignes. Cependant, aucun test de transfert, appliquant la consigne à d'autres items (formes, catégories...), et vérifiant donc que les poissons étaient capables d'élaborer un concept, n'a été fait (Goldman & Shapiro, 1979). De plus, cette première étude n'a pas évalué la mémoire de travail.

En 1983, Zerbolio et Royalty ont de nouveau réalisé un test MTSs et un test OOO, basés sur des choix de couleur en appliquant un test de transfert. Les résultats ont permis de confirmer que les poissons rouges intègrent les principes d'appariement et d'étrangeté. Ces auteurs ont également évalué la capacité des poissons à changer de concept. Ils ont ainsi mis en évidence que les poissons rouges passent plus facilement du test OOO au test MTSs et que leurs performances sont meilleures que dans la situation inverse (Zerbolio & Royalty, 1983).

En 2013, Gierszewski et ses collaborateurs ont réalisé chez une espèce de cichlidés (*Pseudotropheus sp.*) un test MTSs basé sur le choix des formes. Les formes choisies ont été présentées aux poissons soit sous leur forme d'origine, soit sous leur forme miroir, c'est à dire reflétée selon un axe vertical ou horizontal. Les résultats ont montré que les cichlidés sont capables de résoudre des concepts et que la reconnaissance des formes se fait plus facilement lorsqu'elle est reflétée selon un axe vertical (Gierszewski, Bleckmann, and Schluessel 2013).

L'année suivante, Newport et ses collaborateurs ont étudié les capacités cognitives du poisson archer (*Toxotes chatareus*). Dans une expérience, les poissons archers étaient soumis à un test OOO, un test OFSd et un test OFSs, tous basés sur le choix de forme. Les poissons archers n'ont pas réussi à comprendre les concepts (Newport, Wallis & Siebeck, 2014).

Afin de s'assurer que le problème ne provenait pas du protocole, ces mêmes auteurs ont réalisé, l'année suivante, un nouveau test basé sur le concept de similarité / différence, consistant à choisir entre deux stimuli composés chacun de deux items. Les deux items différents correspondaient au stimulus renforcé dans le cas du concept de différence et les deux items identiques étaient renforcés dans le cas du concept de similarité. Les poissons archers n'ont pas mieux réussi à appliquer les concepts (Newport, Wallis & Siebeck, 2015).

La question de la compréhension de concepts reste donc encore à éclaircir chez le poisson, et plus particulièrement chez la truite arc-en-ciel, espèce aquacole pour laquelle il existe, à notre connaissance, aucune étude sur le sujet.

Depuis plusieurs années en Europe, la question du bien-être animal, en particulier des animaux d'élevage, est au cœur des préoccupations des citoyens. Plusieurs pays européens comme la France, l'Allemagne, les Pays-Bas et la Suisse considèrent que les animaux sont des « êtres doués de sensibilité ». En France, le statut de l'animal a ainsi changé dans la réglementation en janvier 2015 (Code Civil - Article 515-14). Ces changements et ces nouvelles préoccupations imposent de mieux comprendre comment les animaux de rente perçoivent, traitent et ressentent les informations de leur environnement ou les expériences qu'ils vivent. Pour cela, il est indispensable de mieux caractériser leurs capacités cognitives afin de considérer au mieux le statut des animaux de rente.

Jusqu'à présent, les capacités cognitives des poissons à appliquer des concepts abstraits n'ont été évaluées que sur trois espèces, mais aucune de ces espèces n'est aquacole. De même, l'élaboration de concepts et certaines prouesses cognitives (fabrication d'outils, dénombrement, machiavélisme) sont reconnues chez certains animaux (dauphins : Herman *et al.*, 1989 ; primates : Yerkes & Nissen, 1939; Overman & Doty, 1980 ; corvidés : Clayton *et al.*, 2001; Goto & Waranabe, 2009; Smirnova, Lazareva & Zorina, 2000; Olsen *et al.*, 1995) faisant ainsi émerger la notion de conscience (de l'environnement, de soi et du temps) chez ces animaux. Mais rares sont les études qui se sont intéressées à ces questions chez des animaux d'élevage. Aussi, le département Physiologie Animal et Système d'Élevage (PHASE) de l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) a financé un projet pour la mise en place d'une « Approche comparée pour une caractérisation des capacités

cognitives des animaux de rente ». L'objectif est de développer et d'adapter, aux différentes espèces étudiées, une méthodologie commune. Elle serait validée en cognition comparée, et basée sur des tests d'apprentissage de concepts pour questionner l'existence de plusieurs fonctions cognitives dites de haut niveau comme la mémoire de travail, la capacité à catégoriser des items ou à élaborer des concepts et, à terme, la métacognition (capacité d'un individu à estimer le niveau de ses connaissances). Ce projet pluri-spécifique, s'échelonnant sur quatre années, s'intéresse à quatre modèles d'animaux de rente : deux modèles de mammifères domestiques (cheval, mouton), ainsi que la poule pondeuse et la truite arc-en-ciel, deux espèces emblématiques des productions avicoles et piscicoles. La truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*) est, en effet, la première espèce produite en France avec 37 200 tonnes produites en 2016. Elle place la France au cinquième rang des producteurs aquacoles européens (FEAP 2017).

Le travail, présenté ici, vise à **mettre en place l'étude concernant l'évaluation des capacités cognitives élaborées de la truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*)** ».

Les truites étudiées ont été placées dès l'alevinage dans un environnement enrichi, le but étant de stimuler leurs capacités cognitives. (1) Dans un premier temps, le comportement, la proximité et la préférence des truites vis-à-vis des divers objets qui composent leur environnement ont été évalués. (2) Parmi ces individus, une sélection basée sur la vitesse d'apprentissage spatiale dans un labyrinthe a été réalisée. Lors de cette sélection, deux types d'aliments avec un facteur d'appétence différent ont été comparés afin d'évaluer l'impact du facteur d'appétence de la récompense alimentaire sur la vitesse d'apprentissage. (3) Enfin, les truites qui ont reçu l'aliment ayant le plus grand facteur d'appétence, ont été entraînées à un paradigme de conditionnement opérant, pour la réalisation de tests visant à évaluer la capacité des truites à élaborer différents concepts.

## 2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

---

### 2.1. Bien-être et réglementation

L'ensemble des pratiques réalisées sur les truites arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*) a été fait dans le respect de la directive CE 2010/63/EU du parlement européen et du conseil du 22 septembre 2010, relative à la protection des animaux utilisés à des fins scientifiques. Elle a été approuvée par le Comité Rennais d'Éthique pour l'Expérimentation Animale et a reçu l'autorisation du Ministère de l'Enseignement, de la Recherche et de l'Innovation (numéro de dossier : 201806050954214-V1-APAFIS#15361).

### 2.2. Modèle d'étude

#### 2.2.1. La souche

Des truites arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*) triploïdes et monosexes femelles, ont été conçues le 8 novembre 2017 à la Pisciculture Expérimentale INRA des Monts d'Arrées (PEIMA), Sizun (29). Ces individus résultent d'un pool d'ovocytes de trois femelles, de souche automnale, fécondées avec du sperme congelé de trois mâles monosexes. A 10°C, 40 minutes après la fécondation, les œufs ont subi un choc hyperbar (3 minutes à 700 bars) afin de bloquer l'éjection du premier globule polaire. De cette façon, 800 œufs homogames femelles et triploïdes (3n) ont été obtenus (Annexe I).

Pour cette expérimentation, les truites seront élevées pendant 3 ans. Or, chez la truite arc-en-ciel, la maturation sexuelle a lieu vers 1-2 ans pour les femelles et 2-3 ans pour les mâles. La

triploïdie permet donc dans cette étude de s'affranchir de la maturation sexuelle, un facteur pouvant induire un biais comportemental. Ceci est d'autant plus vrai chez les mâles qui développent un comportement agressif lors de la maturation sexuelle, raison pour laquelle la lignée est homogame femelle.

### 2.2.2. Les conditions d'élevage

Entre 1 et 20 hpf, les œufs sont transférés au laboratoire de Physiologie et Génomique des Poissons (INRA - LPGP), Rennes (35). Le transport se fait à sec, dans des flacons placés à 4°C (sur glace). A leur arrivée, les œufs sont répartis dans quatre incubateurs par lot de 200 œufs. Durant la période d'incubation, les œufs sont placés à 10°C à l'obscurité. Aucun traitement et aucune manipulation ne sont réalisés pour ne pas induire de stress, pouvant impacter leur développement. A 20 jpf, au stade œillé, les œufs morts sont retirés, sauf si un développement de champignons est observé préalablement. A 33 jpf, l'éclosion a lieu. A 50 jpf, 80 larves exemptes de malformations sont sélectionnées (20 par incubateurs), puis passées en phase d'alevinage (2 réplicats de 40 truites puis de 15 truites). Dans cet environnement, la densité d'élevage n'excède pas 20 kg/m<sup>3</sup> et cherche par la suite à être maintenue entre 20 et 30 kg/m<sup>3</sup>, une densité qui favorise leur bien-être en élevage (Person-Le Ruyet *et al.*, 2008). Pour respecter cette densité, des transferts de bassins ont eu lieu. De 50 jpf à 180 jpf, les truites sont élevées dans des bassins de 100L (67 cm x 47 cm x 44,5 cm), puis transférées dans des bassins de 72L (55cm x 45 cm x 59 cm). Dès la phase d'alevinage, des éléments d'enrichissement (plantes, galets et tube en PVC) sont ajoutés à l'environnement. Lors de la phase d'alevinage et de croissance, les truites sont stockés à 12°C ± 0,2°C et à une photopériode artificielle de 12:12.

### 2.2.3. L'alimentation

Au stade larvaire, les larves s'alimentent uniquement sur leur réserve vitelline. A partir de 50 jpf (début de la phase d'alevinage), lorsque la réserve vitelline est résorbée, de l'aliment extrudé et coulant (société BioMar, Bio optimal start 72) leur est distribué quatre fois par semaine, afin de limiter leur croissance du fait de la durée de l'expérience. Au cours de leur croissance (Annexe II), la granulométrie et le taux de rationnement sont ajustés (Tableau 1). Aussi, des changements de bassin sont réalisés et le mode de distribution de l'aliment est modifié, passant d'une distribution avec un distributeur automatique, en bassin de 100L, à une distribution manuelle.

Tableau 1 : Synthèse de l'évolution de la granulométrie de l'aliment distribué et du taux de rationnement journalier au cours de la croissance des truites.

Poids moyen (g)	Granulométrie (mm)	Taux de rationnement (%)
Pendant les 15 premiers jours d'alimentation	0,5	5
≤ 0,6	0,5	3,8
0,6 - 1,5	0,8	3,5
1,5 - 5	1,1	3,1
5 - 15	1,5	2,6
15 - 80	1,9	2

### 2.2.4. Vérification de la triploïdie

A 97 jpf, 32 des truites issues du même pool de fécondation que les truites sélectionnées pour la suite de l'expérimentation, élevées dans des conditions identiques mais en environnement conventionnel, sont utilisées pour la vérification de la ploïdie. Trois truites diploïdes de même âge, issue d'une souche différente, sont utilisées comme témoin.

Ces truites sont euthanasiées dans une solution de tricaine à 200mg/L tamponnée avec du bicarbonate de soude à 200mg/L. Environ 50  $\mu$ L de sang sont prélevés puis dilués au 2/100<sup>ème</sup> dans du CyStain® UV Ploidy. Il s'agit d'une solution contenant un détergent, permettant de lyser les cellules, et du DAPI ( $C_{16}H_{15}N_5$ ) et un intercalant de l'ADN chromosomique ayant des propriétés fluorescentes (fluoromarqueur). Après l'ajout de la solution de CyStain® au sang, la ploïdie des échantillons est évaluée à l'aide d'un cytomètre MACSQuant®10, à une longueur d'onde de 405nm (Figure 3). Les résultats révèlent que la triploïdie est atteinte chez 100 % des individus testés.

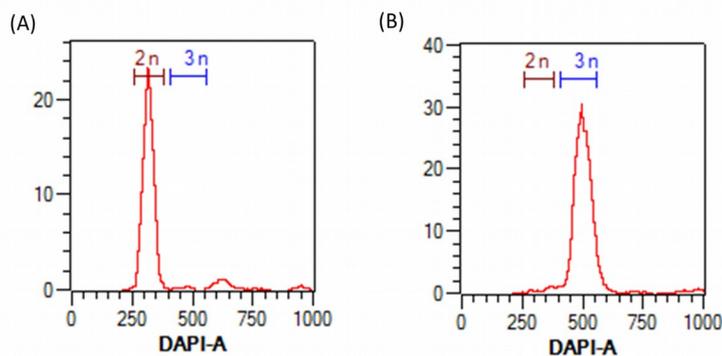


Figure 3 : Nombre de cellules marquées (représentant la quantité d'ADN) en fonction de l'intensité de la fluorescence. Ces courbes ont été obtenues suite à l'analyse de la ploïdie par cytométrie. La ploïdie est définie par la position du pic sur l'axe des abscisses. Plus le pic est à droite plus la ploïdie est élevée (triploïde) et inversement.

### 2.3. Expérience 1 : Environnement enrichi et interactions des truites avec les éléments qui le composent

Plusieurs études ont démontré que l'enrichissement du milieu stimule les capacités cognitives chez de nombreux animaux (souris : Krezymon, 2012 ; macaques : Moureaux, 2005 ; céphalopodes : Mather & Dickel, 2017) dont les poissons téléostéens (Ebbesson & Braithwaite, 2012). Or, ce type d'approche n'a encore jamais été mis en place chez la truite arc-en-ciel (*O. mykiss*). Cette étude pilote a donc pour premier objectif d'apprécier les comportements et les interactions (par la proximité) des poissons avec les objets présents dans leur environnement afin de mettre en évidence d'éventuelles préférences pour certains de ces objets.

A 50 jpf, début de la phase d'alevinage, 80 truites (deux réplicats de 40 truites) sont placées dans deux bassins de 100 L (bassins 401 et 402), en environnement enrichi. Dans chaque bassin, deux plantes d'aquarium en plastique (environ 25 cm de haut) et deux galets blancs (environ 10 cm x 5 cm) sont placés. Jusqu'à 71 jours, ces objets ne sont pas changés de place. De 72 jpf à 109 jpf, ils sont changés de place tous les deux jours. A 100 jpf, un tube en PVC (80 x 3,0 mm) est ajouté. De cette façon, les truites sont habituées très tôt à des modifications régulières de leur environnement, afin de stimuler leurs capacités cognitives.

Entre 110 et 118 jpf, six sessions d'observations sont réalisées simultanément dans deux bassins composés de 37 et 38 poissons, respectivement. Pour une même session, deux « scans

sampling » de 20 minutes sont réalisés : l'un à 11h et l'autre à 15h. Le déroulement d'un scan est le suivant. Tout d'abord, cinq minutes d'acclimatation sont laissées aux truites pour qu'elles s'habituent à la présence de l'observateur, situé à une quinzaine de centimètres du bassin. Puis quatre photos des bassins sont prises toutes les cinq minutes, à une trentaine de centimètres au-dessus de la surface (Figure 4). Les photos sont analysées à posteriori, afin de dénombrer le nombre de truites autour de chaque objet. Lors de l'analyse, les truites dont la totalité du corps, la moitié du corps ou seulement la tête sont présentes dans une zone de huit centimètres autour de l'objet (dimensions réelles) sont considérées comme étant à proximité de l'objet observé (Figure 5). De plus, entre la prise des photos 1 et 2 et des photos 2 et 3, soit pendant deux périodes de cinq minutes, le nombre de passages dans le tube en PVC est compté (Figure 4). Seules les truites dont la totalité du corps est rentré perpendiculairement dans le tube et les truites totalement sorties puis à nouveau rentrées sont dénombrées. A chaque session, l'ordre d'observation des bassins est inversé. Suite au test, les objets continuent à être déplacé tous les deux jours (de 72 jpf à 128 jpf).

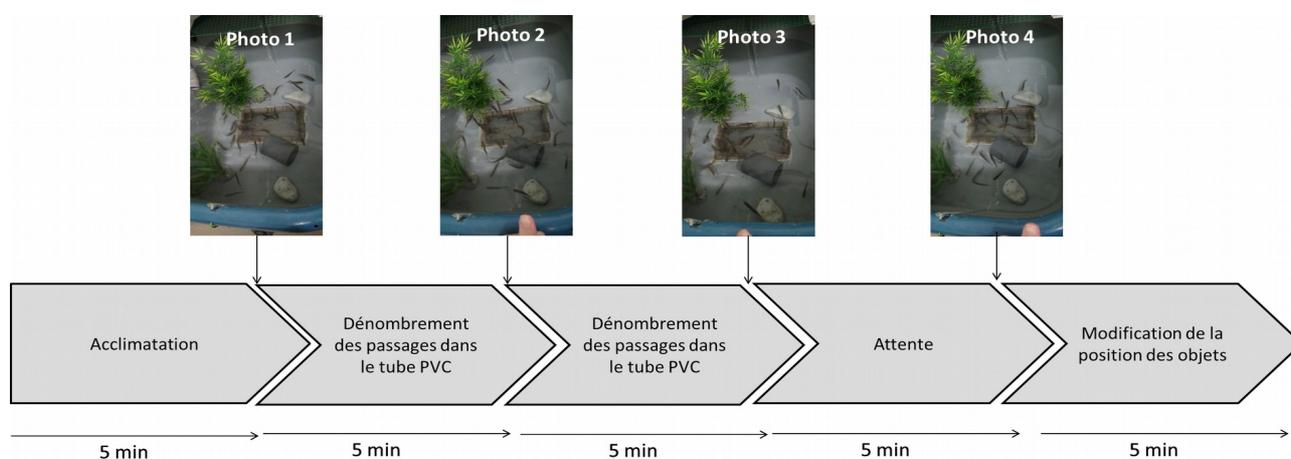


Figure 4 : Déroulement type d'un « scan sampling » visant à évaluer les interactions des truites avec les objets présents dans leur environnement. Sur les photos présentes, apparaissent l'ensemble des objets qui composent l'environnement : plantes d'aquarium en plastique, galets blancs et tuyaux en PVC. © Manon PEYRAFORT, 2018, INRA-LPGP

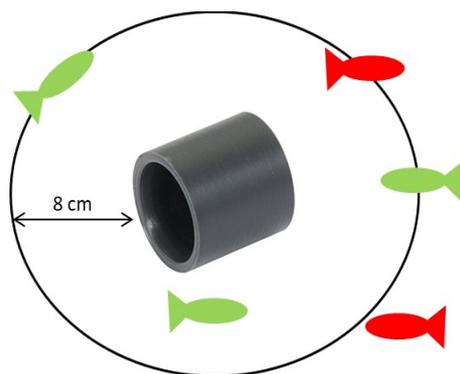


Figure 5 : Méthode de comptage utilisée pour évaluer la proximité des poissons avec les objets de leur environnement. En rouge sont représentés les poissons non dénombrés et en vert ceux dénombrés dans la zone de 8 cm autour de l'objet. © Manon PEYRAFORT, 2018, INRA-LPGP

#### [2.4. Expérience 2 : Évaluation des capacités d'apprentissage et sélection](#)

### 2.4.1. Motivation alimentaire et apprentissage

Au cours du test d'apprentissage en labyrinthe en T (paragraphe 2.4.2), deux types de récompense de facteur d'appétence différent sont distribués afin d'évaluer si le facteur d'appétence induit une motivation alimentaire qui stimule la vitesse d'apprentissage des truites.

Pour cela, parmi les deux sessions passées en alternance, l'une reçoit un aliment de la société BioMar (Bio optimal start 72 de granulométrie 1,1 mm), couramment distribué en élevage (n=36), tandis que l'autre reçoit le même aliment auquel la société Diana Aqua (n=36) a ajouté un enrobage. L'aliment enrobé est composé à 0,25 % d'huile de poissons et à 3,60 % d'un mélange appétant d'hydrolysats de poissons et de crevettes, ce qui n'est pas le cas de l'aliment d'élevage.

### 2.4.2. Apprentissage en labyrinthe

Après avoir évalué le comportement des truites dans leur environnement enrichi, l'étude pilote a eu pour second objectif, non seulement d'écarter notre lot de truites, mais aussi de sélectionner les truites ayant les meilleures capacités d'apprentissage spatial. On suppose que ces truites seront ensuite plus performantes lors des tests de conditionnement.

De 131 à 149 jpf, 72 des truites précédemment observées (36 truites par bassin) réalisent un test d'apprentissage dans un labyrinthe en T (Figure 6). Ce test est réalisé en 12 sessions. Chaque session est composée de 7 trials et réalisée sur deux jours. Au sein d'une même session, 6 truites sont passés simultanément dans 6 labyrinthes en T identiques, au-dessus desquels sont placées des caméras (Samsung SCB-3000PH). Deux sessions sont passées en alternance sur deux jours. Les truites de l'une ont reçu de l'aliment standard et les autres truites de l'aliment enrobé. Un même dispositif est alloué à deux truites qui passaient en alternance : pendant qu'une truite s'entraînait, une autre était en attente dans un bassin d'attente et inversement. De cette façon, 12 truites sont entraînées en deux jours.

Préalablement au test, les truites sont stockées individuellement dans des bassins d'attente de 8L (30 x 19 x 30 cm), à jeun durant 24h. Ces bassins sont adjacents aux bassins contenant les labyrinthes en T. Puis chaque truite est placée individuellement au centre du labyrinthe et une heure leur est laissée pour explorer le dispositif. Il s'agit de la phase d'acclimatation au dispositif. Elle a pour but d'éviter que la découverte d'un nouvel environnement (ici le labyrinthe), induise un biais d'apprentissage et un stress lors du test. Suite à cette première phase d'acclimatation, le test débute. Lors du premier trial, la truite est placée dans la zone d'acclimatation fermée par une trappe, durant 25 min. Ce délai passé, la trappe est ouverte par un système de volet roulant (vitesse de 2,79 cm/s), commandé à distance par l'expérimentateur, pour ne pas induire un biais comportemental. Le poisson a alors une heure pour se diriger vers la branche du labyrinthe visuellement marquée d'une croix. Selon le labyrinthe la croix n'est pas du même côté (n=3 à droite et n=3 à gauche). Lorsque le poisson pénètre dans la zone du côté de la croix, un poussoir contenant à son extrémité une dose d'aliment est enclenché à distance par l'expérimentateur qui suit l'évolution du poisson sur un moniteur dans une pièce adjacente. Ainsi la truite reçoit instantanément une récompense sans être perturbée par une présence humaine (Figure 6).

Le premier trial dure une heure, tandis que les trials 2 à 7 durent 30 minutes (Figure 6). Après la distribution de la récompense, même si le poisson reçoit sa récompense avant la fin du trial, la durée restante du trial lui est laissée afin de ne pas perturber les truites voisines qui n'ont pas

encore atteint la zone récompensée. Lorsque les six truites passées simultanément ont reçu leur récompense, cinq minutes sont laissées à la dernière pour qu'elle puisse consommer l'aliment. Les six truites sont ensuite pêchées en même temps et placées dans leur bassin d'attente respectif. Pour les truites issues des sessions 5 à 12 (n=16), à la fin de chaque trial est évaluée la consommation totale, partielle ou l'absence de consommation de l'aliment (totalité des granulés visibles au fond du bassin).

A posteriori, les vidéos (486 au total) de chaque trial et de chaque truite sont visionnées à l'aide du lecteur multimédia VLC. Pour l'ensemble des vidéos, le temps de latence de sortie de la zone d'acclimatation est évalué. Il s'agit du temps nécessaire à la truite pour sortir de la zone d'acclimatation dès lors que la trappe a commencé à s'ouvrir + 2s. Le temps de latence avant de recevoir la récompense est aussi mesuré. Il s'agit du temps nécessaire à la truite pour se diriger vers la branche du labyrinthe qui contient la croix, à partir du moment où elle est sortie de la zone d'acclimatation.

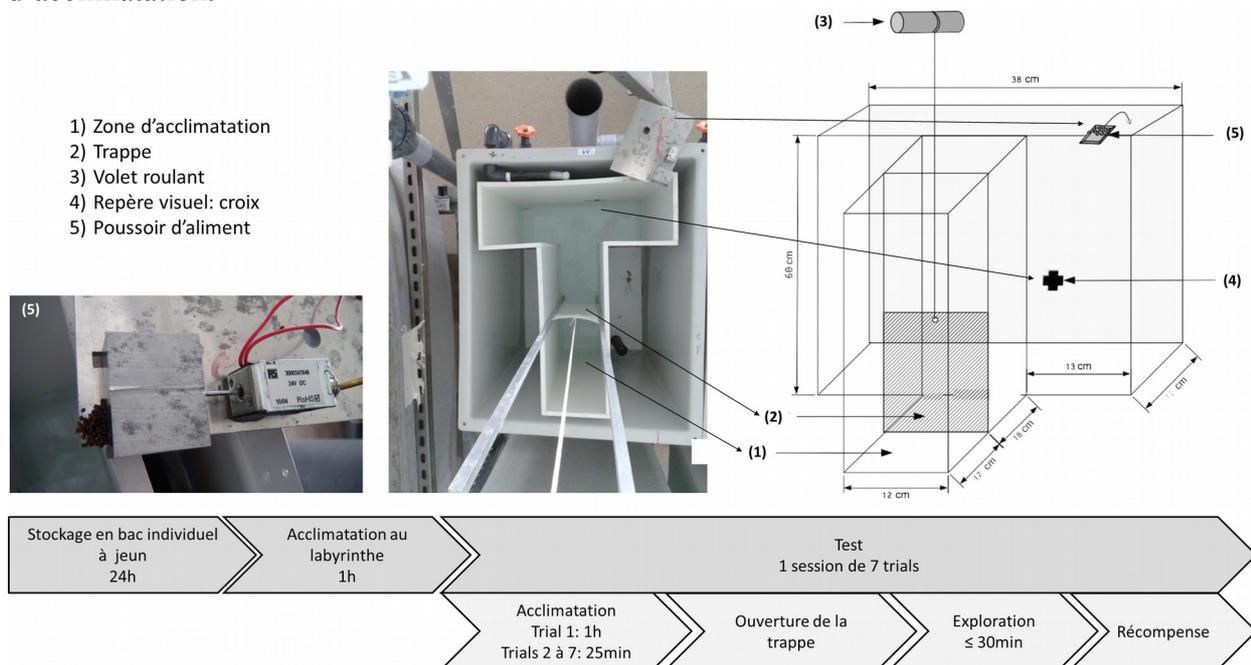


Figure 6: Représentation schématique du déroulement du test d'apprentissage en labyrinthe en T (en bas) et son design expérimental (en haut). © Manon PEYRAFORT, 2018, INRA-LPGP

### 2.4.3. Marquage

Les 30 truites les plus rapides sont sélectionnées sur leur vitesse d'apprentissage (critère basé sur le temps de latence entre l'ouverture de la trappe et le moment où la truite reçoit la récompense) puis elles sont marquées individuellement. Préalablement au marquage, les truites sont anesthésiées avec une solution de tricaine à 50mg/L tamponnée avec 50mg/L de bicarbonate de soude (session 1 à 4) ou une solution de lidocaïne à 100mg/L tamponnées dans 1g/L de bicarbonate de soude (session 5 à 12). Ce changement en cours d'expérience a eu lieu suite aux conseils d'un vétérinaire car la lidocaïne posséderait un effet analgésiant que ne possède pas la tricaine. Depuis, suite aux conseils d'un autre vétérinaire, ces doses ont été revues à la baisse au laboratoire et l'administration de lidocaïne (2-5 mg/L) se fera en pré- et post- opératoire pour l'analgésie, en complément d'une baignade à la tricaine (168 mg/L) qui reste nécessaire pour l'anesthésie. Une fois le poisson endormi, une puce électronique de 1,4 x 8 mm Biolog-Tiny (société Biolog-id) est

injectée en sous-cutanée en amont de la nageoire dorsale avec une aiguille de 1,75 mm de diamètre. Puis, la zone d'introduction de l'aiguille est séchée et une goutte de cyanoacrylate est appliquée sur la plaie afin d'éviter la sortie de la puce (Figure 7). Après chaque marquage, les poissons sont placés par trois dans un bassin de transfert non enrichi de 50 L (67 x 23,5 x 44,5 cm) durant 3 à 5 jours afin de s'assurer de la bonne tenue de la puce et de surveiller leur santé. Les truites de la session 7 et 8 suspectées de flavobactérie sont euthanasiés avec une dose létale de tricaine à 100mg/L tamponnée avec 100mg/L de bicarbonate de soude. Selon le type de récompense reçu, les poissons sont répartis dans deux bassins de 100 L enrichis (deux réplicats de 15 individus) dans lesquels ils sont laissés jusqu'à l'âge de 180 jpf (6 mois). Les objets continuent d'être changés de place deux fois par semaine.

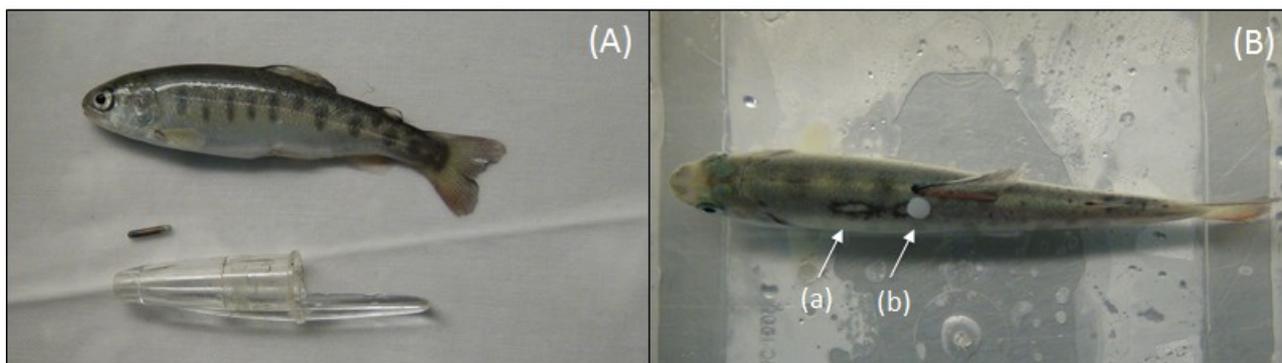


Figure 7 : Marquage des truites. La photo (A) met en évidence la taille de la puce par rapport à celle des truites au moment du marquage. La photo (B) présente une truite après injection de la puce en sous cutané. Sur cette photo la zone d'implantation de la puce (a) et le point de cyanoacrylate (b) sont visibles. © Manon PEYRAFORT, 2018, INRA-LPGP

## **2.5. Expérience 3 : Conditionnement opérant au vu de l'apprentissage de concepts**

### **2.5.1. Le dispositif**

Les truites sont placées individuellement dans un bassin de test de 780 L (55 x 45 x 59 cm) aux parois peintes en gris foncé (code RAL: 7005). Ce bassin est muni d'une vitre en plexiglas transparente (63 x 38 cm) derrière laquelle est apposée un écran LCD Dell REV A00 (17 pouces ; 60 x 34 cm) qui permet l'affichage des stimuli. Un petit jour étant présent sur les bords de l'écran, un drap noir est placé derrière afin de ne pas induire de perturbation et permettre que la truite reste concentrée sur l'écran lors des tests. A 8,5 cm de l'écran, dans sa partie supérieure, sont placées deux ou trois tiges de self-feeder (amovibles selon les besoins), immergées de 9 cm. Ces tiges sont insérées à leur extrémité dans un cylindre dans lequel des disques de mousse entourent la tige. Ces disques ont pour but de renforcer la résistance de la tige lorsque la truite exerce une pression volontaire dessus (résistance proportionnelle à la taille du poisson). Ainsi, lorsque les truites grandiront, trois disques de mousse d'épaisseurs différentes, permettant trois gradations de résistance, seront utilisés. La pression exercée par la truite sur la tige représente un angle d'inclinaison entre 5 et 6°. Lorsque cet angle est atteint, une puce électronique placée à l'intérieur du cylindre valide la réponse. Le cylindre des self-feeders est relié à un distributeur automatique d'aliment, composé de 28 godets (IMetronic, France). Lorsque les tiges sont activées, le contenu d'un godet est versé. Chaque godet est rempli d'aliment enrobé préalablement enduit de farine de blé pour éviter que les granulés ne restent collés. Un godet contient environ 1/6<sup>ème</sup> du taux de rationnement journalier (Tableau 1). Le godet est versé dans un entonnoir relié à un tube plastique de 1,5 cm de diamètre qui achemine et dépose la récompense en surface, à 42 cm de l'écran (Figure 8).

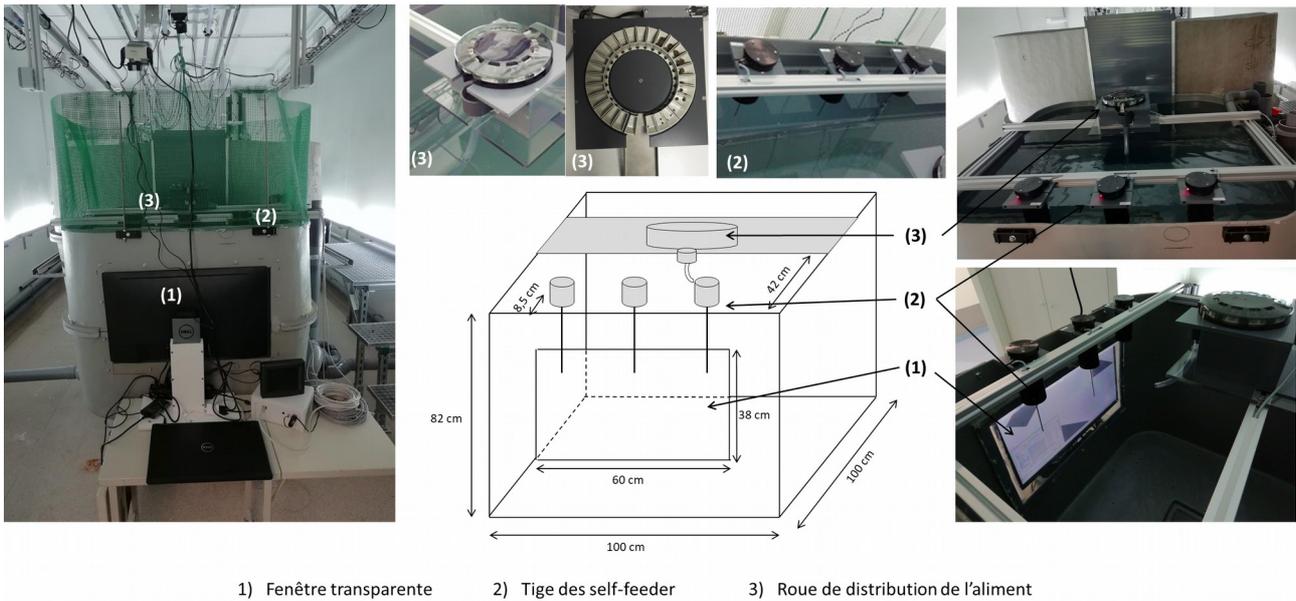


Figure 8 : Bassin de test pour l'apprentissage des concepts. Sur ce schéma et sur les photos sont présentés les différents composants du dispositif expérimentale. © Manon PEYRAFORT, 2018, INRA-LPGP

Le déroulement des tests est géré par le logiciel POLY M2S (IMetronic, France), logiciel de gestion des expériences. Il permet à l'utilisateur de choisir le type d'expérience à réaliser, la position des stimuli et du sample sur l'écran (Figure 9), ainsi que le type de choix sur lequel est réalisé l'apprentissage de concepts (forme ou couleur par exemple). Ce logiciel permet également la gestion des stimuli afin qu'un S+ n'apparisse jamais plus de 2 fois de suite à la même position, ainsi que la gestion de combinaisons aléatoires. En fin d'expérience, le logiciel permet d'obtenir un tableau de synthèse du déroulement du test, le nombre de réponses correctes, le nombre de « Cutt-Off » (absence de réponse), les stimuli utilisés et leurs positions relatives.

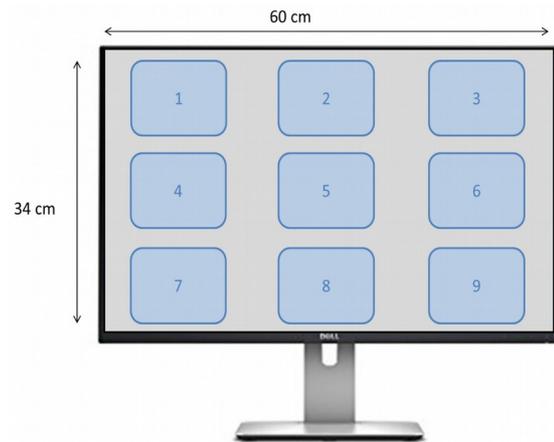


Figure 9: Positions des stimuli et du sample sur l'écran. Les stimuli sont affichés en position 1, 2 ou 3. Le sample est affiché en position 8. © Manon PEYRAFORT, 2018, INRA-LPGP

Une caméra a été placée au dessus du dispositif (©Samsung SCB-3000PH). Elle est reliée à un moniteur (Ever-Focus® Color TFT LCD monitor) pour permettre à l'utilisateur de visualiser les déplacements de la truite au cours du test sans perturber son comportement. Sur quelques sessions, une GoPro Hero3 a également été placée dans le bassin de test afin d'observer le comportement des truites sur quelques minutes et d'avoir une vision du dispositif identique à celle des truites.

### 2.5.2. Entraînement à l'utilisation du dispositif

A 180 jpf (6 mois), les 30 truites sélectionnées en labyrinthe sont transférées dans deux bassins de 72 L (55 x 45 x 59 cm), toujours enrichis, et réparties selon le type de récompense reçu lors de la sélection en labyrinthe.

A partir de 197 jpf, les 15 truites qui ont reçu une récompense enrobée lors de la sélection en labyrinthe, et donc déjà habituées à ce type d'aliment, sont placées individuellement dans le dispositif expérimentale afin de débiter les premiers entraînements.

### 2.5.2.1. Exercice 1 : Entraînement à l'activation d'une tige

**Session 1** (Figure 10.A). Au lancement du test, l'écran s'affiche en gris clair (code RGB : #EEECEC), couleur réduisant le contraste avec la couleur du bassin d'essai. A partir de ce moment-là, le poisson a 10 minutes pour activer l'une des trois tiges du self-feeder. Si le poisson active une tige avant la fin de ce délai, il reçoit une récompense d'aliment enrobé. En parallèle, l'écran devient vert (code RGB : #0F790F) pendant 60 secondes. Il s'agit d'un renforcement positif (Zerbolio & Royalty, 1983), la couleur verte étant appréciée par les truites (Luchiari & Pirhonen, 2008). Puis l'écran redevient gris durant 10 secondes. Il s'agit de l'« Inter Trial Interval » (ITI), période de transition entre deux trials au cours de laquelle les tiges sont inactivables. Si le poisson n'active pas l'une des tiges avant que les 10 minutes ne soient écoulées, une récompense lui est automatiquement distribuée et le trial s'arrête. On parle ici de « Cut Off ». Ensuite, un ITI de 10 secondes débute. L'écran reste gris clair (code RGB : #EEECEC) et un nouveau trial débute.

Au cours de cette première session d'entraînement, la truite réalise cinq trials consécutifs. Il s'agit d'une session de découverte du nouvel environnement de travail. Elle a pour but de faire comprendre aux truites que dans cet environnement, de l'aliment enrobé sera distribué.

**Sessions 2 et plus** (Figure 10.B). Les sessions qui suivent (session 2 et plus) fonctionnent de façon similaire à celles présentées précédemment à deux exceptions près : 1) si la truite réalise un cut-off en fin de trial elle ne reçoit pas de récompense ; 2) ces nouvelles sessions sont plus longues que la première puisqu'elles se composent de 10 trials successifs et non 5.

Les sessions 1 et 2 sont enchaînées puis la truite est remplacée avec ses congénères. A partir de la session 3 et après chaque session la truite est systématiquement remise avec ses congénères afin de ne pas induire de stress lié à un isolement social. L'entraînement est réalisé au minimum une fois par semaine et jusqu'à ce que les truites atteignent ou dépassent un taux d'activation des tiges de 70 % sur trois sessions consécutives. De cette façon, il est vérifié que les truites ont réellement compris comment activer la tige et qu'il ne s'agit pas d'activations accidentelles. Lorsqu'une truite atteint ce seuil, elle est entraînée à l'exercice suivant (paragraphe 2.5.2.2).

Au cours de cette première phase d'entraînement, une stratégie est mise en place. Les 15 truites sont entraînées jusqu'à la session 4 avec un ordre de passage aléatoire. Avant de passer une truite à la session suivante, les 14 autres doivent avoir fini la session en cours. A partir de la session 5 (236 jpf soit 7 mois), un lot de quatre truites (n°4494, n°0379, n°0331 et n°4459), identifiées comme ayant eu les meilleurs taux d'activation, sont passées en entraînement trois fois par semaine (lundi, mercredi et jeudi) afin d'améliorer, davantage encore, leurs performances. A 250 jpf (8 mois), la truite n°0379 n'activant plus les tiges est remplacée par la truite n°0080, cette dernière présentant de bons résultats d'activation. Les deux autres jours de la semaine (mardi et jeudi) les 11 autres truites sont entraînées pour l'exercice 1 dans un ordre aléatoire.

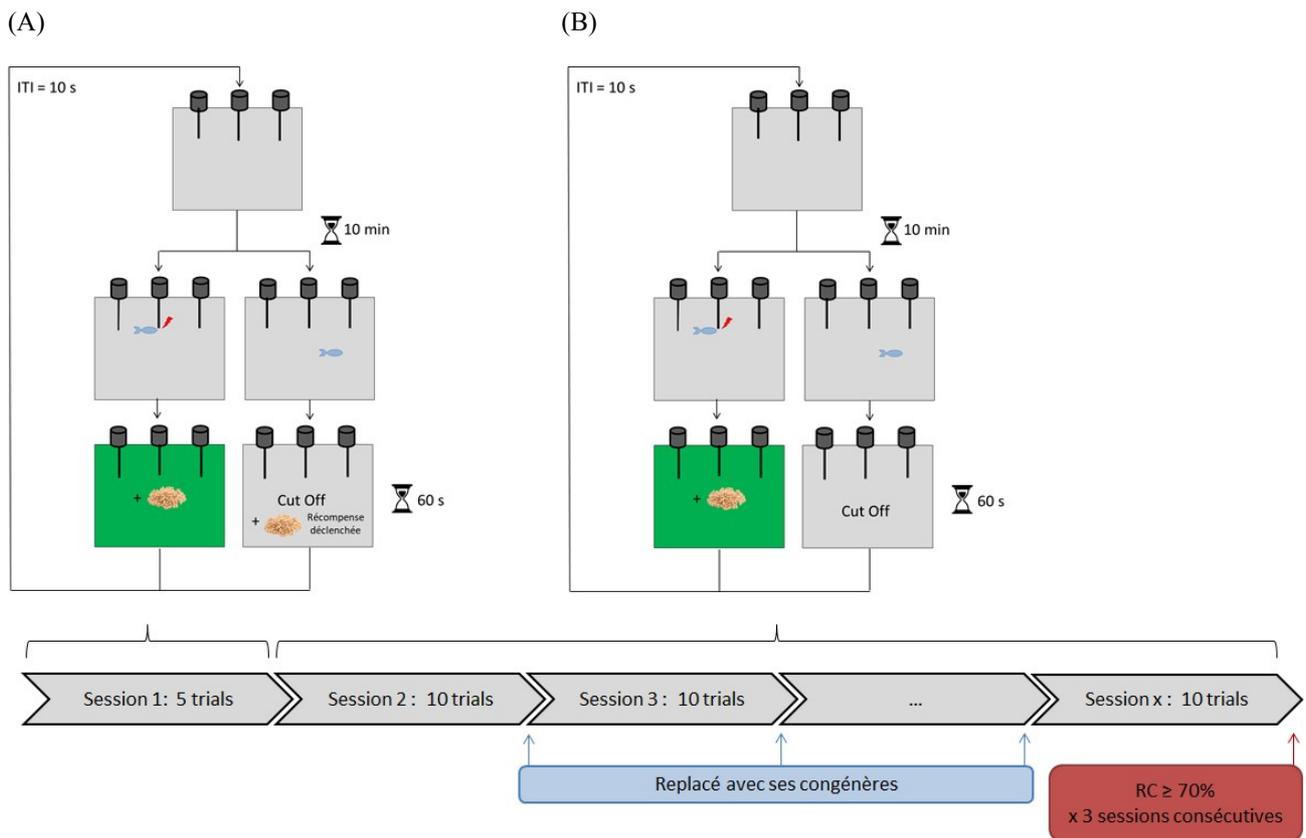


Figure 10 : Entraînement à l'activation de la tige. La truite a à sa disposition trois tiges. Si elle en active une, elle obtient une récompense et un écran vert (A et B : branche de gauche). Si elle n'active rien (cut-off), à la session 1 l'écran reste gris et une récompense lui est quand même donnée (A : branche de droite), tandis qu'aux sessions 2 et plus l'écran reste gris et elle ne reçoit pas de récompense (B : branche de droite). © Manon PEYRAFORT, 2018, INRA-LPGP

### 2.5.2.2. Exercice 2 : Entraînement à l'activation de la tige en lien avec un stimulus

La première exercice validé, les truites ont reçu un second entraînement avec une difficulté supplémentaire. A l'inverse du premier entraînement, les truites ne doivent pas activer au hasard l'une des tiges pour recevoir une récompense. Elles doivent activer la tige du self-feeder au niveau de laquelle est affiché un stimulus.

A son entrée dans le bassin de test, la truite reçoit une récompense alimentaire pour qu'elle associe la pêche à un événement positif. Au début de cet entraînement, l'écran s'affiche en gris clair (code RGB : #EEEECEC). La truite a ensuite 10 minutes pour activer la tige au niveau de laquelle est affiché un stimulus, en position 1, 2 ou 3 (Figure 9 : paragraphe 2.5.1). Au niveau des deux autres tiges aucun stimulus n'est affiché. Si la truite active la bonne tige avant le cut-off, elle reçoit une récompense d'aliment enrobé et l'écran s'affiche vert (code RGB : #0F790F), comme au cours du premier entraînement. En revanche, si la truite active la mauvaise tige, elle ne reçoit pas de récompense et l'écran s'affiche rouge (code RGB : #E90808). Il s'agit d'une couleur que les truites évitent habituellement (Luchiari & Pirhonen, 2008) et qui peut-être assimilé à un renforcement négatif (Zerbolio & Royalty, 1983). Par ailleurs, au cours de l'entraînement la truite peut ne pas activer la tige et atteindre le cut-off. Dans ce cas, l'écran reste gris clair (code RGB : #EEEECEC) et

aucune récompense alimentaire n'est distribuée. Suite au choix de la truite, l'écran de couleur reste affiché durant 20 secondes ce qui lui permet de bien visualiser le stimulus de renforcement coloré et lui laisse le temps de consommer de l'aliment si celui-ci a été reçu. Un ITI de 10 secondes est ensuite marqué par un écran gris. Si la truite active la tige, rien ne s'affiche et aucun aliment ne lui est donné. Ensuite, le nouveau trial débute affichant un nouveau stimulus (Figure 11). Le stimulus n'est pas présent plus de deux fois de suite sur le même emplacement. Aussi, une même forme (Tableau 2) et une même couleur (Tableau 3) ne sont jamais présentées plus de deux fois consécutives. Le stimulus présenté au cours des trials est donc toujours différents.

Les truites ne réalisent pas plus d'une session par jour. Une session se compose de 10 trials consécutifs. En fin de session, la truite est remplacée avec ses congénères. Cette étape se termine lorsque la truite atteint un score de 70 % de réponses correctes au cours de trois sessions consécutives.

Tableau 2 : Formes des stimuli présentées aux truites lors des phases d'habituation, des pré-entraînements et des tests d'application de concept. Des formes arrondies, rectangulaires, triangulaires ou plus ou moins complexes ont été choisies par la société IMetronic. © Manon PEYRAFORT, 2018, INRA-LPGP

Formes arrondies							
							
Rond	Ovale vertical	Ovale horizontal	Quart de cercle	Cercle	Amande	Goutte	Croissant de lune
Formes rectangulaire							
							
Carré	Pentagone	Hexagone	Losange	Drapeau			
Formes triangulaires							
							
Triangle isocèle	Triangle équilatéral	Flèche	Flèche B	Cross	Cœur		
Formes complexes							
							
Étoile 4 branches	Étoile 5 branche	Étoile 6 banches	Boom	Éclair	Nuage	Croix	

Tableau 3 : Couleurs des stimuli présentés aux truites lors des phase d'habituation, des pré-entraînements et des tests d'application de concept. Des couleurs appréciées par les truites, non appréciées et neutres leur sont présentées. Sous chaque couleur est indiquée son code RGB et le nom la caractérisant. © Manon PEYRAFORT, 2018, INRA-LPGP

Couleurs non appréciées				
				
#FF00FF Rose	#FF0000 Rouge	#FF8000 Orange	#FFFF00 Jaune	
Couleurs appréciées				
				
#00FF00 Vert	#00FFFF Bleu turquoise	#0080FF Bleu ciel	#0000FF Bleu nuit	#7F00FF Violet
Couleurs neutres				
				
#FFFFFF Blanc	#808080 Gris	#000000 Noir		

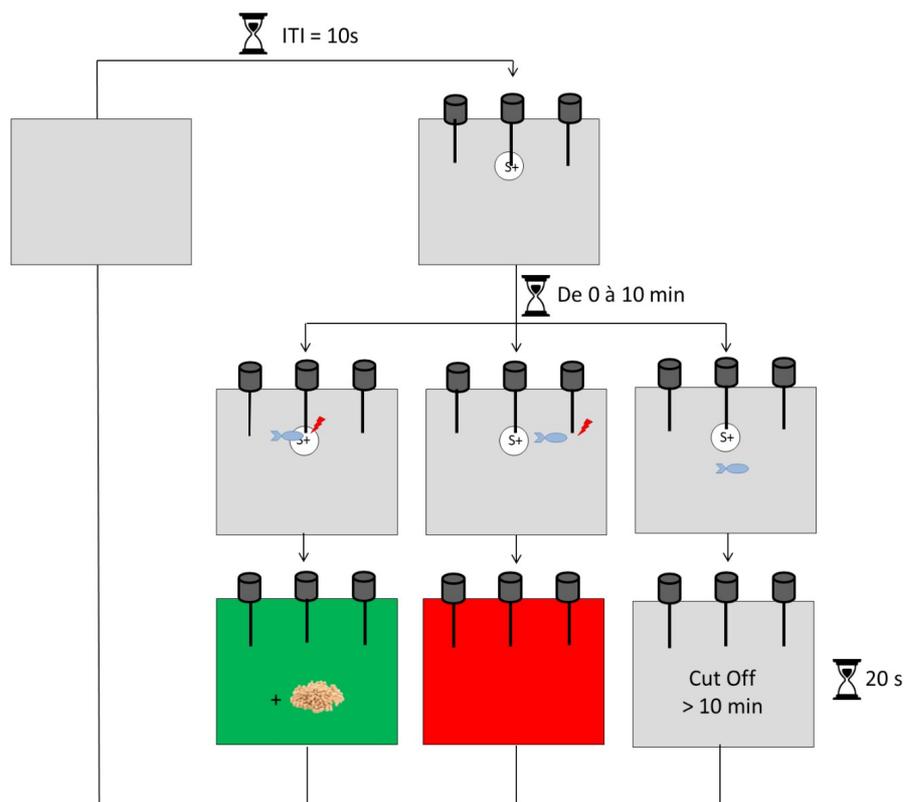


Figure 11: Entraînement à l'activation d'une tige en lien avec un stimulus. Pour ce test, la truite dispose de trois tiges. A chaque trial, au niveau de l'une des tiges apparaît un stimulus. Si la truite active la tige associées au stimulus elle obtient une récompense et un écran vert s'affiche (branche de gauche) ; si elle se trompe un écran rouge s'affiche (branche du milieu) ; si elle n'active rien (cut-off) l'écran gris initial reste affiché (branche de droite). © Manon PEYRAFORT, 2018, INRA-LPGP

## 2.6. Analyses statistiques

Le jeu de données analysé dans ce rapport couvre la période du 12 décembre 2017 au 17 juillet 2018 inclus.

Les tests statistiques et les graphiques ont été réalisés avec le logiciel « R 3.3.2 ». Aucun package n'a été ajouté.

Préalablement à chaque test statistique, les conditions de normalité et d'égalité des variances ont été vérifiées à l'aide des tests de Shapiro et de Bartlett. Lorsque les données respectaient ces deux conditions, des tests paramétriques étaient effectués. Si ce n'était pas le cas, des tests non paramétriques étaient choisis.

**Expériences 1 – 2 – 3.** Les analyses statistiques ont, pour la plupart, été faites sur des modèles pour réaliser des analyses multifactorielles considérant l'ensemble des effets des variables des tests (Tableau 4). Afin d'appliquer le modèle le plus ajusté possible, la démarche suivante a été réalisée.

Pour commencer, la distribution des données a été observée afin de sélectionner le modèle correspondant à la loi en présence. Dans le cas d'une loi normale, un modèle linéaire général estimant les paramètres par la méthode des « moindre carrée » a été appliqué. Dans les cas d'une loi de Poisson et d'une loi Binomiale, un modèle linéaire généralisé appliquant la méthode du « maximum de vraisemblance » a été créé. Initialement, le modèle contenait l'ensemble des variables de l'expérience et leurs interactions. Suite à une première analyse des résultats, les interactions n'ayant pas d'effet ont été supprimées afin d'ajuster le modèle. L'ajustement du modèle a été vérifié par un critère d'information d'Akaike (AIC) et une approche graphique évaluant la distribution des résidus et leur homogénéité (Annexe III).

**Expérience 1.** Afin d'évaluer la proximité des truites avec les objets de leur environnement selon le bassin et l'heure d'observation, une analyse de variance (F : modèle 1) a été faite puis suivie d'une analyse post-hoc de Student ( $t_{\text{pair}}$ ) avec une correction de Bonferroni pour comparer le nombre de truites à proximité de chaque objet. Des comparaisons de moyennes ont aussi été réalisées pour comparer le nombre de truites à proximité des objets entre les deux bassins observés. Un test de Student (t) a ainsi été fait pour comparer cela sur l'ensemble des objets du bassin, et des tests de Wilcoxon-Mann-Whitney (W) ont été fait pour une comparaison sur un même objet.

Par ailleurs, afin d'évaluer la fréquence de passage dans le tube selon le bassin et l'heure d'observation une analyse de variance (F : modèle 2) a été faite. Une interaction entre l'heure d'observation et le bassin s'observant, des groupes ont été crée pour comparer les fréquences de passage des truites de chaque bassin selon l'heure de la journée à l'aide de tests de Wilcoxon-Mann-Whitney (W).

**Expérience 2.** Afin d'évaluer les latences lors des différentes étapes du test du labyrinthe en T, une analyse de variance considérant l'ensemble des variables de l'expérience (F : modèles 3 et 4) a été faite, suivie d'une analyse post-hoc de Student ( $t_{\text{pair}}$ ) pour des données appariées avec une correction de Bonferroni pour comparer les temps de latence entre chaque trial. Pour la latence de sortie de la zone d'acclimatation, une analyse post-hoc de Student ( $t_{\text{pair}}$ ) a été faite pour comparer les effets des deux types de récompense. Par contre, elle a été faite sans distinction du type de récompense pour la latence entre la sortie de la zone d'acclimatation et le choix de la branche contenant la croix.

Pour finir, les pourcentages de truites ayant consommé la totalité de l'aliment en fonction de la récompense ont été comparé par un test de chi-deux ( $\chi^2$  : modèle 5).

### Expérience 3.

**Exercice 1 : Entraînement à l'activation de la tige.** Du fait d'un nombre de sessions différentes effectuées par les truites, seules les six premières sessions, réalisées par l'ensemble des truites, ont été considérées dans l'analyse. Sur ce jeu de données, un test de Wilcoxon-Mann-Whitney (W) a été réalisé afin d'évaluer si le bassin d'origine influence le score d'activation des tiges des truites. De plus, une analyse des variances a été faite pour comparer les scores d'activation de chaque truite au cours des sessions et en fonction des truites (F : modèle 6). Des tests du chi-deux ont été faits : un pour évaluer la position des activations à chaque trial de chaque session, selon la truite ( $\chi^2$ :modèle 7) et un autre pour évaluer le nombre d'activations successives en fonction de la truite et du bassin d'origine des truites ( $\chi^2$ :modèle 8).

**Exercice 2 : Entraînement à l'activation de la tige en lien avec un stimulus.** Un test de chi-deux a été fait pour évaluer l'évolution du type de réponses données par la truite n°4459 en fonction des différents paramètres de l'expérience ( $\chi^2$  : modèle 9). Par ce modèle, il a notamment été recherché si la truite montrait des premiers signes de préférence. L'analyse a été faite sur les 5 sessions réalisées par la truite. Au sein du modèle, les données de forme et de couleurs ont été regroupées par catégorie (Tableaux 2 et 3) du fait que l'ensemble des formes et couleurs n'a pas été présenté à la truite.

Tableau 4 : Modèles utilisés pour les analyses multifactorielles des différentes expériences.

Nom	Type	Commande sous R	AIC
<b>Expérience 1</b>			
Modèle 1	Modèle linéaire général	lm (log (truite autour de l'objet +1) ~ objet + bassin + heure + bassin*heure + objet*bassin, data=data)	- 228,96
Modèle 2	Modèle linéaire général	lm (passage dans le tube ~ bassin + heure + bassin * heure, data=data)	97,61
<b>Expérience 2</b>			
Modèle 3	Modèle linéaire général	lm (log (latence sortie de la zone d'acclimatation +1) ~ récompense + trial , data = data )	233,51
Modèle 4	Modèle linéaire général	lm(log(latence vers la recompense) ~ récompense + trial + bassin + récompense * bassin, data=data)	233,51
Modèle 5	Régression binaire logistique	glm (nb de truite ayant tout mangées ~ récompense + trial, family = binomial (link= « logit »), data=data)	389,46
<b>Expérience 3</b>			
Modèle 6	Modèle linéaire général	lm (log (score d'activation) ~ session + truite, data=data)	86,56
Modèle 7	Régression binaire logistique	glm (position des activations ~ trial + truite + session, family = binomial (link= « logit »), data=data)	36,37
Modèle 8	Modèle log-linaire	glm (activation successive ~ truite + bassin d'origine, family = poisson (link= « log »), data=data)	67,64
Modèle 9	Régression binaire logistique	glm (réponse ~ session + position du stimulus + catégorie de couleur + catégorie de forme + catégorie de forme * session + catégorie de forme* position du stimulus + catégorie de forme * catégorie de couleur , family=binomial (link= « logit »), data=data)	56,92

### 3. RÉSULTATS

#### 3.1. Expérience 1 : Environnement enrichi et interactions des truites avec les éléments qui le composent

Dans leur environnement enrichi, les truites se déplacent essentiellement sur le fond du bassin. Elles passent à proximité de l'ensemble des objets (Figure 12) et montrent des préférences pour certains d'entre eux (Modèle 1 :  $F_{(2,232)}=46,04$  ;  $p<0,001$ ). En moyenne, les truites préfèrent se placer à proximité des plantes plutôt qu'à proximité des galets ( $t_{\text{pair (plantes-galets)}} : p<0,001$ ) ou du tube ( $t_{\text{pair (plantes-tube)}} : p<0,001$ ). Néanmoins, contrairement aux plantes et aux galets, les truites peuvent rentrer dans le tube et le traverser (Figure 13).

D'autre part, selon le bassin observé, la proximité des truites avec les objets de leur environnement a été différente (Modèle 1 :  $F_{(1,232)}=29,13$  ;  $p>0,001$  ; Figure 12). En moyenne, les truites du bassin 401 ont davantage utilisé les objets que celles du bassin 402 ( $t_{\Sigma\text{objets}} = 4,37$  ;  $p<0,001$  ; respectivement  $31,96 \pm 0,64$  % contre  $22,17 \pm 0,74$  %). Pour ces deux groupes, les truites ont été autant présentes à proximité des plantes ( $W_{\text{plantes}}=896,5$  ;  $p_{\text{plantes}}=0,352$ ). En revanche, la différence entre ces deux groupes s'est surtout faite sur la proximité des galets ( $W_{\text{galets}}=1202$  ;  $p_{\text{galets}}<0,001$ ) et également sur celle des tubes ( $W_{\text{tube}}=1086,5$  ;  $p_{\text{tube}}=0,005$ ). Cumulé à l'effet du bassin, une interaction avec l'heure d'observation a été mise en évidence sur la proximité des objets (Modèle 1 :  $F_{(1,232)}=4,65$  ;  $p=0,032$ ) et sur le nombre de passage dans le tube (Modèle 2 :  $F_{(1,18)} = 4,54$  ;  $p=0,047$ ). Lors des observations, les truites pouvaient rester inactives à proximité des objets.

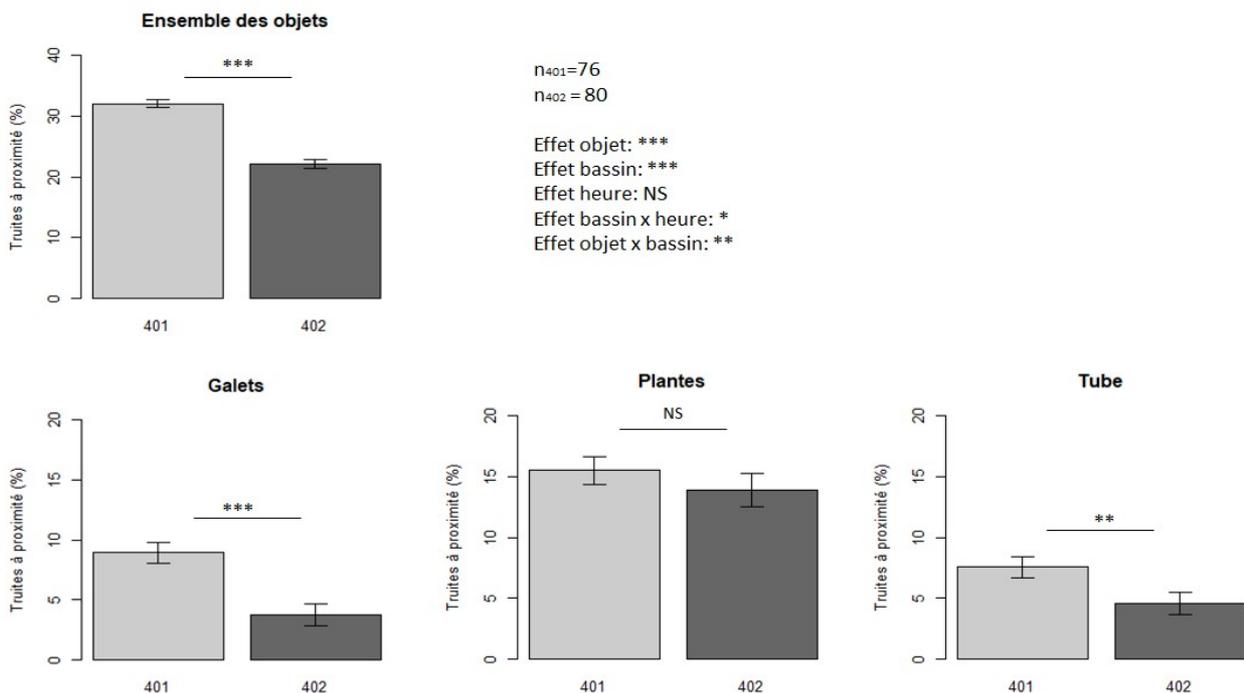


Figure 12 : Proximité des truites avec les objets de leur environnement en fonction des bassins (401 et 402). Ces données sont représentées sous forme de moyenne  $\pm$  ESM. Une ANOVA a évalué les effets des variables du modèle. Pour l'ensemble des objets un test t a été réalisé. Pour chaque objet un test de Wilcoxon-Mann-Whitney a été fait. NS :  $p>0,05$  ; \*\* :  $p<0,01$  ; \*\*\* :  $p<0,001$ . © Manon PEYRAFORT, 2018, INRA-LPGP.

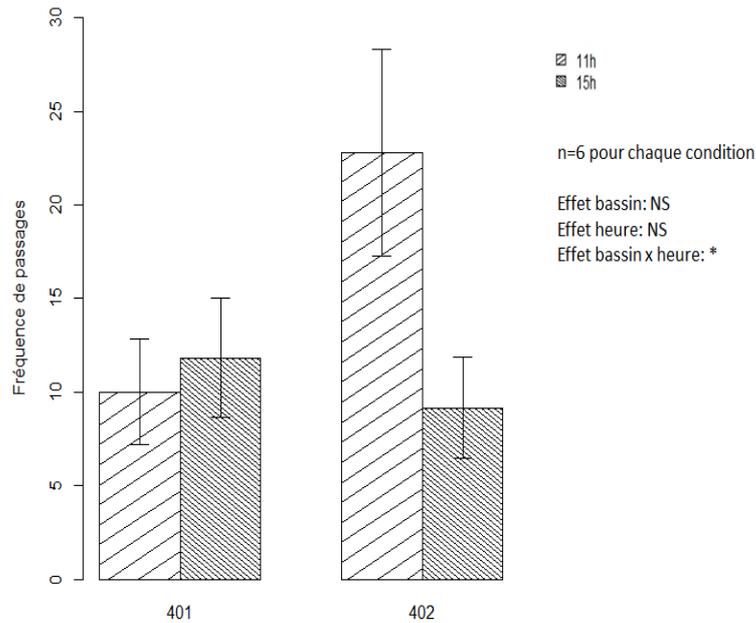


Figure 13 : Fréquence de passage dans le tube PVC au sein de chaque bassin (401 et 402) et pour chaque heure d'observation (11h et 15h). Les données sont représentées sous forme de moyenne  $\pm$  ESM. Un test Wilcoxon-Mann-Witney a été réalisé. NS :  $p > 0,05$  ; \* :  $p < 0,05$ . © Manon PEYRAFORT, 2018, INRA-LPGP.

### 3.2. Expérience 2 : Apprentissage spatial et motivation d'alimentaire

Au cours de l'apprentissage spatial, les truites ont fait preuve de capacités d'exploration rapides du labyrinthe en T. En effet, les temps de latences (temps de latence de sortie de la zone d'acclimatation : Figure 14.A, et temps de latence entre la sortie de la zone d'acclimatation et la distribution de la récompense : Figure 14.B) n'excèdent pas 2 minutes (240 secondes) et diminuent au cours des trials (Modèle 3 :  $F_{(6,478)}=9,18$  ;  $p < 0,001$  ; Modèle 4 :  $F_{(6,476)}=16,09$  ;  $p < 0,001$ ), mettant en évidence un apprentissage spatial. De plus, l'aliment enrobé a motivé les truites à sortir plus rapidement de la zone d'acclimatation (Modèle 3 :  $F_{(1,478)}=4,82$  ;  $p=0,029$ ), mettant ainsi en évidence un effet du facteur d'appétence sur la motivation alimentaire. Cela est montré par une différence significative entre les trials 1 à 3 et 4 à 7 ( $W_{\text{pair}}$ ) lorsque l'aliment enrobé est distribué, tandis qu'aucune différence significative entre ces trials n'est observée pour l'aliment non enrobé ( $W_{\text{pair}}$ ). Cependant, l'enrobage n'a pas eu d'effet sur la motivation des truites à se diriger vers la récompense (Modèle 4 :  $F_{(1,476)}=0,20$  ;  $p=0,654$  ; Figure 14.B). Une interaction de l'effet de cette variable avec l'effet du bassin d'origine des truites s'observe tout de même (Modèle 4 :  $F_{(1,476)}=1,86$  ;  $p < 0,001$  ; Figure 14.B).

Pour terminer, la motivation pour l'aliment s'observe au travers la consommation alimentaire des truites (Figure 15). En effet, les truites consomment significativement davantage l'aliment enrobé que l'aliment non enrobé (Modèle 5 :  $F=437,12$  ;  $p=0,009$ ) même lorsqu'elles arrivent à satiété au fur et à mesure des trials et en fin de journée (Modèle 5 :  $F=373,46$  ;  $p < 0,001$ ).

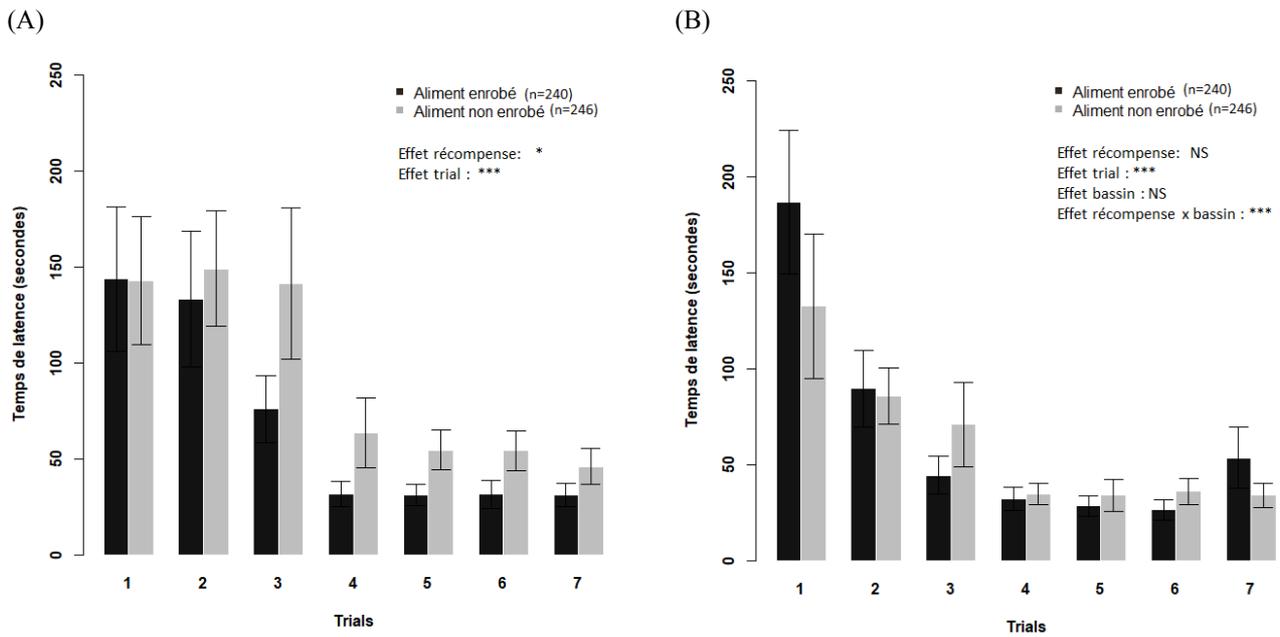


Figure 14 : Evolution du temps de latence de sortie de la zone d'acclimatation (A) et du temps de latence entre la sortie de la zone d'acclimatation et le choix de la bonne branche du labyrinthe (B), au cours des trials et en fonction de la récompense (aliment enrobé et non enrobé). Ces données sont représentées sous forme de moyennes  $\pm$  ESM. Une ANOVA a évalué les effets des variables du modèle. NS :  $p > 0,05$  ; \* :  $p < 0,05$  ; \*\* :  $p < 0,01$  ; \*\*\* :  $p < 0,001$ . © Manon PEYRAFORT, 2018, INRA-LPGP.

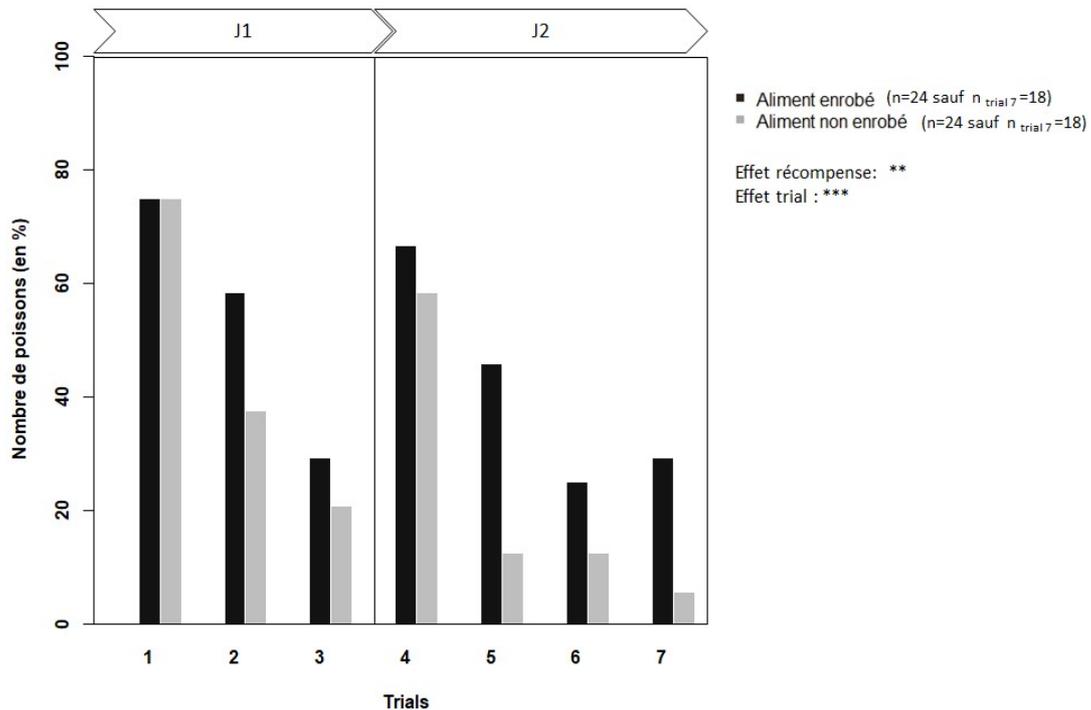


Figure 15 : Proportion de truites issues des sessions 5 à 12 ayant consommées la totalité de la récompense (aliment enrobé et non enrobé) au cours des trials, répartis sur deux jours. Les données sont représentées sous forme de pourcentages. Une ANOVA a évalué les effets des variables du modèle. \*\* :  $p < 0,01$  ; \*\*\* :  $p < 0,001$ . © Manon PEYRAFORT, 2018, INRA-LPGP.

A la fin du test d'apprentissage, 30 truites (15 pour chaque type de récompense) ont été sélectionnées sur le temps de latence total, c'est à dire sur le délai séparant l'ouverture de la trappe et le choix de la branche contenant la croix. Parmi ces truites, 17 étaient issus du bassin 401 et 13 du bassin 402.

Comme le facteur d'appétence améliore significativement la motivation d'apprentissage, pour l'expérience 3, il a été choisi d'utiliser uniquement les 15 truites familiarisées avec la récompense enrobée. Les 15 autres truites ont été stockées dans un bassin à part et serviront à la régulation de la densité pour la suite des expériences.

### **3.3. Expérience 3 : Conditionnement opérant au vu de l'apprentissage de concepts**

Les résultats présentés ici s'arrêtent au 17 juillet 2018, mais l'expérience va continuer sur les trois années à venir.

#### **3.3.1. Acclimatation au bassin de test**

Les truites se sont habituées à être pêchées régulièrement. Au fur et à mesure des sessions, elles n'ont plus assimilé l'épuisette comme une menace, ce qui nous a permis de les pêcher de façon non stressante. L'épuisette est placée dans le bassin et les truites motivées viennent par elle-même dedans. Suite à la pêche, le transfert vers le bassin de test est très rapide. En effet, à leur entrée dans le bassin de test, les truites sont systématiquement récompensées par de l'aliment enrobé, alors associé à l'événement. Elles consomment, pour la plupart, la récompense donnée. Au cours du test, elles manifestent un comportement natatoire calme sur l'ensemble du bassin, et une absence de nages erratiques, ce qui semble indiquer l'absence de stress (Cooke *et al.*, 2000; McFarlane *et al.*, 2004).

Concernant la vision de l'écran par les truites, les quelques observations réalisées avec la GoPro sur les premières sessions ont confirmé qu'elles visualisent bien l'écran. Cela est confirmé par le fait que l'écran les attire et qu'elles l'explorent sur son ensemble par des cercles de bas en haut (Figure 16). Suite à ces premières observations, la GoPro a été placée dans le bassin d'essai lors de l'entraînement des truites ayant réalisé les meilleurs scores d'activation. A la session 4 de la truite n°0331, la GoPro a été placée dans le bassin de test pour observer ce phénomène. Celle-ci s'est cachée derrière sur l'ensemble des trials de la session. La GoPro a donc été identifiée comme un biais dans l'apprentissage et il a été fait le choix de ne plus l'utiliser pendant les phases d'entraînement.

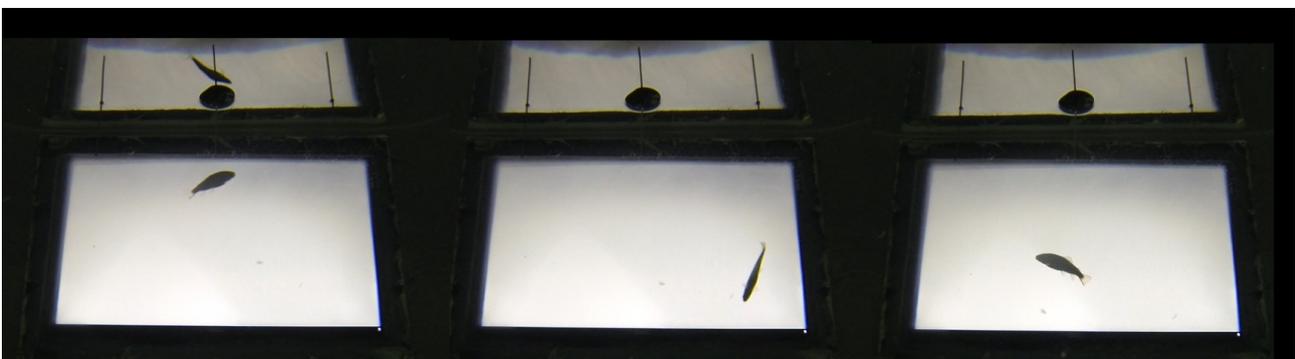


Figure 16 : Vision in situ des déplacements d'une truite sur quelques secondes successives le long de l'écran du bassin de test. En surface le reflet des trois tiges sont visibles. Ces images ont été obtenues à l'aide d'une GoPro Héro3. © Manon PEYRAFORT, 2018, INRA-LPGP.

### 3.3.2. Exercice 1 : Entraînement à l'activation de la tige

Au 17 juillet 2018, les 15 truites précédemment sélectionnées (9 issues du bassin 401 et 6 du bassin 402) ont toutes été entraînées à l'activation de la tige jusqu'à la session 6. Les truites n°0494, n°0331 et n°4459 ont été davantage entraînées et ont atteint la session 11, sauf la truite n°0080 qui a atteint la session 8 du fait de son ajout retardé au groupe (Figure 17.B).

Globalement, l'apprentissage est très variable d'une session à l'autre (Modèle 6 :  $F_{(5,68)}=0,64$  ;  $p=0,666$ ). Par exemple, lors de la session 6, la truite n°0494 a eu un taux d'activation de 100 %, tandis que neuf truites n'activent pas les tiges. L'apprentissage a également été observé comme très hétérogène d'une truite à l'autre (Modèle 6 :  $F_{(14,68)}=2,45$  ;  $p=0,007$ ). Gardons pour exemple la truite n°0494. Entre la session 6 et 7, elle est passée d'un taux d'activation de 100 % à un taux d'activation de 30 %. En revanche, les variabilités d'apprentissage observées ne sont pas liées à un effet du bassin d'origine des truites ( $W=920$  ;  $p=0,882$ ).

Sur 15 truites, 12 ont activé au moins une fois l'une des trois tiges (Figure 17). Les truites n°0162, n°4467 et n°0288 n'ont rien activé. A l'inverse, les truites davantage entraînées activent régulièrement les tiges et montrent des améliorations de leurs performances (truites n°0379, n°0080 et n°4494). Certaines ont même atteint le seuil de validation de l'entraînement. La truite n°4459 l'a validé à la session 7 et la truite n°0331 à la session 11, ce qui les amène à la seconde phase d'entraînement.

Par ailleurs, pour les 12 truites activatrices, la stratégie d'activation a été observée. Peu de truites ont activé la tige au trial 1. Ainsi la première activation a majoritairement été faite aux trials 2 et 3 et se retrouve sur l'ensemble des sessions de test. Une distribution étalée s'observe également pour les différentes activations réalisées par les truites (Figure 18). Cela est dû au phénomène d'apprentissage qui s'opère au cours des sessions (Modèle 7 :  $\chi^2=5,545$  ;  $p=0,031$ ). Plus les truites apprennent, plus elles activent la tige et enchaînent les activations (Modèle 8 :  $\chi^2=43,644$  ;  $p=0,16$ ).

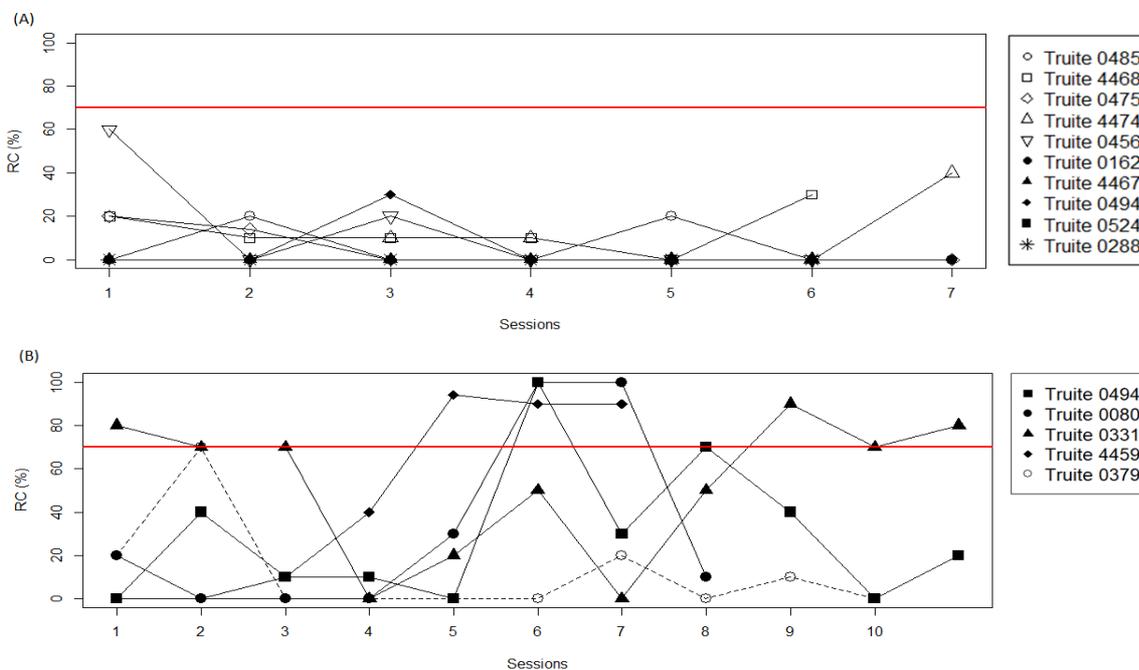


Figure 17 : Evolution du taux d'activation des tiges (RC) des 15 truites : en (A) celui des 10 truites manquantes de motivation à l'apprentissage et en (B) celui du groupe des truites davantage entraînées. La ligne rouge représente le seuil de réussite à 70 %. © Manon PEYRAFORT, 2018, INRA-LPGP.

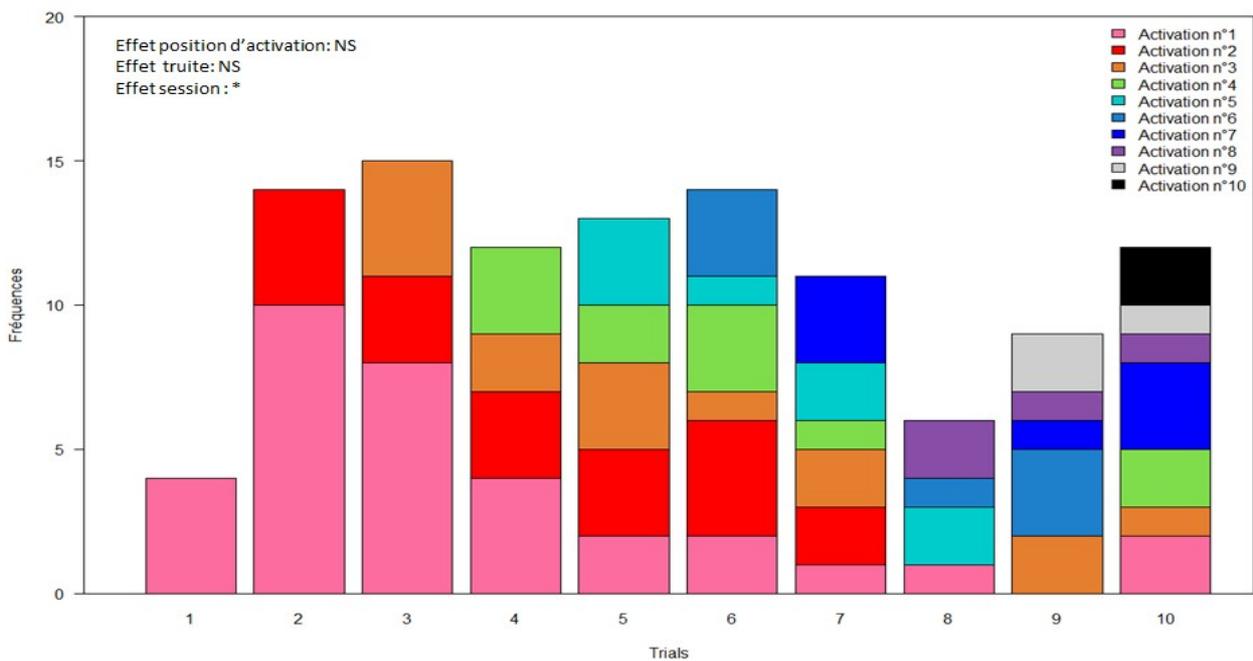


Figure 18 : Positions des activations de tige réalisées par les truites sur les trials des sessions 1 à 6. © Manon PEYRAFORT, 2018, INRA-LPGP.

### 3.3.3. Exercice 2 : Entraînements à l'activation de la tige en lien avec un stimulus

Au 17 juillet 2018, seule la truite n°4459 a débuté la seconde phase d'entraînement, celle de l'activation de la tige en lien avec un stimulus. A ce jour, la truite n°4459 a atteint la cinquième session d'entraînement et ses premiers résultats ne mettent pas en évidence d'amélioration significative du type de réponses données (Modèle 9 :  $\chi^2=50,898$  ;  $p=0,378$ ) même si le nombre de cut-off tend à diminuer pour être remplacé par des réponses correctes sur les sessions 3 à 5 (Figure 19).

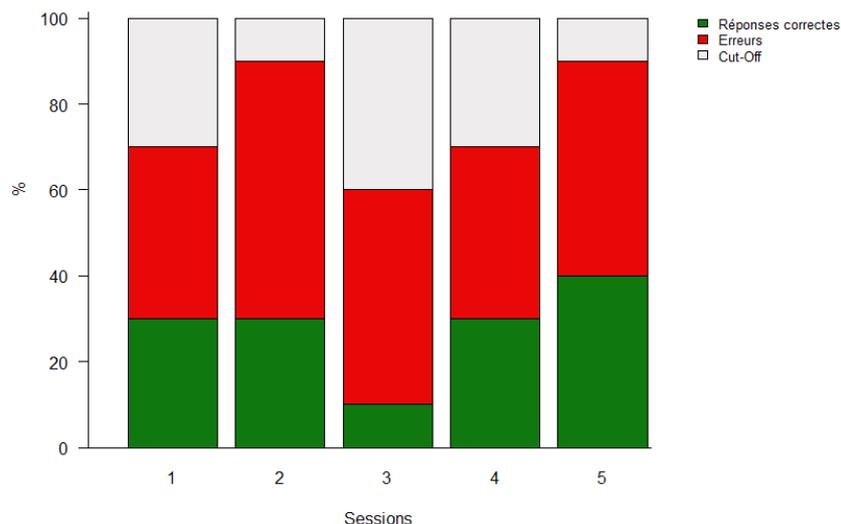


Figure 19 : Score d'activation de la truite n°4459 au cours des sessions 1 à 5. En vert est représenté le pourcentage d'activation où la truite a activé la tige au niveau de laquelle se trouvait le stimulus et en rouge celui au niveau de laquelle le stimulus n'était pas présent. En gris est représenté l'absence de réponse. © Manon PEYRAFORT, 2018, INRA-LPGP.

De plus, sur ses cinq premières sessions, la truite n°4459 a montré des premiers signes de préférence pour l'une des catégories de forme proposée (Modèle 9 :  $\chi^2=38,208$  ;  $p=0,023$ ). Cet effet s'observe également en interaction avec l'effet session (Modèle 9 :  $\chi^2=18,343$  ;  $p=0,030$ ). Cependant, comme la truite est en début d'apprentissage et que toutes les formes et couleurs ne lui ont pas été présentées il a été choisi de ne pas se prononcer sur ces résultats, encore trop préliminaires, et d'attendre ceux des sessions à venir pour émettre une hypothèse.

#### 4. DISCUSSION

---

Les résultats obtenus lors de cette étude ont montré que des truites arc-en-ciel triploïdes élevées en environnement enrichi dès la phase d'alevinage ont de bonnes capacités d'apprentissage et que le conditionnement opérant avec un self-feeder fonctionne.

*Enrichissement et comportement.* Selon les objets qui composent un milieu artificiel, l'espèce élevée et son écologie, des comportements différents peuvent s'observer. Dans cette étude, des truites triploïdes et monosexes juvéniles ont été placées dans des bassins enrichis avec des plantes, des cailloux et un tube en PVC. Globalement, les truites utilisent l'ensemble des éléments de leur environnement mais des préférences s'observent. Peu de truites se placent à proximité des cailloux, tandis qu'elles se placent à proximité des plantes ou dans le tube, des comportements que l'on observe dans le milieu naturel. En effet, les poissons ont tendance à s'agglomérer dans des zones de végétation qui leur procurent alimentation et protection (Merrick, 1984, et Leggett & Merrick, 1987, dans Hattori & Warburton, 2003). Dans ce type d'habitat, les prédateurs améliorent leur succès de capture des proies et les proies minimisent le risque de prédation (Savino & Stein, 1989, dans Hattori & Warburton, 2003). En condition aquacole, comme c'est ici le cas, les objets autour desquels les truites s'agglomèrent leur procurent uniquement une protection, puisque l'aliment leur est distribué. Ce rôle a clairement été observé, par exemple lors de l'approche d'une épuisette ou d'un expérimentateur inconnu. Les truites se sont cachées derrière les plantes ou dans le tube. Les objets appréciés par les truites sont donc ceux qui leur apportent des zones d'ombre dans lesquelles elles peuvent se réfugier. Ce type de comportement, appelé comportement photonégatif, a également été observé chez l'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*) élevé en environnement enrichi (plantes, pots de fleurs cassés ...), un salmonidé phylogénétiquement proche de la truite arc-en-ciel. Chez l'omble, ce comportement s'amplifie en condition de famine (Gibson & Keenleyside, 1966). Dans le cadre de notre étude, les truites ont reçu une alimentation restreinte à quatre jours par semaine. Il est observé qu'une alimentation restreinte favorise les comportements agonistiques chez les juvéniles de truites arc-en-ciel (Berejikian, Mathews & Quinn, 1996). Lors des scans réalisés, ce comportement est observé au niveau du tube, mis en évidence par des mordillements, un comportement géré par le télencéphale (Segaar, 1961; McIntyre & Healy, 1979). Il semble donc que nos truites amplifient leur comportement photonégatif, entraînant ainsi des comportements agonistiques pour obtenir la meilleure zone ombragée, ici celle du tube. Dans nos bassins, le tube est la zone la plus ombragée du fait de sa forme close. Elle est aussi plus restreinte comparativement à celle des plantes. Elle permet donc à moins de truites de se placer à l'ombre en même temps. La zone d'ombre du tube est néanmoins la plus convoitée, ce qui justifierait les quelques mordillements observés. Par ailleurs, la faible densité améliore leur capacité d'observation (Ebbesson & Braithwaite, 2012). Ainsi, les truites arc-en-ciel sont aptes à reconnaître et se souvenir de leurs adversaires (Johnsson, 2010). Pour nos truites, le risque d'agression serait ainsi limité par la parenté. Cela peut en partie être démontré du fait des autres comportements observés au niveau du tube. Pour certaines truites, le tube semble

représenter un simple lieu de passage, pour d'autres un terrain de jeu (mis en évidence par des allers-retours rapides), ou encore une cachette partagée.

Ces premières observations ont donc mis en évidence un vaste répertoire comportemental du fait de l'enrichissement du milieu dans des groupes de truites arc-en-ciel en condition aquacole.

*Triploïdie et enrichissement.* Chez les poissons téléostéens, le cerveau est considéré comme particulièrement plastique, du fait d'une croissance continue (Pollen *et al.*, 2007; Fraser *et al.*, 2012), et est réceptif aux changements des conditions sociales et environnementales (Lema *et al.*, 2005; Kihlslinger & Nevitt, 2006; Gonda, Herczeg & Merilä, 2009).

Suite à un enrichissement du milieu dès le début de la phase d'alevinage, nos truites ont montré lors du test d'apprentissage en labyrinthe en T, de bonnes capacités d'apprentissage spatiales. Lors de l'apprentissage les temps de latence n'ont pas dépassé deux minutes. Pour rappel, nos truites sont stockées à 12°C et l'apprentissage a débuté à 131 jpf sur 3 semaines. Des tests d'apprentissage spatiaux réalisés au laboratoire dans les mêmes dispositifs et dans des conditions expérimentales proches, sans enrichissement du milieu, ont montré des différences. La comparaison a été faite avec deux études, l'une évaluant l'effet d'un stress thermique (12°C et 17°C) sur le comportement des truites arc-en-ciel; et l'autre analysant le comportement de deux lignées de truites arc-en-ciel (grasse et maigre) élevées à deux températures (10°C et 16°C). Pour ces projets, les truites étaient respectivement âgées de 111 jpf et 131 jpf au début des tests qui ont duré 4 semaines. Lors de l'apprentissage, certaines truites ne sont jamais sorties de la zone d'acclimatation. Pour celles qui en sont sorties, le temps minimum de latence pour atteindre la zone récompensée était en moyenne de 8 minutes (Colson et Valotaire, communication personnelle). L'enrichissement du milieu dès le début de la phase d'alevinage et/ou la triploïdie amélioraient donc les capacités cognitives, comme indiqué par Fraser et ses collaborateurs et Ebbesson et Braithwaite en 2012, et notamment la capacité d'apprentissage spatiale et de navigation en labyrinthe des truites. Dans la littérature, il a été rapporté un nombre inférieur de cellules cérébrales mais celles-ci sont de plus grande taille dans les tissus des poissons triploïdes (Swarup, 1959; Small & Benfey, 1987; Aliah *et al.*, 1990; Lou & Purdom, 1984). Pour autant, aucune différence de masse cérébrale n'a été trouvée entre des triploïdes et des diploïdes (*Salvelinus fontinalis* : Deeley & Benfey, 1995 ; *Gasterosteus aculeatus* : Swarup, 1959). Pourtant, chez les poissons triploïdes, le télencéphale et le cervelet sont plus développés que chez les diploïdes (Fraser *et al.*, 2012). Pour rappel, le cervelet est une région cérébrale impliquée dans les contrôles moteurs (Finger, 1983; Gómez *et al.*, 2010) et les processus d'apprentissage (Rodríguez *et al.*, 2005). Quant au télencéphale, il s'agit d'une région cérébrale, comparable au cortex des mammifères (Karten, 2015), associée aux mouvements spatiaux (Salas *et al.*, 1996) et aux comportements de recherche de nourriture (Wilson & McLaughlin, 2010) chez les téléostéens. Comme les tissus triploïdes sont plus grands et ont moins de cellules que les diploïdes, l'augmentation de la taille de leur cervelet et de leur prosencéphale ne signifie pas nécessairement qu'ils ont une plus grande capacité cognitive car le nombre de cellules est inférieur à celui des diploïdes. Il se peut donc que l'augmentation de la taille de certaines zones cérébrales des triploïdes soit un mécanisme particulier pour répondre à des exigences cognitives qui nécessitent un niveau de complexité morphologique particulier. Une étude comparant les capacités cognitives et la physiologie cérébrale de poissons triploïdes et diploïdes issus d'une même souche serait donc à réaliser. D'autres études ont évalué l'effet de l'enrichissement du milieu sur la physiologie cérébrale. Chez le saumon d'Atlantique, Ebbesson et Braithwaite ont mis en évidence que l'enrichissement du milieu accroît la prolifération des cellules neuronales dans le prosencéphale ainsi que la neurogenèse, ce qui stimule les capacités cognitives des poissons (Ebbesson & Braithwaite 2012). Chez les poissons, d'autres auteurs ont fait des liens entre la taille de régions cérébrales spécifiques, d'une part avec certains comportements et d'autre part avec leurs capacités cognitives (Pollen *et al.*,

2007). En effet, il a été rapporté que les truites arc-en-ciel élevées en milieu enrichi ont une meilleure agilité nataoire (Ahlbeck Bergendahl *et al.*, 2017), et que les ombles de fontaine les plus actifs ont un télencéphale de taille supérieure (Wilson & McLaughlin, 2010).

Dans notre étude, on peut donc supposer que les truites triploïdes ont un cervelet et un télencéphale de grande taille du fait de leur triploïdie, et qu'ils seraient encore davantage développés par l'enrichissement du milieu. Ainsi, nos truites auraient un important réseau de neurones corticaux dans ces zones et une bonne vitesse de conduction, ce qui leur procurent de bonnes performances locomotrices en labyrinthe. Ces performances ont même été renforcées par la faible densité d'élevage puisque celle-ci facilite l'apprentissage des informations de l'environnement en raison d'une plus grande capacité des poissons à observer leur milieu (Ebbesson & Braithwaite, 2012). Ainsi, les truites enregistrent mieux les éléments de l'environnement pour mieux s'y déplacer. L'environnement étant régulièrement modifié, cela a peut-être amplifié davantage encore leurs capacités cognitives et locomotrices, puisque des changements environnementaux aux stades de vie précoces améliorent aussi la flexibilité comportementale chez la morue (Braithwaite & Salvanes, 2005). Cependant une étude spécifique comparant simultanément des lots enrichis et non enrichis sur des souches d'origine génétique identique reste nécessaire pour valider ces résultats chez la truite arc-en-ciel.

*Motivation alimentaire et cognition.* En plus des performances d'apprentissage spatial, l'effet de la motivation alimentaire a été évaluée sur deux aliments de facteurs d'appétence différents, un travail qui n'a encore jamais été réalisé à notre connaissance.

Les résultats ont montré un effet significatif du facteur d'appétence le plus élevé sur la motivation alimentaire et donc sur la vitesse d'apprentissage. Ainsi l'aliment enrobé par l'entreprise Diana Aqua, pourra continuer à être utilisé pour de futures expériences éthologiques chez la truite arc-en-ciel. Cet aliment pourrait aussi être utilisé occasionnellement dans un contexte aquacole pour récompenser les truites après des manipulations (biométrie, tri de lots ...). En effet, chez la morue, un conditionnement positif peut changer l'interprétation cognitive d'un agent stressant (Nilsson *et al.*, 2012). Ce phénomène pourrait donc être exploité en élevage afin de limiter le stress et améliorer ainsi le bien-être des poissons. Dans la littérature, nous n'avons pas trouvé d'étude évaluant la motivation alimentaire chez la truite arc-en-ciel. Il pourrait donc être intéressant de mesurer l'effet du facteur d'appétence d'une récompense sur la consommation alimentaire ainsi que sur la vitesse d'apprentissage afin d'évaluer si un seuil existe. Ceci permettrait d'améliorer les résultats de certaines études éthologiques, car certains poissons testés ici n'ont jamais activé les tiges lors de l'entraînement au conditionnement alors qu'ils étaient pourtant familiers avec l'aliment distribué.

Par ailleurs, chez les poissons triploïdes, il a été identifié que les triploïdes ont un plus petit bulbe olfactif que les diploïdes (Fraser *et al.*, 2012). Le bulbe olfactif joue un rôle important pour la perception des odeurs chez les poissons (Laberge & Hara, 2001). Comme cette région est moins développée chez les poissons triploïdes, il est probable que leur perception des odeurs soit également limitée. Utiliser une récompense avec un facteur d'appétence plus important que l'aliment couramment distribué en élevage s'avère donc davantage nécessaire pour les poissons triploïdes soumis à des tests éthologiques.

*Sélection et conditionnement opérant.* Parmi les truites exposées à l'aliment enrobé lors du test d'apprentissage spatial, seules les plus rapides à atteindre la récompense ont été gardées pour l'apprentissage de concepts. Le critère de sélection a été leur vitesse d'apprentissage. Ce choix nous a probablement amené à sélectionner des truites ayant un comportement audacieux, même si l'intervalle de temps entre le score de la première truite et celui de la dernière était réduit. Dans la littérature, il a été démontré que les poissons ayant un tempérament audacieux sont de meilleurs

chasseurs que les individus timides puisqu'ils prennent des décisions plus hâtives (Ebbesson & Braithwaite, 2012). Ainsi, ils font abstraction du danger. Dans notre labyrinthe, les truites audacieuses ont donc fait abstraction de l'appréhension d'exploration ce qui les a amenées à atteindre plus rapidement la récompense. D'après la littérature, les poissons audacieux prennent des décisions plus rapides mais moins précises que les poissons timides. Ainsi, leur capacité à apprendre de nouvelles tâches est plus lente (Ebbesson & Braithwaite, 2012). De plus, chez le bar (*Dicentrarchus labrax*) l'activité d'activation des self-feeders dans un groupe est négativement corrélée avec les capacités exploratoires et l'audace (Ferrari *et al.*, 2015). Les bars les plus audacieux sont ceux qui activent le moins les tiges lorsqu'ils sont en groupe. Cela s'observe également chez la truite arc-en-ciel en condition de groupe, où seules quelques manipulatrices sont capables d'utiliser le self-feeder pour tout le groupe (Colson, communication personnelle). Dans le cadre de notre étude, la sélection d'individus éventuellement audacieux ne semble cependant pas avoir impacté nos résultats puisque 12 des truites sélectionnées ont réussi à activer les tiges des self-feeders, bien qu'elles soient testées en isolement social. En moyenne, chez les poissons l'apprentissage à l'utilisation du self-feeder en groupe est de 10 à 45 jours selon les espèces (Jobling *et al.*, 2001 (chapitre 3) dans Houlihan, Boujard & Jobling, 2002). Chez la truite arc-en-ciel élevée en groupe de 100 à 300 individus environ 25 jours sont nécessaires pour atteindre un niveau d'auto-alimentation stable (Alanära, 1996). A la fin de ce stage, lors de l'entraînement à l'activation de la tige, seule deux truites avaient réussi à atteindre rapidement un seuil d'activation stable (truites n°4459 et n°0331), au bout de 7 et 11 jours, respectivement. Cela indique donc qu'en condition individuelle *O. mykiss* est capable de réaliser un paradigme de conditionnement opérant basé sur l'utilisation de self-feeders en condition individuelle et ce plus rapidement qu'en groupe. Notons également que trois semaines après la fin de ce stage, 8 truites avaient atteint le seuil d'activation de façon stable. Ces résultats permettent de démontrer que le self-feeder peut à l'avenir être utilisé pour évaluer la réponse individuelle des poissons lors de tests éthologiques, comme l'avait initié Longo et Bitterman en 1959 avec leur prototype de self-feeder chez le tilapia africain (*Tilapia macrocephala*). Ce résultat est également encourageant pour la suite de nos expériences d'application de concepts d'appariement et d'étrangeté, pour lesquels la réponse conditionnée des truites reposera sur la manipulation qu'elles feront du self-feeder.

Par ailleurs, lors de l'entraînement, les truites ont peu activé la tige au premier trial. Il pourrait donc être intéressant d'apporter une modification au protocole. Dès qu'elle a été placée dans le bassin de test, la truite a reçu une récompense et l'entraînement a directement débuté. Il pourrait donc y avoir un point de blocage à cette étape : soit la truite n'a pas eu le temps de consommer la récompense d'entrée, soit un temps d'acclimatation est nécessaire avant le départ du test. Lors des sessions, certaines truites ont été capables de consommer leur récompense sur 30 secondes. Le temps de consommation de la récompense ne semble donc pas être le problème. Même si la pêche a été identifiée comme une intervention peu stressante d'après nos observations, les truites semblent avoir besoin d'un délai supplémentaire de transition entre le bassin d'élevage et le bassin de test pour se placer en situation de test. Cette introduction en bassin de test peut en effet être assimilable au test de l'open-field classiquement utilisé pour les études du stress chez les rongeurs (Walsh & Cummins, 1976) et plus récemment chez les poissons (*Danio rerio*: Champagne *et al.*, 2010; *Oncorhynchus mykiss*: Colson *et al.*, 2015). La récompense alimentaire à l'introduction dans le bassin avait pour objectif de limiter ce stress (*Gadus morhua* : Nilsson *et al.*, 2012). Cet objectif semble avoir été atteint partiellement puisque le poisson nage calmement mais il ne semble pas encore enclin à activer la tige dès le premier trial. Il faudrait donc peut-être prévoir à l'avenir de laisser quelques minutes au poisson avant de démarrer le test, afin d'optimiser ses réponses dès le premier trial.

*Pronostic sur les performances futures des truites.* Actuellement, parmi les trois espèces de poissons qui ont réalisé l'application de concepts (*Carassius auratus* : Goldman & Shapiro, 1979; Zerbolio & Royalty, 1983 ; *Pseudotropheus sp.* : Gierszewski, Bleckmann & Schluessel, 2013); et *Toxotes chatareus* : Newport et al. 2013; Newport, Wallis & Siebeck, 2014), seul le poisson archer (*Toxotes chatareus*) n'a pas réussi à appliquer correctement les consignes présentées. Newport et ses collaborateurs ont supposé que cela était lié à l'écologie alimentaire de l'espèce. Le poisson archer est une espèce opportuniste qui exerce une stratégie alimentaire de contrôle/rejet, c'est à dire qu'elle n'hésite pas à goûter des proies inconnues et à les recracher si elles ne conviennent pas. Elle n'a donc pas la nécessité d'apprendre de façon durable des informations issues de son environnement. Chez certaines espèces, l'apprentissage peut être très important comme pour repérer des proies à déloger ou encore pour éviter des proies désagréables ou toxiques. On parle alors de stratégie de contrôle sélectif (Newport *et al.*, 2013). Cette stratégie est appliquée par les espèces qui ont un comportement alimentaire spécifique, comme le poisson rouge et le cichlidé. Newport et ses collaborateurs ont donc supposé que les espèces prédatrices réussiront mieux à assimiler des concepts (Newport, Wallis & Siebeck, 2014). Cela devrait être le cas de la truite arc-en-ciel.

## 5. CONCLUSIONS

---

Ce travail visait à mettre en place un plus vaste projet qui va s'échelonner sur plusieurs années et qui vise à évaluer les capacités cognitives élaborées de la truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*). Au cours de mon stage, trois expériences ont été réalisées.

La première expérience a évalué le comportement de truites triploïdes élevées dès la phase d'alevinage en environnement enrichi. Les résultats ont mis en évidence que même si elles passent du temps à proximité de tous les objets présents (plantes, galets et tube), les truites préfèrent les plantes et le tube aux galets car ce sont des objets qui leur procurent une certaine protection et qui leur apportent des zones d'ombre.

Dans la seconde expérience, les truites ont réalisé un test d'apprentissage spatial dans un labyrinthe en T afin d'écarter notre lot de truites en sélectionnant les plus performantes pour la suite du projet. Nous avons par ailleurs évalué l'effet du facteur d'appétence de la récompense donnée lors du test sur la motivation alimentaire et sur la vitesse d'apprentissage. Nos truites ont montré d'excellentes capacités d'apprentissage spatial en comparaison à des truites élevées en environnement conventionnel issues d'autres expériences. Cette différence serait due à l'enrichissement du milieu connu pour améliorer les capacités cognitives des poissons. En revanche, l'effet de la triploïdie sur les capacités cognitives des poissons reste encore inconnu, même s'il a été identifié que le cervelet et le télencéphale sont plus développés que chez les diploïdes. Par ailleurs, l'aliment enrobé, de par son appétence, a motivé les truites à apprendre plus rapidement. Ce résultat nous amène à conseiller l'utilisation d'une récompense alimentaire avec un facteur d'appétence supérieur à celui de l'aliment d'élevage lors de la réalisation de tests éthologiques, et notamment chez les triploïdes qui ont des bulbes olfactifs peu développés. Cet aliment enrobé devrait donc être utilisé lors de l'expérience 3 et il le sera pour la suite du projet.

Suite à l'expérience 2, 15 truites aux meilleures capacités d'apprentissage qui ont reçu l'aliment avec le plus grand facteur d'appétence ont été sélectionnées pour l'expérience 3. Pour cette expérience, les truites ont été entraînées à un paradigme de conditionnement opérant, pour la réalisation de tests visant à évaluer leur capacité à élaborer différents concepts. Les truites ont d'abord été entraînées à activer les tiges des self-feeders en condition individuelle. La littérature

indique que dans un groupe de truites, seules quelques manipulatrices sont capables d'utiliser le self-feeder pour tout le groupe, mais ce type de conditionnement n'a jamais été montré chez des poissons isolés.

Parmi les 15 truites entraînées, 12 ont activé au moins une fois l'une des tiges. Au cours des sessions, les truites ont montré des apprentissages variables. A la fin de ce stage, deux truites avaient atteint un taux d'activation stable au bout de 7 et 11 sessions respectivement, mais 8 d'entre elles ont atteint ce niveau de performances trois semaines après la fin de mon stage. Cela montre que les truites sont capables de réaliser un paradigme de conditionnement opérant basé sur l'utilisation de self-feeder en condition individuelle. Par ailleurs, peu d'activations ont été faites sur les premiers trials des sessions. Il en a donc été conclu qu'il serait nécessaire de laisser aux truites un temps de transition entre leur bassin d'élevage et le bassin de test pour qu'elles se mettent en condition avant le lancement du test.

A la fin de mon stage, seule une truite avait commencé à être entraînée pour l'association entre une tige du self-feeder et un stimulus visuel affiché sur un écran, et elle terminait sa 5<sup>ème</sup> session lorsque je suis partie. Je ne peux donc pas conclure sur ces performances pour ce type de conditionnement.

L'ensemble des résultats de ce stage a montré que nos truites arc-en-ciel triploïdes élevées en environnement enrichi dès la phase d'alevinage ont de bonnes capacités cognitives et que le conditionnement opérant avec un self-feeder fonctionne. De plus, dans la littérature des auteurs ont émis des hypothèses qui laissent à penser que la truite arc-en-ciel devrait réussir à appliquer des concepts. Pour toutes ces raisons, les expériences pour les quatre années à venir envisagent des résultats intéressants.

## 6. PERSPECTIVES ET SUITE DU PROJET

---

Ce stage était un travail préliminaire pour la mise en place d'un projet qui va s'échelonner sur plusieurs années. Le dispositif mis en place ici semble adapté pour réaliser à l'avenir des tests de « matching-to-sample » afin de mesurer les capacités de discrimination, de catégorisation et de mémoire de travail chez la truite arc-en-ciel. Mon stage étant trop court pour obtenir des réponses à ces questions voici ce que l'on peut prévoir :

Lorsque les truites auront acquis individuellement les deux étapes d'habituation relatives à l'activation des tiges, elles réaliseront les tests d'application de concepts pour évaluer leurs capacités cognitives élaborées. Ainsi, elles passeront par des phases de pré-entraînement (Annexe IV). Le but sera de leur apprendre le concept demandé préalablement à la réalisation du test (Annexe V). Au total, les truites devront réaliser cinq tests, basés sur les concepts d'appariement puis d'étrangeté selon l'ordre suivant : matching-to-sample simultané (MTSs), matching-to-sample retardé (MTSd), oddity-from-sample simultané (OFSs), oddity-from-sample retardé (OFSd) et odd-one-out (OOO). Cet ordre n'a pas été choisi au hasard. En effet, d'après une étude réalisée sur le poisson rouge (*Carassius auratus*) les performances d'application des concepts sont meilleures lorsqu'un MTS est réalisé préalablement à un OOO (Zerbolio & Royalty, 1983). Afin de ne pas compliquer l'application des concepts, les truites réaliseront l'OFS suite au MTS car ces deux tests sont proches dans leur fonctionnement et que l'OFS se base sur un concept d'étrangeté comme l'OOO. Aussi, ce test sera systématiquement réalisé en simultané puis en retardé. En effet, le premier test ne faisant pas intervenir la mémoire de travail des truites, il sera plus simple à réaliser pour elles.

Par ailleurs, pour un même concept, plusieurs types de stimuli seront présentés aux truites afin de s'assurer qu'elles le généralisent. Ils permettront également d'évaluer les capacités visuelles et cognitives de l'espèce *Oncorhynchus mykiss*. Neuf types de stimuli seront présentés aux truites aux cours du projet (Annexe VI).

Pour commencer, les truites appliqueront des concepts en réalisant un choix sur la couleur et/ou la forme (Tableaux 2 et 3). Pour cela, deux gammes variées ont été créées en considérant les capacités des poissons. Pour rappel, les poissons sont capables de reconnaître des formes variées plus ou moins complexes et de différencier les couleurs. Ils peuvent même avoir des préférences. Actuellement, il y a peu de connaissances sur les capacités visuelles de la truite arc-en-ciel. L'application des concepts sur la couleur et la forme permettront (1) d'identifier si elles sont capables de différencier deux stimuli sur deux critères visuels additionnels. Ces deux critères seront ensuite séparés pour (2) évaluer si elles sont capables de différencier les stimuli sur un seul critère. Le choix de couleur permettra (3) d'évaluer si la préférence influence l'application des concepts, (4) d'évaluer si les truites sont capables de visualiser et de discriminer d'autres couleurs que celles déjà étudiées, comme le violet, le rose et le orange, ou encore (5) d'évaluer si elles sont capables de distinguer une gamme de couleur, ici de trois bleus. Le choix sur la forme permettra, d'autre part, (6) d'identifier leur capacité à discriminer des formes.

Par la suite, les truites réaliseront un choix sur la taille des stimuli, afin (7) d'évaluer leur acuité visuelle. Les stimuli seront affichés à une taille de 100 % ou à une taille de 40 %.

Comme il a été démontré que certaines espèces de poissons sont capables de catégoriser des images (Schluessel, Fricke & Bleckmann, 2012), cet exercice sera demandé aux truites. La catégorisation se fera sur des images d'objets présents dans leur environnement: truites, galets, plantes et tubes (Annexe VII). Ces stimuli seront de formes et de couleurs variables pour vérifier si (8) elles catégorisent l'objet en lui-même et non sur un critère commun.

Les poissons sont capables de dénombrer sur une numération absolue (Agrillo *et al.*, 2009). Pour cette raison, des stimuli composés de 1 à 5 formes identiques ou différentes, noires ou en couleur, et de tailles différentes, ont été créés (Annexe VII). Pour chaque nombre, cinq stimuli ont été créés. Comme les poissons dénombrent aussi sur la surface (Agrillo *et al.*, 2008), le diamètre de chaque stimulus a été fixé à 8 cm afin d'éliminer ce biais. De cette façon, (9) la capacité de numération absolue des truites sera évaluée.

Pour finir, lors de leur marquage qui a fait suite à la sélection en labyrinthe, chaque truite a été prise en photo et elles le seront encore à 10 mois de vie. Chaque identité et donc chaque groupe d'origine est connu. Certains congénères, issus d'un autre bassin leur sont donc étrangers. Ainsi, un choix sur la reconnaissance des congénères familiers pourra être fait. Cela permettra (10) d'évaluer leur capacité de discrimination de congénères familiers au stade présent et (11) leur capacité de représentation mentale de ce congénère à un stade de vie antérieur.

Le changement de test ou de type de stimuli aura lieu lorsqu'une truite aura atteint un nombre de réponses correctes stable à 70 % ou plus sur trois sessions consécutives.

Les truites, à vous de jouer ! La considération de votre bien-être en dépend !

## RÉFÉRENCES

---

- Agrillo, C, M Dadda, G Serena, and A Bisazza. 2009. "Use of Number by Fish." *PLoS One* 4 (3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004786>.
- Agrillo, Christian, Marco Dadda, and Angelo Bisazza. 2007. "Quantity Discrimination in Female Mosquitofish." *Animal Cognition* 10 (1): 63–70. <https://doi.org/10.1007/s10071-006-0036-5>.
- Agrillo, Christian, Marco Dadda, Giovanna Serena, and Angelo Bisazza. 2008. "Do Fish Count? Spontaneous Discrimination of Quantity in Female Mosquitofish." *Animal Cognition* 11 (3): 495–503. <https://doi.org/10.1007/s10071-008-0140-9>.
- Ahlbeck Bergendahl, I., S. Miller, C. Depasquale, L. Giralico, and V. A. Braithwaite. 2017. "Becoming a Better Swimmer: Structural Complexity Enhances Agility in a Captive-Reared Fish." *Journal of Fish Biology* 90 (3): 1112–17. <https://doi.org/10.1111/jfb.13232>.
- Alanära, Anders. 1996. "The Use of Self-Feeders in Rainbow Trout (*Oncorhynchus Mykiss*) Production." *Aquaculture* 145 (1–4): 1–20. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(96\)01346-4](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(96)01346-4).
- Aliah, Ratu Siti, Kosaku Yamaoka, Yoshikazu Inada, and Nobuhiko Taniguchi. 1990. "Effects of Triploidy on Tissue Structure of Some Organs n Ayu." *NIPPON SUISAN GAKKAISHI* 56 (4): 569–75. <https://doi.org/10.2331/suisan.56.569>.
- Arthur, David, and Edward Levin. 2001. "Spatial and Non-Spatial Visual Discrimination Learning in Zebrafish (*Danio Rerio*)." *Animal Cognition* 4 (2): 125–31. <https://doi.org/10.1007/s100710100111>.
- Ben-Simon, Avi, Ohad Ben-Shahar, Genadiy Vasserman, Mor Ben-Tov, and Ronen Segev. 2012. "Visual Acuity in the Archerfish: Behavior, Anatomy, and Neurophysiology." *Journal of Vision* 1218 (12): 1–19. <https://doi.org/10.1167/12.12.18>.
- Berejikian, B.A., S.B. Mathews, and T.P. Quinn. 1996. "Effects of Hatchery and Wild Ancestry and Rearing Environments on the Development of Agonistic Behavior in Steelhead Trout (&lt;I&gt;Oncorhynchus Mykiss&lt;/I&gt;) Fry." *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 53 (9): 2004–14. <https://doi.org/10.1139/cjfas-53-9-2004>.
- Berryman, Robert, William W. Cumming, Leila R. Cohen, and Daniel F. Johnson. 1965. "Acquisition and Transfer of Simultaneous Oddity." *Psychological Reports* 17 (3): 767–75. <https://doi.org/10.2466/pr0.1965.17.3.767>.
- Bitterman, M. E. 1965. "Phyletic Differences in Learning." *American Psychologist* 20 (6): 396–410. <https://doi.org/10.1037/h0022328>.
- Blough, Donald S. 1986. "Odd-Item Search by Pigeons: Method, Instrumentation, and Uses." *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers* 18 (5): 413–19. <https://doi.org/10.3758/BF03201403>.

- Braithwaite, Victoria A, and Anne G V Salvanes. 2005. "Environmental Variability in the Early Rearing Environment Generates Behaviourally Flexible Cod: Implications for Rehabilitating Wild Populations." *Proceedings. Biological Sciences* 272 (1568): 1107–13. <https://doi.org/10.1098/rspb.2005.3062>.
- Braun, Christoph, Nico K. Michiels, Ulrike E. Siebeck, and Dennis Sprenger. 2014. "Signalling Function of Long Wavelength Colours during Agonistic Male-Male Interactions in the Wrasse *Coris Julis*." *Marine Ecology Progress Series* 504 (Jerlov 1968): 277–86. <https://doi.org/10.3354/meps10760>.
- Broglio, Cristina, Antonia Gómez, Emilio Durán, Cosme Salas, and Fernando Rodríguez. 2011. "Brain and Cognition in Teleost Fish." In *Fish Cognition and Behavior*, 325–58. Oxford, UK: Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781444342536.ch15>.
- Buckingham, Jessica N, Bob B.M. M Wong, Gil G Rosenthal, Jessica N Buckinghaml, Bob B.M. M Wong, and Gil G Rosenthal. 2007. "Shoaling Decisions in Female Swordtails: How Do Fish Gauge Group Size?" *Source: Behaviour* 144 (11): 1333–46. <https://doi.org/10.1163/156853907782418196>.
- Campbell, F. W., and R. W. Gubisch. 1966. "Optical Quality of the Human Eye." *The Journal of Physiology* 186 (3): 558–78. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1966.sp008056>.
- Champ, Connor, Guy Wallis, Misha Vorobyev, Ulrike Siebeck, and Justin Marshall. 2014. "Visual Acuity in a Species of Coral Reef Fish: *Rhinecanthus Aculeatus*." *Brain, Behavior and Evolution* 83 (1): 31–42. <https://doi.org/10.1159/000356977>.
- Champagne, Danielle L., Carlijn C.M. Hoefnagels, Ronald E. de Kloet, and Michael K. Richardson. 2010. "Translating Rodent Behavioral Repertoire to Zebrafish (*Danio Rerio*): Relevance for Stress Research." *Behavioural Brain Research* 214 (2): 332–42. <https://doi.org/10.1016/J.BBR.2010.06.001>.
- Clayton, N S, D P Griffiths, N J Emery, and A Dickinson. 2001. "Elements of Episodic-like Memory in Animals." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* 356 (1413): 1483–91. <https://doi.org/10.1098/rstb.2001.0947>.
- Code Civil - Article 515-14. "Code Civil - Article 515-14." Legifrance. Accessed June 6, 2018. <https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?cidTexte=LEGITEXT000006070721&idArticle=LEGIARTI000030250342>.
- Colson, Violaine, Bastien Sadoul, Claudiane Valotaire, Patrick Prunet, Matthieu Gaumé, and Laurent Labbé. 2015. "Welfare Assessment of Rainbow Trout Reared in a Recirculating Aquaculture System: Comparison with a Flow-Through System." *Aquaculture* 436 (January): 151–59. <https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2014.10.047>.
- Colwill, Ruth M., Maria P. Raymond, Lisa Ferreira, and Holly Escudero. 2005. "Visual Discrimination Learning in Zebrafish (*Danio Rerio*)." *Behavioural Processes* 70 (1): 19–31. <https://doi.org/10.1016/J.BEPROC.2005.03.001>.

- Cooke, S J, K P Chandroo, T A Beddow, R D Moccia, and R S McKinley. 2000. "Swimming Activity and Energetic Expenditure of Captive Rainbow Trout *Oncorhynchus Mykiss* (Walbaum) Estimated by Electromyogram Telemetry." *Aquaculture Research* 31 (6): 495–505. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2109.2000.00470.x>.
- Deeley, M. A., and T. J. Benfey. 1995. "Learning Ability of Triploid Brook Trout." *Journal of Fish Biology* 46 (5): 905–7. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1995.tb01614.x>.
- Ebbesson, L. O. E., and V. A. Braithwaite. 2012. "Environmental Effects on Fish Neural Plasticity and Cognition." *Journal of Fish Biology* 81 (7): 2151–74. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2012.03486.x>.
- FEAP. 2017. "European Aquaculture Production Report 2008-2016," no. Novembre: 54.
- Ferrari, Sébastien, Sandie Millot, Didier Leguay, Béatrice Chatain, and Marie-Laure Bégout. 2015. "Consistency in European Seabass Coping Styles: A Life-History Approach." *Applied Animal Behaviour Science* 167 (June): 74–88. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2015.03.006>.
- Finger, T. E. 1983. "Organization of the Teleost Cerebellum." *Fish Neurobiology* 1: 261–84. <https://ci.nii.ac.jp/naid/10008646320/#cit>.
- Fraser, T. W. K., P. G. Fjelldal, J. E. Skjaeraasen, T. Hansen, and I. Mayer. 2012. "Triploidy Alters Brain Morphology in Pre-Smolt Atlantic Salmon (*Salmo Salar*) : Possible Implications for Behaviour." *Journal of Fish Biology* 81 (7): 2199–2212. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2012.03479.x>.
- Frech, Birte, Melanie Vogtsberger, and Christa Neumeyer. 2012. "Visual Discrimination of Objects Differing in Spatial Depth by Goldfish." *Journal of Comparative Physiology A* 198 (1): 53–60. <https://doi.org/10.1007/s00359-011-0685-y>.
- Ganz, Julia, Jan Kaslin, Dorian Freudenreich, Anja Machate, Michaela Geffarth, and Michael Brand. 2012. "Subdivisions of the Adult Zebrafish Subpallium by Molecular Marker Analysis." *The Journal of Comparative Neurology* 520 (3): 633–55. <https://doi.org/10.1002/cne.22757>.
- Giassi, Ana C.C., Erik Harvey-Girard, Bridget Valsamis, and Leonard Maler. 2012. "Organization of the Gymnotiform Fish Pallium in Relation to Learning and Memory: I. Cytoarchitectonics and Cellular Morphology." *The Journal of Comparative Neurology* 520 (15): 3314–37. <https://doi.org/10.1002/cne.23097>.
- Gibson, R. John, and Miles H. A. Keenleyside. 1966. "Responses to Light of Young Atlantic Salmon (*Salmo Salar*) and Brook Trout (*Salvelinus Fontinalis*)." *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* 23 (7): 1007–24. <https://doi.org/10.1139/f66-093>.
- Gierszewski, Stefanie, Horst Bleckmann, and Vera Schluessel. 2013. "Cognitive Abilities in Malawi Cichlids (*Pseudotropheus* Sp.): Matching-to-Sample and Image/Mirror-Image Discriminations." *PLoS ONE* 8 (2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0057363>.

- Giurfa, Martin, Shaowu Zhang, Arnim Jenett, Randolph Menzel, and Mandyam V. Srinivasan. 2001. "The Concepts of 'Sameness' and 'Difference' in an Insect." *Nature* 410 (6831): 930–33. <https://doi.org/10.1038/35073582>.
- Goldman, M, and S Shapiro. 1979. "Matching-to-Sample and Oddity-from-Sample in Goldfish." *Journal of the Experimental Analysis of Behavior* 31 (2): 259–66. <https://doi.org/10.1901/jeab.1979.31-259>.
- Gómez, A., E. Durán, C. Salas, and F. Rodríguez. 2010. "Cerebellum Lesion Impairs Eyeblink-like Classical Conditioning in Goldfish." *Neuroscience* 166 (1): 49–60. <https://doi.org/10.1016/J.NEUROSCIENCE.2009.12.018>.
- Gonda, A., G. Herczeg, and J. Merilä. 2009. "Adaptive Brain Size Divergence in Nine-Spined Sticklebacks ( *Pungitius Pungitius* )?" *Journal of Evolutionary Biology* 22 (8): 1721–26. <https://doi.org/10.1111/j.1420-9101.2009.01782.x>.
- Gonda, Abigél, Gábor Herczeg, and Juha Merilä. 2009. "Habitat-Dependent and -Independent Plastic Responses to Social Environment in the Nine-Spined Stickleback (*Pungitius Pungitius*) Brain." *Proceedings. Biological Sciences* 276 (1664): 2085–92. <https://doi.org/10.1098/rspb.2009.0026>.
- Goto, Kazuhiro, and Shigeru Watanabe. 2009. "Visual Working Memory of Jungle Crows (*Corvus Macrorhynchos*) in Operant Delayed Matching-to-Sample." *Japanese Psychological Research* 51 (3): 122–31. <https://doi.org/10.1111/j.1468-5884.2009.00400.x>.
- Griffiths, Siân W., and Anne E. Magurran. 1997. "Familiarity in Schooling Fish: How Long Does It Take to Acquire?" *Animal Behaviour* 53 (5): 945–49. <https://doi.org/10.1006/ANBE.1996.0315>.
- Hattori, Akihisa, and Kevin Warburton. 2003. "Microhabitat Use by the Rainbowfish *Melanotaenia Duboulayi* in a Subtropical Australian Stream." *Journal of Ethology* 21 (1): 15–22. <https://doi.org/10.1007/s10164-002-0070-y>.
- Herman, Louis M, John D Gory, John R Hovancik, and Gary L Bradshaw. 1989. "Generalization of Visual Matching by a Bottlenosed Dolphin (*Tursiops Truncatus*): Evidence for Invariance of Cognitive Performance with Visual and Auditory Materials." Vol. 15. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.694.1849&rep=rep1&type=pdf>.
- Hester, Frank J. 1968. "Visual Contrast Thresholds of the Goldfish (*Carassius Auratus*)." *Vision Research* 8 (10): 1315–36. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(68\)90053-9](https://doi.org/10.1016/0042-6989(68)90053-9).
- Houlihan, Dominic, Thierry Boujard, and Malcolm Jobling. 2008. "Food Intake in Fish." Accessed May 29, 2018. [http://agrifs.ir/sites/default/files/Food Intake in Fish.pdf#page=73](http://agrifs.ir/sites/default/files/Food%20Intake%20in%20Fish.pdf#page=73).
- Ito, Hironobu, and Naoyuki Yamamoto. 2009. "Non-Laminar Cerebral Cortex in Teleost Fishes?" *Biology Letters* 5 (1): 117–21. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2008.0397>.

- Johnsson, Jörgen I. 2010. "Individual Recognition Affects Aggression and Dominance Relations in Rainbow Trout, *Oncorhynchus Mykiss*." *Ethology* 103 (4): 267–82. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0310.1997.tb00017.x>.
- Karten, Harvey J. 2015. "Vertebrate Brains and Evolutionary Connectomics: On the Origins of the Mammalian 'Neocortex'." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* 370 (1684): 20150060. <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0060>.
- Katz, Jeffrey S, Anthony A Wright, and Kent D Bodily. 2007. "Issues in the Comparative Cognition of Abstract-Concept Learning." *Comparative Cognition & Behavior Reviews* 2 (January): 79–92. <https://doi.org/10.3819/ccbr.2008.20005>.
- Kihlslinger, Rebecca L, and Gabrielle A Nevitt. 2006. "Early Rearing Environment Impacts Cerebellar Growth in Juvenile Salmon." *The Journal of Experimental Biology* 209 (Pt 3): 504–9. <https://doi.org/10.1242/jeb.02019>.
- Krezymon, Alice. 2012. "Altérations Cellulaires Hippocampiques Liées à l'âge et Récupération Cognitive Induite Par Un Enrichissement Environnemental Chez Les Souris Tg2576 Modèles de La Maladie d'Alzheimer," December. <http://thesesups.ups-tlse.fr/1923/>.
- Laberge, Frédéric, and Toshiaki J Hara. 2001. "Neurobiology of Fish Olfaction: A Review." *Brain Research Reviews* 36 (1): 46–59. [https://doi.org/10.1016/S0165-0173\(01\)00064-9](https://doi.org/10.1016/S0165-0173(01)00064-9).
- Lema, Sean C., Mark J. Hodges, Michael P. Marchetti, and Gabrielle A. Nevitt. 2005. "Proliferation Zones in the Salmon Telencephalon and Evidence for Environmental Influence on Proliferation Rate." *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology* 141 (3): 327–35. <https://doi.org/10.1016/J.CBPA.2005.06.003>.
- Longo, Nicholas, and M. E. Bitterman. 1959. "Improved Apparatus for the Study of Learning in Fish." *The American Journal of Psychology* 72 (4): 616. <https://doi.org/10.2307/1419513>.
- Lou, Y. D., and C. E. Purdom. 1984. "Polyploidy Induced by Hydrostatic Pressure in Rainbow Trout, *Salmo Gairdneri* Richardson." *Journal of Fish Biology* 25 (3): 345–51. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1984.tb04881.x>.
- Luchiari, A. C., and J. Pirhonen. 2008. "Effects of Ambient Colour on Colour Preference and Growth of Juvenile Rainbow Trout *Oncorhynchus Mykiss* (Walbaum)." *Journal of Fish Biology* 72 (6): 1504–14. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2008.01824.x>.
- Mather, Jennifer A., and Ludovic Dickel. 2017. "Cephalopod Complex Cognition." *Current Opinion in Behavioral Sciences* 16: 131–37. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2017.06.008>.
- McFarlane, W.J., K.F. Cubitt, H. Williams, D. Rowsell, R. Moccia, R. Gosine, and R.S. McKinley. 2004. "Can Feeding Status and Stress Level Be Assessed by Analyzing Patterns of Muscle Activity in Free Swimming Rainbow Trout (*Oncorhynchus Mykiss* Walbaum)?" *Aquaculture* 239 (1–4): 467–84. <https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2004.05.039>.

- McIntyre, Dan C., and Linda M. Healy. 1979. "Effects of Telencephalon Damage on Intraspecies Aggression and Activity in Rainbow Trout (*Salmo Gairdneri*) Juveniles." *Behavioral and Neural Biology* 25 (4): 490–501. [https://doi.org/10.1016/S0163-1047\(79\)90257-7](https://doi.org/10.1016/S0163-1047(79)90257-7).
- Moureaux, Elodie. 2005. "Enrichissement de Milieu Pour Des Primates Non Humains En Quarantaine : Étude Expérimentale de l'influence de l'environnement Sonore Sur Le Comportement de *Macaca Fascicularis*." <http://oatao.univ-toulouse.fr/1340/>.
- Neumeier, C. 2003. "Wavelength Dependence of Visual Acuity in Goldfish." *Journal of Comparative Physiology A: Sensory, Neural, and Behavioral Physiology* 189 (11): 811–21. <https://doi.org/10.1007/s00359-003-0457-4>.
- Newport, C, G Wallis, S E Temple, and U E Siebeck. 2013. "Complex, Context-Dependent Decision Strategies of Archerfish, *Toxotes Chatareus*." *Animal Behaviour* 86 (6): 1265–74.
- Newport, Cait, Naomi F Green, Eva C McClure, Daniel C Osorio, Misha Vorobyev, N Justin Marshall, and Karen L Cheney. 2017. "Fish Use Colour to Learn Compound Visual Signals." *Animal Behaviour* 125: 93–100. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2017.01.003>.
- Newport, Cait, Guy Wallis, Yarema Reshitnyk, and Ulrike E. Siebeck. 2016. "Discrimination of Human Faces by Archerfish (*Toxotes Chatareus*)." *Scientific Reports* 6 (June): 1–7. <https://doi.org/10.1038/srep27523>.
- Newport, Cait, Guy Wallis, and Ulrike E. Siebeck. 2014. "Concept Learning and the Use of Three Common Psychophysical Paradigms in the Archerfish (*Toxotes Chatareus*)." *Frontiers in Neural Circuits* 8 (April): 1–13. <https://doi.org/10.3389/fncir.2014.00039>.
- Newport, Cait, Guy Wallis, and Ulrike E. Siebeck. 2015. "Same/Different Abstract Concept Learning by Archerfish (*Toxotes Chatareus*)." *PLoS ONE* 10 (11): 1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0143401>.
- Newport, Cait, Guy Wallis, Shelby E. Temple, and Ulrike E. Siebeck. 2013. "Complex, Context-Dependent Decision Strategies of Archerfish, *Toxotes Chatareus*." *Animal Behaviour* 86 (6): 1265–74. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2013.09.031>.
- Nilsson, J, L H Stien, J E Fosseidengen, R E Olsen, and T S Kristiansen. 2012. "From Fright to Anticipation: Reward Conditioning versus Habituation to a Moving Dip Net in Farmed Atlantic Cod (*Gadus Morhua*)." *Applied Animal Behaviour Science* 138 (1–2): 118–24. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2012.02.014>.
- Ohnishi, Ken. 1991. "Goldfish's Visual Information Processing Patterns in Food-Reinforced Discrimination Learning between Compound Visual Stimuli." *Journal of Comparative Physiology A: Sensory, Neural and Behavioral Physiology* 168 (5): 581–89. <https://doi.org/10.1007/BF00215080>.

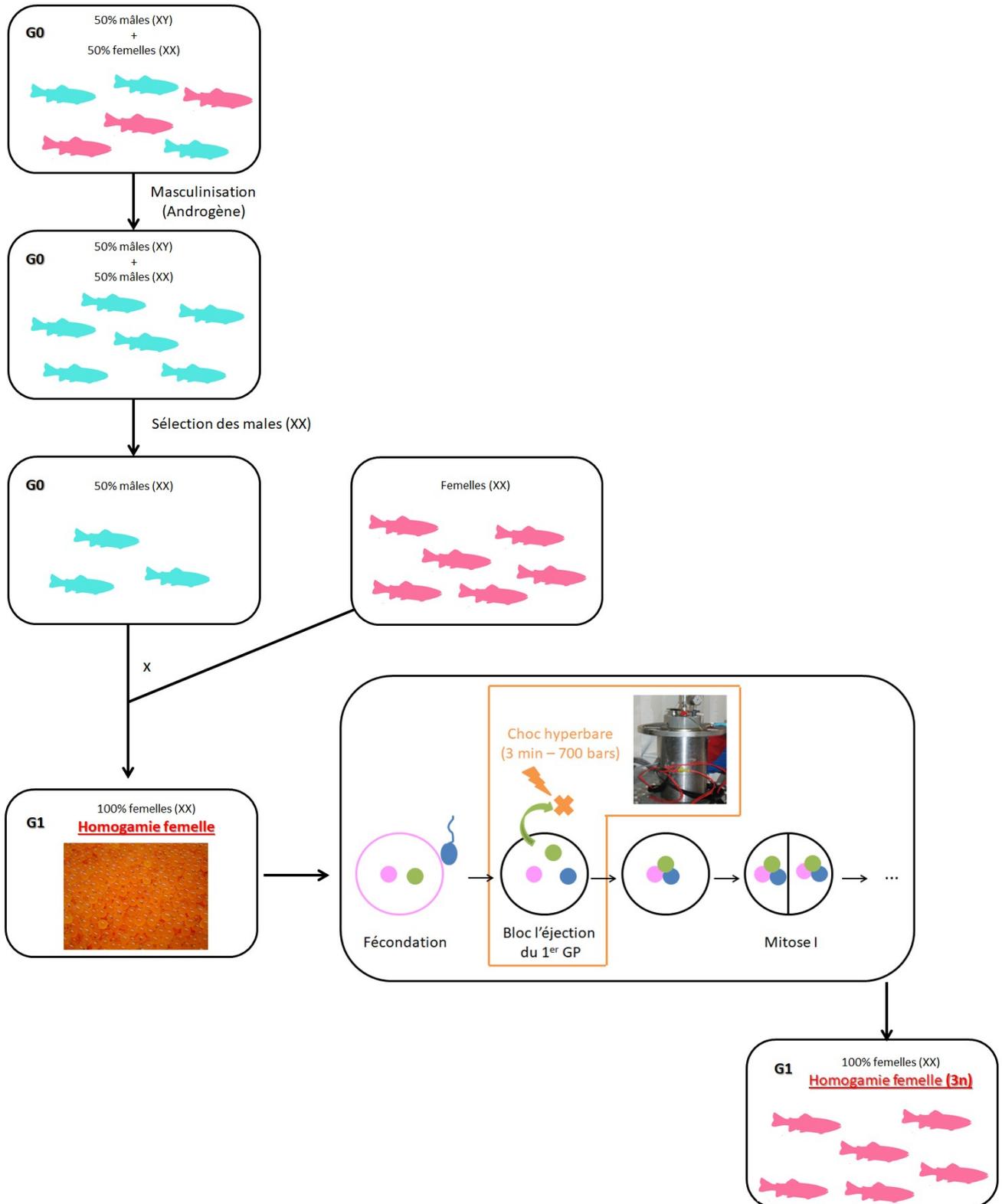
- Olsen, Deborah J, Alan Kamil, Russell P Balda, and Pamela J Nims. 1995. "Performance of Four Seed-Caching Corvid Species in Operant Tests of Nonspatial and Spatial Memory &quot;Performance of Four Seed-Caching Corvid Species in Operant." *Tests of Nonspatial and Spatial Memory* 58. <https://doi.org/10.1037/0735-7036.109.2.173>.
- Overman, W.H., and R.W. Doty. 1980. "Prolonged Visual Memory in Macaques and Man." *Neuroscience* 5 (11): 1825–31. [https://doi.org/10.1016/0306-4522\(80\)90032-9](https://doi.org/10.1016/0306-4522(80)90032-9).
- Parker, Amira N., Kerstin A. Fritches, Cait Newport, Guy Wallis, and Ulrike E. Siebeck. 2017. "Comparison of Functional and Anatomical Estimations of Visual Acuity in Two Species of Coral Reef Fish." *The Journal of Experimental Biology* 220 (13): 2387–96. <https://doi.org/10.1242/jeb.149575>.
- Person-Le Ruyet, Jeannine, Laurent Labbé, Nicolas Le Bayon, Armelle Sévère, Annick Le Roux, Hervé Le Delliou, and Loic Quémener. 2008. "Combined Effects of Water Quality and Stocking Density on Welfare and Growth of Rainbow Trout ( *Oncorhynchus Mykiss* )." *Aquatic Living Resources* 21 (2): 185–95. <https://doi.org/10.1051/alr:2008024>.
- Pollen, Alexander A, Adam P Dobberfuhr, Justin Scace, Mathias M Igulu, Susan C P Renn, Caroly A Shumway, and Hans A Hofmann. 2007. "Environmental Complexity and Social Organization Sculpt the Brain in Lake Tanganyikan Cichlid Fish." *Brain, Behavior and Evolution* 70 (1): 21–39. <https://doi.org/10.1159/000101067>.
- Rodríguez, F., E. Durán, A. Gómez, F.M. Ocaña, E. Álvarez, F. Jiménez-Moya, C. Broglio, and C. Salas. 2005. "Cognitive and Emotional Functions of the Teleost Fish Cerebellum." *Brain Research Bulletin* 66 (4–6): 365–70. <https://doi.org/10.1016/J.BRAINRESBULL.2004.11.026>.
- Salas, Cosme, Cristina Broglio, Fernando Rodríguez, Juan Carlos López, Manuel Portavella, and Blas Torres. 1996. "Telencephalic Ablation in Goldfish Impairs Performance in a 'Spatial Constancy' Problem but Not in a Cued One." *Behavioural Brain Research* 79 (1–2): 193–200. [https://doi.org/10.1016/0166-4328\(96\)00014-9](https://doi.org/10.1016/0166-4328(96)00014-9).
- Schluessel, V., G. Fricke, and H. Bleckmann. 2012. "Visual Discrimination and Object Categorization in the Cichlid *Pseudotropheus* Sp." *Animal Cognition* 15 (4): 525–37. <https://doi.org/10.1007/s10071-012-0480-3>.
- Schuster, S, and S Amtsfeld. 2002. "Pattern Vision and Template-Matching in *Gnathonemus Petersii*." *The Journal of Experimental Biology* 205 Biology 20: 549–557. <http://jeb.biologists.org/content/jexbio/205/4/549.full.pdf>.
- Segaar, J. 1961. "Telencephalon and Behaviour in *Gasterosteus Aculeatus*." *Behaviour* 18 (4): 256–87. <https://doi.org/10.1163/156853961X00169>.
- Siebeck, U. E., L. Litherland, and G. M. Wallis. 2009. "Shape Learning and Discrimination in Reef Fish." *Journal of Experimental Biology* 212 (13): 2113–19. <https://doi.org/10.1242/jeb.028936>.

- Siebeck, Ulrike E., Amira N. Parker, Dennis Sprenger, Lydia M. Mähger, and Guy Wallis. 2010. "A Species of Reef Fish That Uses Ultraviolet Patterns for Covert Face Recognition." *Current Biology* 20 (5): 407–10. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.12.047>.
- Small, Susan A., and Tillmann J. Benfey. 1987. "Cell Size in Triploid Salmon." *Journal of Experimental Zoology* 241 (3): 339–42. <https://doi.org/10.1002/jez.1402410309>.
- Smirnova, A A, O F Lazareva, and Z A Zorina. 2000. "Use of Number by Crows: Investigation by Matching and Oddity Learning." *Journal of the Experimental Analysis of Behavior* 73 (2): 163–76. <https://doi.org/10.1901/jeab.2000.73-163>.
- Sovrano, Valeria Anna, and Angelo Bisazza. 2008. "Recognition of Partly Occluded Objects by Fish." *Animal Cognition* 11 (1): 161–66. <https://doi.org/10.1007/s10071-007-0100-9>.
- Sovrano, Valeria Anna, and Angelo Bisazza. 2009. "Perception of Subjective Contours in Fish." *Perception* 38 (4): 579–90. <https://doi.org/10.1068/p6121>.
- Sovrano, Valeria Anna, Angelo Bisazza, and Giorgio Vallortigara. 2005. "Animals' Use of Landmarks and Metric Information to Reorient: Effects of the Size of the Experimental Space." *Cognition* 97 (2): 121–33. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2004.08.003>.
- Sovrano, Valeria Anna, Angelo Bisazza, and Giorgio Vallortigara. 2007. "How Fish Do Geometry in Large and in Small Spaces." *Animal Cognition* 10 (1): 47–54. <https://doi.org/10.1007/s10071-006-0029-4>.
- Squire, Larry R. 2004. "Memory Systems of the Brain: A Brief History and Current Perspective." *Neurobiology of Learning and Memory* 82 (3): 171–77. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2004.06.005>.
- Stephenson-Jones, Marcus, Jesper Ericsson, Brita Robertson, and Sten Grillner. 2012. "Evolution of the Basal Ganglia: Dual-Output Pathways Conserved throughout Vertebrate Phylogeny." *The Journal of Comparative Neurology* 520 (13): 2957–73. <https://doi.org/10.1002/cne.23087>.
- Swarup, H. 1959. "Effect of Triploidy on the Body Size, General Organization and Cellular Structure In *Gasterosteus Aculeatus* (L)." *Journal of Genetics* 56 (2): 143–55. <https://doi.org/10.1007/BF02984741>.
- Thompson, R.F., and J.E. Steinmetz. 2009. "The Role of the Cerebellum in Classical Conditioning of Discrete Behavioral Responses." *Neuroscience* 162 (3): 732–55. <https://doi.org/10.1016/J.NEUROSCIENCE.2009.01.041>.
- Walsh, R N, and R A Cummins. 1976. "OPEN-FIELD TEST - CRITICAL-REVIEW." *Psychological Bulletin* 83 (3): 482–504. <https://doi.org/10.1037//0033-2909.83.3.482>.
- Wilson, Alexander D. M., and Robert L. McLaughlin. 2010. "Foraging Behaviour and Brain Morphology in Recently Emerged Brook Charr, *Salvelinus Fontinalis*." *Behavioral Ecology and Sociobiology* 64 (11): 1905–14. <https://doi.org/10.1007/s00265-010-1002-4>.

- Wyzisk, Katja, and Christa Neumeyer. 2007. "Perception of Illusory Surfaces and Contours in Goldfish." *Visual Neuroscience* 24 (03): 291–98. <https://doi.org/10.1017/S095252380707023X>.
- Yerkes, R. M., and H. W. Nissen. 1939. "PRE-LINGUISTIC SIGN BEHAVIOR IN CHIMPANZEE." *Science* 89 (2321): 585–87. <https://doi.org/10.1126/science.89.2321.585>.
- Zentall, Thomas, and David Hogan. 1974. "Abstract Concept Learning in the Pigeon." *Journal of Experimental Psychology* 102 (3): 393–98. <https://doi.org/10.1037/h0035970>.
- Zerbolio, D. J., and Joel L. Royalty. 1983. "Matching and Oddity Conditional Discrimination in the Goldfish as Avoidance Responses: Evidence for Conceptual Avoidance Learning." *Animal Learning & Behavior* 11 (3): 341–48. <https://doi.org/10.3758/BF03199786>.

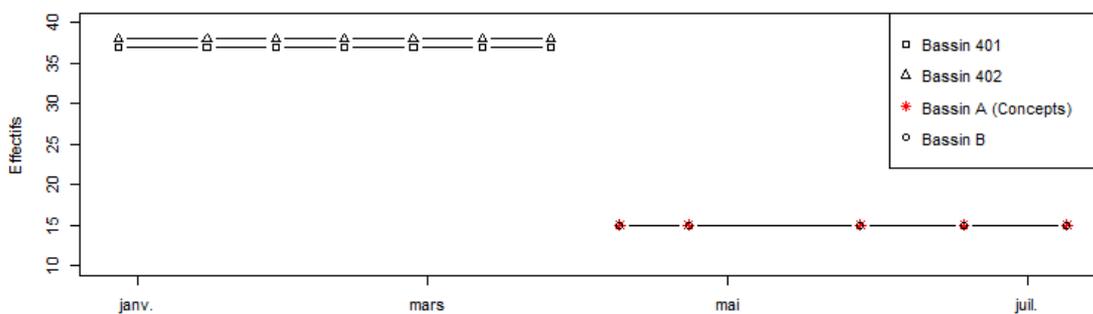
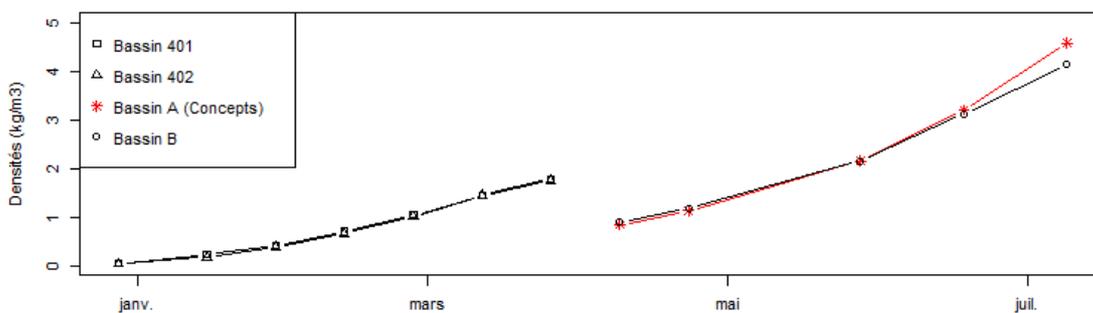
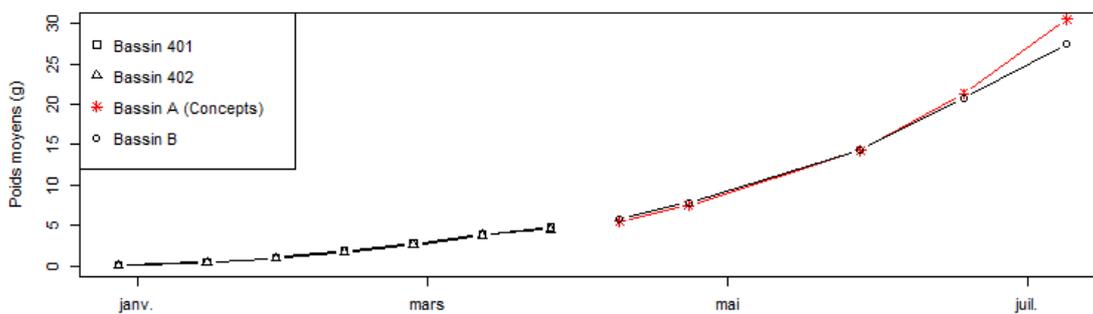
## ANNEXE I

### PROCESSUS DE CRÉATION DE LA SOUCHE EXPÉRIMENTALE (MONOSEXE FEMELLE ET TROPLOÏDIE)



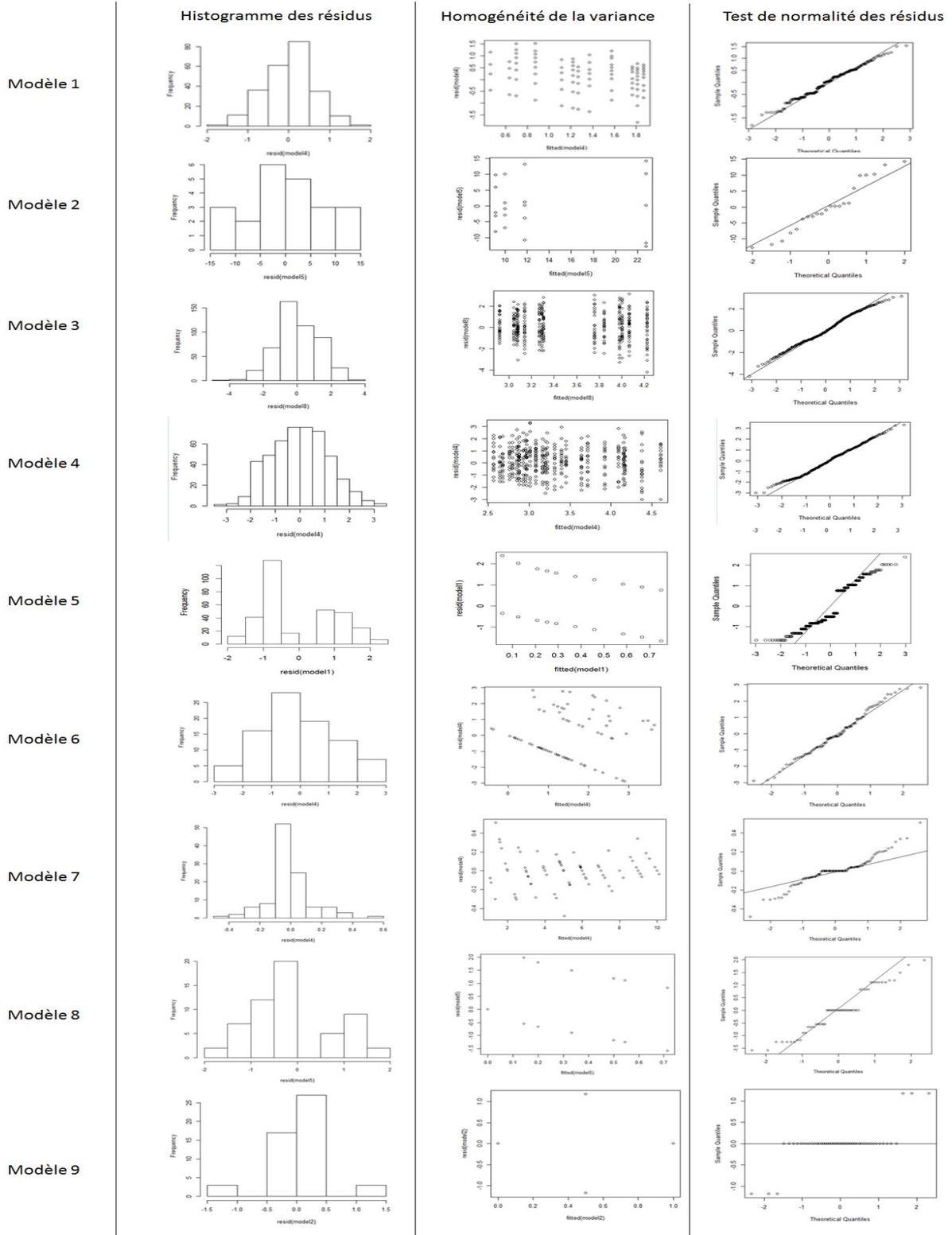
## ANNEXE II :

### EVOLUTION DE LA CROISSANCE, DE LA DENSITÉ D'ÉLEVAGE ET DE L'EFFECTIF DES TRUITES EXPÉRIMENTALES AU SEIN DES BASSINS D'ÉLEVAGE



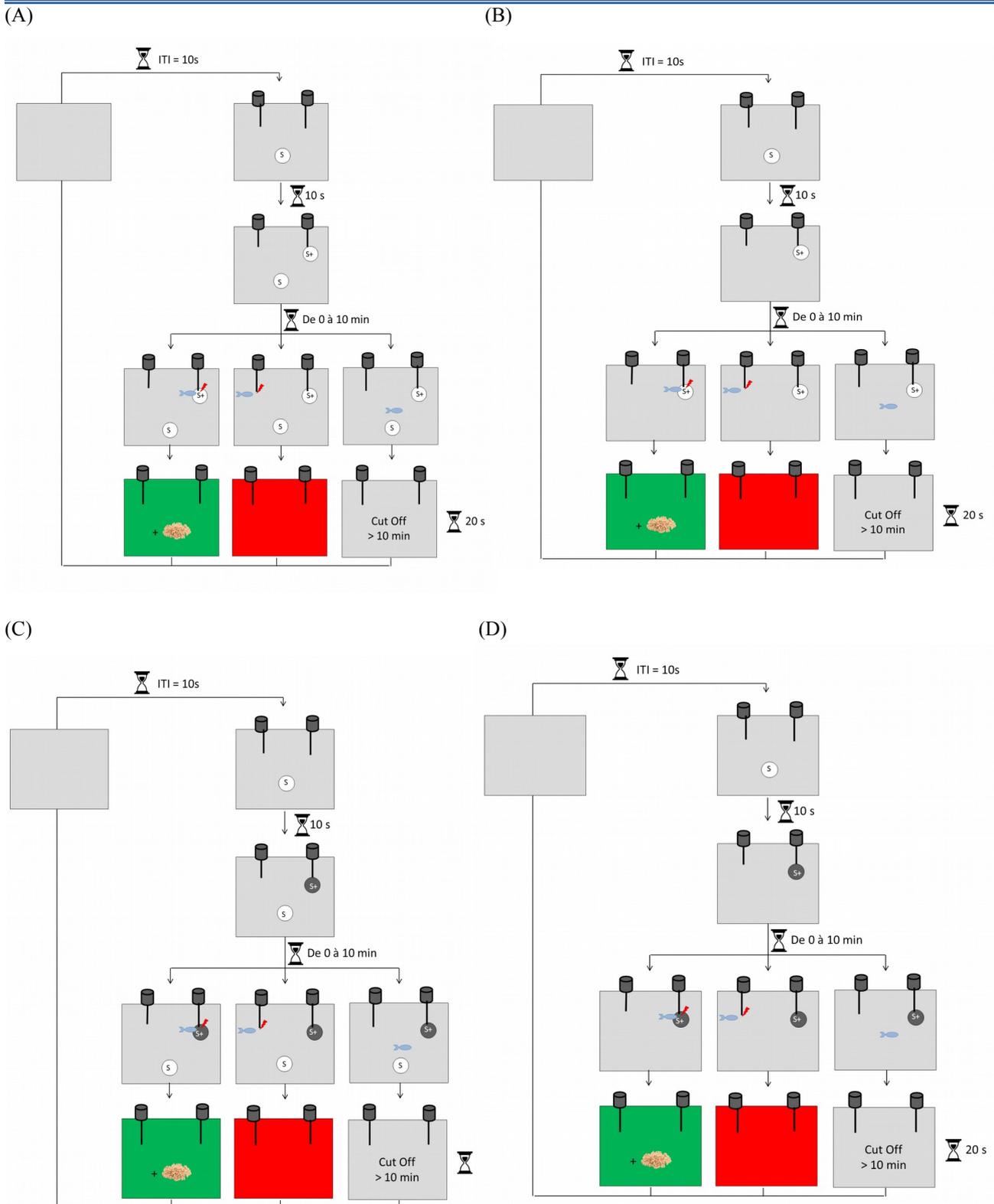
## ANNEXE III :

### NORMALITÉ ET HOMOSCÉDASTICITÉ DES MODÈLES UTILISÉS POUR LES ANALYSES STATISTIQUES



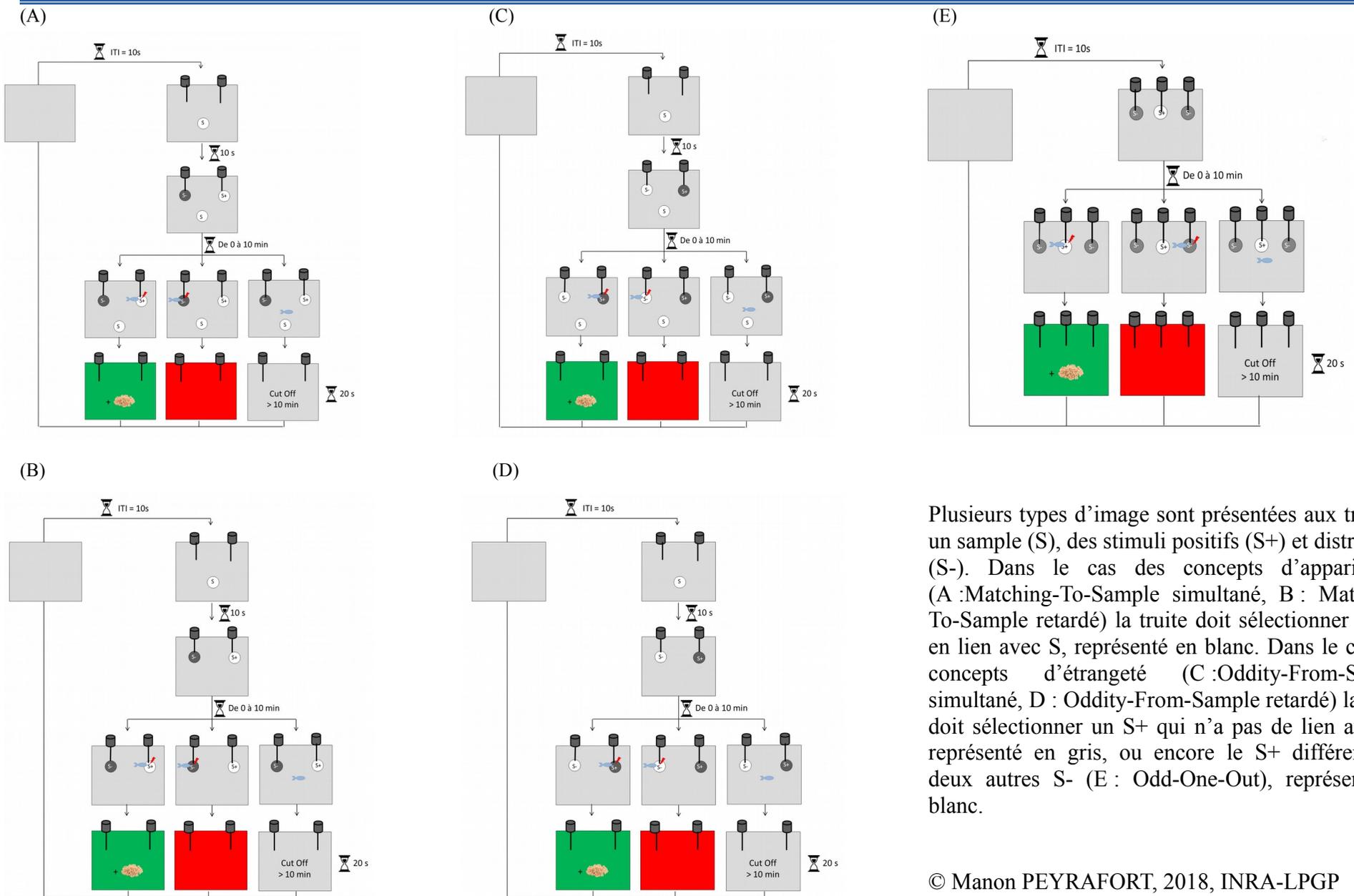
## ANNEXE IV :

### DÉROULEMENT DES PRÉ-ENTRAÎNEMENTS AUX TESTS D'APPLICATION DE CONCEPTS



Plusieurs types d'image sont présentées aux truites : un sample (S) et un stimulus positifs (S+). Dans le cas des concepts d'appariement (A : Matching-To-Sample simultané, B : Matching-To-Sample retardé) la truite doit sélectionner la tige correspondant à un S+ ayant un lien avec S, représenté en blanc. Dans le cas des concepts d'étrangeté (C : Oddity-From-Sample simultané, D : Oddity-From-Sample retardé) la truite doit sélectionner la tige correspondant à un S+ n'ayant pas de lien avec S, représenté en gris. Aucun pré-entraînement n'ont été fait pour le test OOO.

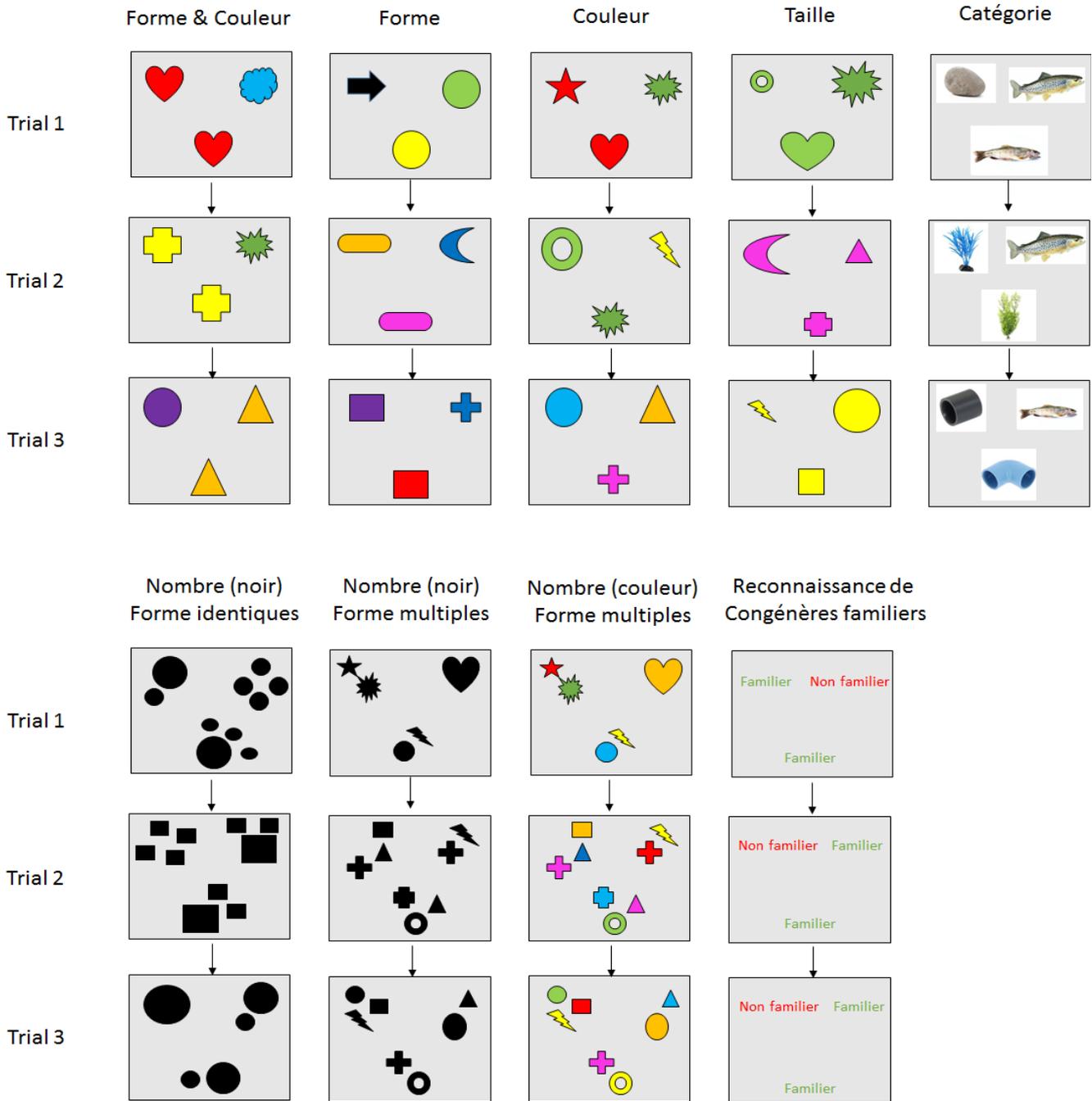
**ANNEXE V :**  
**DÉROULEMENT DES TESTS D'APPLICATION DE CONCEPTS**



Plusieurs types d'image sont présentées aux truites : un sample (S), des stimuli positifs (S+) et distrayants (S-). Dans le cas des concepts d'appariement (A : Matching-To-Sample simultané, B : Matching-To-Sample retardé) la truite doit sélectionner un S+ en lien avec S, représenté en blanc. Dans le cas des concepts d'étrangeté (C : Oddity-From-Sample simultané, D : Oddity-From-Sample retardé) la truite doit sélectionner un S+ qui n'a pas de lien avec S, représenté en gris, ou encore le S+ différent des deux autres S- (E : Odd-One-Out), représenté en blanc.

## ANNEXE VI :

### ILLUSTRATIONS SUR TROIS TRIALS DES NEUFS TYPES DE STIMULI PRÉSENTÉS AUX TRUITES LORS DES TESTS D'APPLICATION DE CONCEPTS - CAS DES TESTS MTSs ET OFSs



**ANNEXE VII :**  
**STIMULI DE CATÉGORIES DIFFÉRENTES ET STIMULI COMPOSÉS D'UN NOMBRE DE FORMES DIFFÉRENTES**  
**PRÉSENTÉS AUX TRUITES LORS DES TESTS D'APPLICATION DE CONCEPT**

Choix sur la catégorie		Choix sur le nombre									
Galet		1 élément	<table border="1"> <tr> <td style="text-align: center;">8 x 8 cm</td> <td></td> <td style="text-align: center;">8 x 8 cm</td> <td></td> </tr> </table>	8 x 8 cm		8 x 8 cm					
8 x 8 cm		8 x 8 cm									
Plante		2 éléments	<table border="1"> <tr> <td style="text-align: center;">5 x 5 cm 2,5 x 2,5 cm</td> <td></td> <td style="text-align: center;">3,5 x 3,5 cm</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">4 x 4 cm 2 x 2 cm</td> <td></td> <td style="text-align: center;">3 x 3 cm</td> <td></td> </tr> </table>	5 x 5 cm 2,5 x 2,5 cm		3,5 x 3,5 cm		4 x 4 cm 2 x 2 cm		3 x 3 cm	
	5 x 5 cm 2,5 x 2,5 cm		3,5 x 3,5 cm								
4 x 4 cm 2 x 2 cm		3 x 3 cm									
	3 éléments	<table border="1"> <tr> <td style="text-align: center;">4 x 4 cm 3 x 3 cm 2 x 2 cm</td> <td></td> <td style="text-align: center;">3 x 3 cm</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3,5 x 3,5 cm 2,5 x 2,5 cm 2 x 2 cm</td> <td></td> <td style="text-align: center;">2,5 x 2,5 cm</td> <td></td> </tr> </table>	4 x 4 cm 3 x 3 cm 2 x 2 cm		3 x 3 cm		3,5 x 3,5 cm 2,5 x 2,5 cm 2 x 2 cm		2,5 x 2,5 cm		
4 x 4 cm 3 x 3 cm 2 x 2 cm		3 x 3 cm									
3,5 x 3,5 cm 2,5 x 2,5 cm 2 x 2 cm		2,5 x 2,5 cm									
Tube		4 éléments	<table border="1"> <tr> <td style="text-align: center;">3 x 3 cm 2 x 2 cm 1,5 x 1,5 cm</td> <td></td> <td style="text-align: center;">2,5 x 2,5 cm</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2,5 x 2,5 cm 2 x 2 cm 1,5 x 1,5 cm</td> <td></td> <td style="text-align: center;">2 x 2 cm</td> <td></td> </tr> </table>	3 x 3 cm 2 x 2 cm 1,5 x 1,5 cm		2,5 x 2,5 cm		2,5 x 2,5 cm 2 x 2 cm 1,5 x 1,5 cm		2 x 2 cm	
3 x 3 cm 2 x 2 cm 1,5 x 1,5 cm		2,5 x 2,5 cm									
2,5 x 2,5 cm 2 x 2 cm 1,5 x 1,5 cm		2 x 2 cm									
Truite		5 éléments	<table border="1"> <tr> <td style="text-align: center;">3 x 3 cm 2 x 2 cm 1,5 x 1,5 cm</td> <td></td> <td style="text-align: center;">2 x 2 cm</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2,5 x 2,5 cm 2 x 2 cm 1,5 x 1,5 cm</td> <td></td> <td style="text-align: center;">2 x 2 cm</td> <td></td> </tr> </table>	3 x 3 cm 2 x 2 cm 1,5 x 1,5 cm		2 x 2 cm		2,5 x 2,5 cm 2 x 2 cm 1,5 x 1,5 cm		2 x 2 cm	
3 x 3 cm 2 x 2 cm 1,5 x 1,5 cm		2 x 2 cm									
2,5 x 2,5 cm 2 x 2 cm 1,5 x 1,5 cm		2 x 2 cm									



**Diplôme** : Master Sciences Biologiques Marines

**Spécialité** : Sciences Halieutiques et Aquacoles

**Spécialisation / option** : Aquaculture

**Enseignant référent** : Hervé LE BRIS

**Auteur** : Manon PEYRAFORT

**Date de naissance** : 26/06/1995

**Nb pages** : 33

**Annexes** : 7

**Année de soutenance** : 2018

**Organisme d'accueil** : INRA - Laboratoire de Physiologie et Génomique des Poissons

**Adresse** : Bâtiment 16A, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes

**Maître de stage** : Violaine COLSON

**Titre français** : Mise en place de l'étude visant à caractériser des capacités cognitives élaborées chez la truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*)

**Titre anglais** : Establishment of a study to identify the elaborate cognitive abilities of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)

**Résumé.** Dans le cadre du respect du bien-être des animaux de rente, les émotions et les capacités cognitives sont davantage considérées. Une étude évaluant les capacités cognitives élaborées de la truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*) a donc été mise en place. Dès la phase d'alevinage, des truites triploïdes ont été placées en environnement enrichi. (1) Dans cet environnement, leur comportement a été observé par des « scans sampling ». Les résultats montrent que les truites passent plus de temps à proximité des plantes en plastique et du tube en PVC, que des galets. (2) Un test d'apprentissage spatial en labyrinthe a ensuite été réalisé afin d'écarter le lot de truites en ne choisissant, pour la suite du projet, que les truites les plus performantes. Nous avons également mesuré l'effet de l'appétence de la récompense alimentaire (aliment enrobé vs aliment conventionnel) sur la vitesse d'apprentissage. L'apprentissage a été rapide (2 minutes en moyenne pour atteindre la récompense), du fait probable de l'enrichissement précoce du milieu, et davantage encore avec de l'aliment enrobé. (3) Quinze truites issues de cette sélection ont ensuite été entraînées en isolement à un paradigme de conditionnement opérant avec des self-feeders. L'étude montre que les truites isolées sont capables d'activer le self-feeder afin d'obtenir une récompense. Ce dispositif semble donc adapté pour réaliser à l'avenir des tests de « matching-to-sample » afin de mesurer les capacités de discrimination, de catégorisation et de mémoire de travail chez cette espèce.

**Abstract.** In the context of farm animal welfare emotions and cognitive capacities are now taken into account. The present study aimed at measuring complex cognitive capacities of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Triploid rainbow trout were placed in enriched environment from fry stages. (1) In this environment, their behavior was observed by "scans sampling". The results show that fish spent more time near the plastic plants and near the PVC pipe, than near the rocks. (2) A spatial learning test in a T-maze was realized in order to select the most performing trout for the continuation of the project and also to measure the effect of the food reward appetite on learning speed. The learning was fast (latency to obtain the reward : 2 minutes on average), possibly due to the early environmental enrichment. This latency was even shorter with the appetitive reward. (3) Fifteen selected fish were then trained in isolation to a paradigm of operant conditioning with self-feeders. We showed that isolated rainbow trout are capable of activating the self-feeder to obtain a food reward. This apparatus seems to be adapted perform future tests of « matching-to-sample » in order to measure the capacities of discrimination, categorization and working memory of this species.

**Mots-clefs** : truite arc-en-ciel, comportement, cognition, enrichissement, apprentissage spatial, conditionnement opérant, concept.

**Keywords** : rainbow trout, behaviour, cognition, enrichment, spatial learning, operant conditioning, concept.