

L'Institut Agro Rennes-Angers

Site d'Angers Site de Rennes

Année universitaire : 2022 - 2023

Spécialité :

Sciences Halieutiques et Aquacoles

Spécialisation (et option éventuelle) :

Aquaculture

Mémoire de fin d'études

d'ingénieur de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)

de master de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)

de l'Institut Agro Montpellier (étudiant arrivé en M2)

d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Etude de faisabilité technico-économique d'une unité de production en système recirculé : Cas de la Pisciculture Hennequart

Par : Auriane RUBIELLO



Soutenu à RENNES, le 15 septembre 2023

Devant le jury composé de :

Président : Hervé LE BRIS

Maître de stage : Vincent HENNEQUART

Enseignant référent : Carole ROPARS-COLLET

Autres membres du jury (Nom, Qualité) : Aurélien
TOCQUEVILLE, Responsable Aquaculture, ITAVI

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle de l'Institut Agro Rennes-Angers

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



Fiche de confidentialité et de diffusion du mémoire

Confidentialité

Non Oui si oui : 1 an 5 ans 10 ans

Pendant toute la durée de confidentialité, aucune diffusion du mémoire n'est possible ⁽¹⁾.

Date et signature du maître de stage ⁽²⁾ : 
(ou de l'étudiant-entrepreneur)

A la fin de la période de confidentialité, sa diffusion est soumise aux règles ci-dessous (droits d'auteur et autorisation de diffusion par l'enseignant à renseigner).

Droits d'auteur

L'auteur⁽³⁾ Nom Prénom RUBIELLO Auriane

autorise la diffusion de son travail (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

Oui Non

Si oui, il autorise


la diffusion papier du mémoire uniquement⁽⁴⁾

la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

la diffusion papier et électronique du mémoire (joindre dans ce cas la fiche de conformité du mémoire numérique et le contrat de diffusion)

(Facultatif) accepte de placer son mémoire sous licence Creative commons CC-BY-NC-Nd (voir Guide du mémoire Chap 1.4 page 6)

Date et signature de l'auteur :


23/08/2023

Autorisation de diffusion par le responsable de spécialisation ou son représentant

L'enseignant juge le mémoire de qualité suffisante pour être diffusé (immédiatement ou à la fin de la période de confidentialité)

Oui Non

Si non, seul le titre du mémoire apparaîtra dans les bases de données.

Si oui, il autorise

la diffusion papier du mémoire uniquement⁽⁴⁾

la diffusion papier du mémoire et la diffusion électronique du résumé

la diffusion papier et électronique du mémoire

Date et signature de l'enseignant :

26 sept 2023



(1) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation de l'Institut Agro, Rennes-Angers s'engagent à respecter cette confidentialité.

(2) Signature et cachet de l'organisme

(3) Auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études

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



Remerciements

Avant tout, je tiens vraiment à dire un énorme merci à toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide dans la réalisation de ce mémoire, et ont contribué à faire de ce stage une expérience vraiment inoubliable.

Je tiens tout particulièrement à remercier Vincent Hennequart pour sa confiance, sa bienveillance et les précieuses heures qu'il m'a consacrées au cours de ces six mois. Je le remercie également pour toutes les connaissances qu'il a pu m'apporter, autant sur l'aquaculture en étangs que sur le domaine acipenséricole.

Mes sincères remerciements s'adressent à l'ensemble des membres de la Pisciculture Hennequart pour leur accueil chaleureux, leur sympathie et leur disponibilité constante au fil de cette expérience.

Je souhaite également exprimer ma gratitude envers Arpád Rideg pour son accueil chaleureux en Hongrie, et pour m'avoir permis de plonger au cœur des piscicultures d'esturgeons ainsi que de la richesse culturelle de son pays.

Merci également à Pierre Garsi dont les conseils m'ont guidée dans les premières étapes de ce stage, notamment dans l'appréhension des systèmes aquacoles en circuit fermé.

Je tiens à adresser ma reconnaissance à toutes les personnes qui ont généreusement partagé leur temps pour me faire découvrir leurs installations et échanger avec moi sur les différents aspects de mon mémoire.

Last but not least, à ma mère, mon père et Marie, un immense merci pour votre soutien tout au long de cette période de stage et de rédaction.



Table des matières

Remerciements	
Glossaire	
Liste des abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des annexes	
Introduction	1
Contextualisation et objectif du projet	1
Périmètre du projet	3
Ressources et contraintes du projet	3
<i>A. La localisation du projet</i>	<i>3</i>
<i>B. L'eau d'élevage</i>	<i>4</i>
<i>C. Les requêtes de M. Hennequart</i>	<i>4</i>
Budget et délai du projet	4
Partie I - Etude bibliographique : Les systèmes recirculés en aquaculture pour l'élevage acipenséricole	5
I.1 Intérêts des systèmes recirculés en aquaculture	5
I.2 L'environnement du bassin d'élevage	6
<i>I.2.A Le bassin d'élevage</i>	<i>6</i>
<i>I.2.B Les caractéristiques physiques de l'eau d'élevage</i>	<i>6</i>
I.3 La filtration mécanique des matières en suspension	7
I.4 La filtration biologique	7
<i>I.4.A L'importance de la filtration biologique</i>	<i>7</i>
<i>I.4.B Les différents équipements de filtration biologique</i>	<i>8</i>
<i>I.4.C La dénitrification</i>	<i>9</i>
I.5 L'ozonation et la désinfection UV	10
I.6 La circulation de l'eau entre les compartiments	10
<i>I.6.A La mise en mouvement de l'eau</i>	<i>10</i>
<i>I.6.B Les connexions hydrauliques</i>	<i>11</i>
I.7 Les transferts de gaz	11
<i>I.7.A L'aération et l'oxygénation</i>	<i>11</i>
<i>I.7.B Le dégazage</i>	<i>12</i>
I.8 La gestion des effluents	13
Partie II – Démarche de travail	14
II.1 Les données d'élevage	14
<i>II.1.A Ouverture et débit de recirculation de l'unité de production</i>	<i>14</i>
<i>II.1.B Les besoins et les rejets des esturgeons</i>	<i>14</i>
II.2 Choix et dimensionnement de la nouvelle unité de production	15
<i>II.2.A Entretien et visite de terrain avec des professionnels de la filière</i>	<i>15</i>
<i>II.2.B Conception et dimensionnement du RAS</i>	<i>16</i>

II.3 Etude financière de la nouvelle unité de production	16
<i>II.3.A Les investissements et le plan de financement</i>	16
<i>II.3.B Le compte de résultat prévisionnel</i>	17
<i>II.3.C Les indicateurs économiques de la viabilité du projet</i>	18
<i>II.3.D L'analyse comparative et l'analyse de risque</i>	19
Partie III – Résultats	20
III.1 Les données d'élevage	20
<i>III.1.A Ouverture et débit de recirculation du RAS</i>	20
<i>III.1.B Les besoins et les rejets des esturgeons</i>	20
III.2 Choix et dimensionnement de la nouvelle unité de production	21
<i>III.2.A Entretien et visites de terrain avec des professionnels de la filière</i>	21
<i>III.2.B Conception et dimensionnement du RAS</i>	22
III.3 Etude de l'analyse financière de l'unité de production	26
<i>III.3.A Les investissements</i>	26
<i>III.3.B Le compte de résultat prévisionnel</i>	26
<i>III.3.C Les indicateurs économiques de la viabilité du projet</i>	27
<i>III.3.D L'analyse comparative</i>	28
Partie IV : Discussion	30
IV.1 Optimisation des paramètres opérationnels	30
<i>IV.1.A Système gravitaire : réduction des coûts énergétiques dans le RAS</i>	30
<i>IV.1.B Ensemencement des lits fluidisés : période cruciale pour la production</i>	31
IV.2 Objectif principal de l'unité de production : consolider durablement la production	31
<i>IV.2.A Comparaison avec le système d'élevage en étangs</i>	31
<i>IV.2.B La durabilité de l'état financier sur le long terme</i>	32
IV.3 Objectif final : la production de caviar	33
<i>IV.3.A Maximisation de la quantité de caviar</i>	33
<i>IV.3.B La qualité du produit final</i>	33
Conclusion	35
Bibliographie	36
Annexes	41



Glossaire

- **Dénitrification** : Réduction microbienne du nitrate (ions NO_3^-) en azote gazeux (N_2). La dénitrification est un processus anaérobie réalisé principalement par des bactéries hétérotrophes (Martens, 2005).
- **Étang piscicole** : Selon Balvay (1980), un étang est un plan d'eau artificiel et peu profond, pouvant être vidangé partiellement ou complètement selon des intervalles variables. Il est principalement conçu pour la pisciculture, avec une densité d'élevage extensif d'environ 180 kg/ha/an (Marcel, 1989). Ce milieu, géré en tant que véritable écosystème, permet l'élevage piscicole à destination de la consommation humaine, du repeuplement ou de la pêche de loisirs.
- **Indice de conversion** : Indicateur couramment utilisé dans tous les types d'élevage (aquacoles ou non) reflétant l'efficacité d'un aliment ou d'une stratégie alimentaire. En termes mathématiques, il correspond au rapport entre la quantité d'aliment distribué et le gain de masse d'un individu. Un IC faible indique une conversion alimentaire efficace (Tshering *et al.*, 2022).
- **Nitrification** : Oxydation biologique de l'azote ammoniacal (ion NH_4^+) en nitrite (ion NO_2^-) suivie de l'oxydation du nitrite en nitrate (ion NO_3^-). La nitrification est un processus aérobie réalisé principalement par des bactéries autotrophes (Geetha Preen *et al.*, 2021).
- **Ouverture (ou fermeture) d'un système aquacole** : L'ouverture, ou la fermeture, d'un système aquacole se réfère à l'intensité de la recirculation de l'eau d'élevage dans ce dernier. Un système « ouvert » échange fréquemment de l'eau avec des sources extérieures, tandis qu'un système « fermé » limite fortement cet apport en eau en la recyclant en interne. Cette intensité de recirculation est souvent exprimée en volume d'eau neuve par kilogramme d'aliment distribué ou, moins couramment, en volume d'eau neuve par kilogramme de poissons produits (Tocqueville *et al.*, 2019 ; Bregnballe, 2022).
- **Système recirculé aquacole** : Un système recirculé aquacole, ou Recirculating Aquaculture System (RAS) en anglais, est une méthode d'élevage qui comme son nom l'indique permet de recycler l'eau à l'intérieur du système grâce à différentes techniques d'épuration. Cette approche répond ainsi aux attentes environnementales en limitant les rejets d'eau polluée et en économisant de l'eau car seule une faible quantité d'eau neuve (entrant pour la première fois dans le système) est introduite. Les RAS peuvent être utilisés pour une variété d'espèces aquatiques, allant des poissons aux crustacés et mollusques, et permettent une maîtrise des conditions d'élevage, comme la température, le pH et la salinité (Ifremer, 2009).



Liste des abréviations

❖ Abréviations générales :

- **CA** : Chiffre d'affaires
- **CAF** : Capacité d'auto-financement
- **CL50** : Concentration médiane létale
- **COFA** : Coopération Française de l'Aquaculture
- **EBE** : Excédent Brut d'Exploitation
- **EUMOFA** : European Market Observatory for Fisheries and Aquaculture Products
- **FEAMPA** : Fonds européens pour les affaires maritimes, la pêche et l'aquaculture
- **HT** : Hors taxes
- **IC** : Indice de conversion
- **IE&A** : Ingénierie de l'Environnement & de l'Aménagement
- **IS** : Impôt sur les sociétés
- **ITAVI** : Institut technique de l'aviculture
- **MES** : Matières en suspension
- **pH** : Potentiel hydrogène
- **OFB** : Office français de la biodiversité
- **PE** : Polyéthylène
- **PEHD** : Polyéthylène haute densité
- **PVC** : Polychlorure de Vinyle
- **RAS** : Système recirculé aquacole
- **REX** : Résultat Brut d'Exploitation
- **RN** : Résultat Net
- **SGR** : Taux de croissance spécifique
- **SIG** : Solde intermédiaire de gestion
- **UV** : Ultraviolet
- **VA** : Valeur ajoutée

❖ Formules moléculaires :

- **ATP** : Adénosine triphosphate
- **Cl⁻** : Ion chlorure
- **CO₂** : Dioxyde de carbone
- **H⁺** : Ion hydronium
- **N** : Azote
- **NH₃** : Ammoniac
- **NH₄⁺** : Ion ammonium
- **NO₂⁻** : Nitrite
- **NO₃⁻** : Nitrate
- **O₂** : Dioxygène
- **O₃** : Ozone
- **P** : Phosphore



Liste des figures

Figure 1. Cycle d'élevage de l'esturgeon sibérien, <i>Acipenser baerii</i> , suivi par la pisciculture Hennequart.....	3
Figure 2. Cahier des charges de la création d'une unité de production en système recirculé....	4
Figure 3. Schéma de l'évolution du ratio m ³ d'eau neuve par kilogramme d'aliment distribué en élevages piscicoles (Tocqueville et al., 2019)	5
Figure 4. Principaux paramètres affectant la croissance et le bien-être des poissons d'élevage	5
Figure 5. Réactions du processus de nitrification dans un filtre biologique	8
Figure 6. Fonctionnement d'un lit fixe (1) et d'un lit fluidisé (2) (Bregnballe, 2022).....	9
Figure 7. Schéma de fonctionnement technique général d'un système RAS	13
Figure 8. Extrait du guide d'entretien pour les entretiens semi-directifs.....	15
Figure 9. Les soldes intermédiaires de gestion (SIG).....	18
Figure 10. Le budget de trésorerie.....	19
Figure 11. Dimensions d'un hangar SCREB pour la nouvelle unité de production.....	22
Figure 12. Schématisation d'un bassin d'élevage en vue aérienne	22
Figure 13. Schématisation (1) et agencement en vue aérienne (2) du système de filtration d'un RAS de l'unité de production.....	25
Figure 14. Répartition des postes de consommation énergétique (1) et des coûts de maintenance (2) de l'unité de production	27
Figure 15. Evolution des bénéfices nets sur une période de 10 ans après la mise en place de l'unité de production.....	27
Figure 16. Les SIG de l'année N (1) et de l'année N+9 (2) de l'unité de production.....	28
Figure 17. Variation du solde de trésorerie sur une période de 10 ans après la mise en place de l'unité de production.....	28
Figure 18. Comparaison des coûts de production de l'élevage en étangs et en système recirculé pour la production d'un kilogramme d'esturgeon sibérien entre 700gr et 3kg	29
Figure 19. Evolution des bénéfices nets sur 10 ans selon 4 scénarii de gestion d'élevage	29
Figure 20. Matrice SWOT du projet de construction d'une unité de production en RAS.....	34



Liste des tableaux

Tableau 1. Propriétés des différents types de bassin d'élevage (Bregnballe, 2022)	6
Tableau 2. Caractéristiques des principales techniques de filtration des MES (Muir, 1982)	7
Tableau 3. Calcul des 4 paramètres essentiels pour l'élevage de 7000 esturgeons de 3kg,	20
Tableau 4. Besoins et rejets d'une unité de production aquacole accueillant 7000 esturgeons de 3kg, de densité maximale de 20 kg/m ³	20
Tableau 5. Synthèse des entretiens semi-directifs concernant les recommandations et les points de vigilance des équipements de filtration d'un RAS de l'unité de production	21
Tableau 6. Dimensionnement d'un lit fluidisé pour un RAS.....	23
Tableau 7. Coûts d'investissement de l'unité de production en système recirculé	26
Tableau 8. Plan de financement de l'unité de production en système recirculé	26
Tableau 9. Seuils de rentabilité de l'année N et de l'année N+9 de l'unité de production.....	27
Tableau 10. Prix du caviar au kilo pour les particuliers de 6 entreprises françaises de production acipenséricole	33



Liste des annexes

Annexe 1. Plan du site de Fernin de la pisciculture Hennequart	42
Annexe 2. Synthèse de l'analyse des paramètres physico-chimique et microbiologiques de l'eau de forage, réalisé le 06/10/2022 par CARSO – Laboratoire Santé Environnement Hygiène de Lyon	43
Annexe 3. Profil nutritionnel indicatif de l'aliment STURGEON GROWER® de Le Gouessant Aquaculture	44
Annexe 4. Données techniques d'un filtre à tambour 63 µm par arrivée par tuyau (série 120, 6 plaques) de Faivre Industrie Environnement	45
Annexe 5. Données techniques d'une soufflante HPE Séries HSC0415-1MT301, vendue par la Coopération Française de l'Aquaculture (COFA)	46
Annexe 6. Spécifications techniques de la pompe basse-pression type 04 de la marque LINN, vendue par Aqualor.....	48
Annexe 7. Spécifications techniques d'un aérateur de surface Flobull 1 CV de Faivre Industrie Environnement.....	49
Annexe 8. Agencement d'un hangar de l'unité de production en système recirculé.....	50
Annexe 9. Durées et valeurs d'amortissement économique des immobilisations nécessaires à l'unité de production sur une période de 10 ans	51
Annexe 10. Amortissements d'emprunt et quote-parts de subvention sur une période de 10 ans dans le cadre du projet d'une nouvelle unité de production	52
Annexe 11. Compte de résultat prévisionnel sur 10 ans dans le cadre du projet d'une nouvelle unité de production en système recirculé.....	53
Annexe 12. Budget de trésorerie du projet d'une nouvelle unité de production sur une période de 10 ans.....	534



Introduction

Imaginez un paysage pittoresque, où des étangs tranquilles s'étendent à perte de vue, reflétant le ciel azuré. Au cœur de cette scène bucolique, des esturgeons majestueux évoluent gracieusement dans leurs eaux cristallines. Ces poissons d'exception, convoités pour leur chair délicate et leur précieux caviar, ont depuis longtemps captivé l'attention des gastronomes et des amoureux de la nature. Cependant, derrière cette image idyllique se cachent des défis environnementaux et économiques considérables. L'élevage d'esturgeons, pratiqué dans des systèmes d'étangs traditionnels, est confronté à des problématiques telles que la dégradation de l'écosystème environnant, la demande croissante de ressources en eau ou encore les contraintes saisonnières de production. Face à ces enjeux, une solution innovante émerge : les systèmes recirculés en aquaculture (RAS) adaptés aux besoins spécifiques de l'élevage acipenséricole.

Contextualisation et objectif du projet



La Sologne est une région naturelle forestière française, localisée sur trois départements (Loir-et-Cher, Loiret et Cher). Elle est largement connue pour ses 3 000 étangs, classés site Natura 2000 ZPS « étangs de Sologne », qui couvrent près de 3% de sa superficie, soit 11 500 hectares (Richier *et al.*, 2016).

Parmi les grandes régions d'étangs françaises, la Sologne est incontestablement celle qui subit le plus grand préjudice suite à l'abandon de la gestion traditionnelle de ses étangs. Face à un rendement économique insatisfaisant et à l'invasion du grand cormoran (*Phalacrocorax carbo*), nombre de propriétaires abandonnent la pisciculture, privilégiant souvent la chasse au grand gibier. Depuis les années 1990, près des deux tiers des étangs sont concernés par cette transition (Hennequart, 1999). Faute d'une gestion adéquate, ce désintérêt envers l'aquaculture d'étang a entraîné une détérioration des ceintures d'hélophytes, progressivement envahies par les saules qui ne sont plus maîtrisés (IE&A, 2011), provoquant par conséquent la disparition de plusieurs espèces d'anatidés qui dépendent des roselières, comme le butor étoilé, *Botaurus stellaris*, ou la locustelle lusciniöide, *Locustella luscinioides* (Mabilleau & Pelsy, 2013). Ainsi, la prospérité des populations d'oiseaux nicheurs dans les étangs piscicoles ne peut être expliquée qu'en prenant en compte simultanément l'état du peuplement piscicole et la productivité primaire de l'écosystème aquatique, reflétant l'état trophique de l'environnement. Les résultats des diverses études régionales indiquent que la pisciculture extensive est loin d'être un obstacle à la reproduction des anatidés dans les étangs, à condition que la gestion adoptée ne compromette pas le développement de la végétation aquatique, notamment les herbiers de macrophytes (Broyer & Curtet, 2011), que ce soit en raison d'une prolifération excessive d'algues (eutrophisation) ou de densités trop élevées de cyprinidés (Broyer & Curtet, 2012).

Le phénomène d'eutrophisation est directement lié à l'augmentation des températures des plans d'eau. En effet, cette élévation peut entraîner une sous-saturation en oxygène près du fond, inférieure à 1,5 mgO₂/L, déséquilibrant ainsi le rapport N/P suite à un relargage de phosphore par le sédiment (Combrouze, 2004). Une étude en cours, réalisée par l'OFB, vise à suivre l'évolution des températures des étangs de Sologne sur une période de 5 à 10 ans. Jusqu'à présent, aucune étude n'a été menée concernant l'évolution des températures de l'eau des étangs, que ce soit en Sologne, en Bresse ou dans les Dombes (régions d'étangs françaises similaires). Ce développement de cyanobactéries, du genre *Microcystis*, *Anabaena* ou *Planktothrix*, provoque alors une augmentation de la consommation d'oxygène, en particulier pendant la nuit, période durant laquelle la photosynthèse est négligeable (Sarazin *et al.*, 2002). Cela implique des dépenses énergétiques plus importantes (aération de surface) et une cessation de la croissance des poissons en raison de l'arrêt de l'alimentation afin de préserver l'oxygène restant de l'étang. Dans une moindre mesure, certaines cyanobactéries peuvent également générer une production de toxines, pouvant altérer la qualité gustative du poisson (Robin & Vallod, 2001).

Implantée en plein cœur de la Sologne des Etangs à Saint-Viâtre (41210), la Pisciculture Hennequart, créée en 1974 par Jean Hennequart, est une entreprise familiale spécialisée dans la polyculture extensive de poissons d'étangs. En 2012, afin de diversifier la production, les deux associés actuels, Patricia et Vincent Hennequart, ont mis en place une production d'esturgeons et de caviar grâce à un laboratoire sur site. Deux espèces d'esturgeons y sont élevées : l'esturgeon sibérien (*Acipenser baerii*) et l'esturgeon russe (*Acipenser gueldenstaedtii*).

C'est dans ce contexte, afin de prévenir l'augmentation des phénomènes d'eutrophisation déjà existants, que la Pisciculture Hennequart envisage la création d'une nouvelle unité de production en système recirculé. Par définition, les systèmes recirculés aquacoles (RAS) visent à recycler l'eau utilisée afin de maîtriser les rejets d'effluents dans l'environnement et d'en limiter la dépendance de l'aquaculture (Tocqueville *et al.*, 2019). Cette nouvelle unité de production permettrait donc de libérer environ 20% de la surface en eau des étangs de la pisciculture et permettrait de réduire l'impact de l'appauvrissement des étangs sur la production en diminuant la densité d'esturgeons dans ces derniers, tout en consolidant sa production dans les années futures.

Le principal objectif de ce mémoire est de réaliser une étude de faisabilité d'une unité de production en système recirculé en aquaculture (RAS) adaptée aux besoins spécifiques de l'élevage acipenséricole.

Afin d'atteindre notre objectif, nous adopterons une méthodologie rigoureuse reposant sur une analyse bibliographique approfondie ainsi que sur des entretiens réalisés avec des professionnels de la filière.

Nous débuterons par une présentation générale des systèmes recirculés en aquaculture en prenant en considération les paramètres de l'eau d'élevage essentiels à la croissance et au bien-être des esturgeons. Par la suite, nous nous consacrerons à la conception détaillée de l'unité de production, en abordant tant son agencement que son dimensionnement, puis nous évaluerons sa faisabilité économique par l'estimation des coûts d'investissement, de fonctionnement et de maintenance. Enfin, nous examinerons les éventuels points de blocage rencontrés au cours de notre étude et nous proposerons des alternatives viables pour les surmonter.

Périmètre du projet

Pour l'esturgeon sibérien (*Acipenser baerii*), la Pisciculture Hennequart maîtrise tout le cycle d'élevage de la reproduction jusqu'à la femelle mature en état de fournir du caviar (Figure 1). Il est important de replacer le projet dans l'itinéraire technique actuel afin de comprendre par la suite l'impact potentiel de la nouvelle unité de production sur les qualités finales du produit ainsi que sur l'activité économique de l'entreprise (retour sur investissements notamment).

Actuellement, la Pisciculture Hennequart dispose d'une population de géniteurs d'*Acipenser baerii*, lui permettant de réaliser une reproduction annuelle directement sur le site. Après une période de grossissement larvaire puis des juvéniles en système recirculé, les esturgeons âgés d'un an sont transférés soit vers un deuxième site de production en système recirculé, la Ferme marine de la Durançole (Saint-Chamas, 13250), soit dans des étangs. Le projet vise alors à récupérer les esturgeons issus de ce circuit qui seraient normalement destinés aux étangs (au total 7 000 esturgeons). Dans le cadre du projet, ils seront alors élevés en système recirculé, à partir d'un poids de 700g jusqu'à ce qu'ils atteignent un poids de 3kg, âge auquel ils peuvent être sexés.

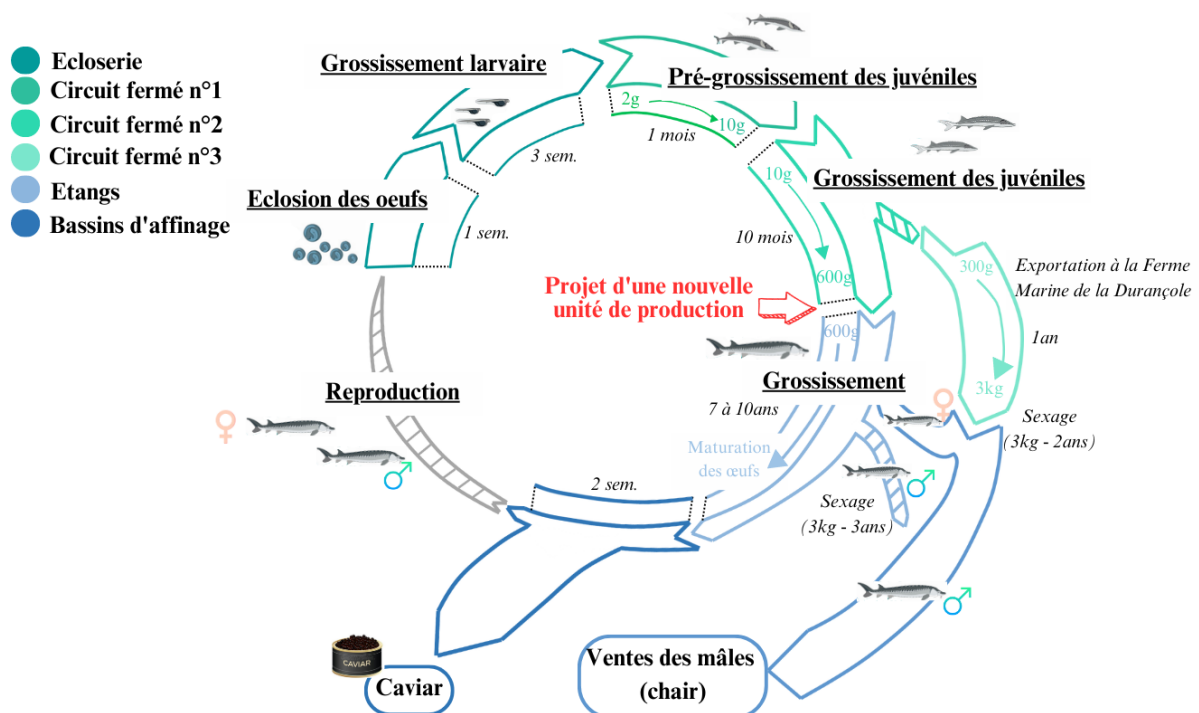


Figure 1. Cycle d'élevage de l'esturgeon sibérien, *Acipenser baerii*, suivi par la pisciculture Hennequart

Ressources et contraintes du projet

A. La localisation du projet

La nouvelle unité de production sera implantée sur le site de Fernin, situé à environ 5km au nord-est du site principal de la Pisciculture Hennequart (plan en Annexe 1). Actuellement, ce site est composé de 14 étangs d'élevage de 0,5 à 1 hectare et d'une habitation rattachée à l'entreprise. Le terrain appartient à la pisciculture et n'est pas visible de la route principale. Ainsi, l'ajout d'un hangar aquacole n'impactera pas esthétiquement le paysage.

B. L'eau d'élevage

L'eau de la nouvelle unité de production proviendra d'un forage déjà existant, puisant dans les réseaux aquifères des Calcaires de Beauce, une nappe captive sous les Sables de Sologne et de l'Orléanais. Son taux de remplissage est défini comme étant normal à faible, selon un état des lieux des aquifères émis par la région Centre-Val-de-Loire (2023).

D'après une analyse de l'eau du forage sur plus de 200 paramètres physicochimiques et bactériologiques, tous ces derniers sont bien inférieurs aux limites maximales de qualité autorisant la consommation de l'eau, donc également l'élevage piscicole. Il n'est donc pas nécessaire d'envisager un traitement préalable de l'eau. Le forage est situé à 50m et la température de sortie est à 14°C. Une synthèse de l'analyse des paramètres peut être retrouvée à l'Annexe 2.

C. Les requêtes de M. Hennequart

Dans le cadre de son projet, M. Hennequart désire conserver une densité maximale de 20 kg de poissons/m³. Malgré une installation en système recirculé, il souhaite que les conditions d'élevage soient similaires aux stades précédents afin de limiter le stress pour les esturgeons. De plus, le débit d'eau neuve provenant du forage ne pourra excéder 5 m³/h. Cette contrainte est liée au forage déjà mis en place. Il ambitionne un renouvellement de 200 à 300L d'eau neuve par heure pour 50m³ d'élevage.

L'aliment d'élevage utilisé sera le STURGEON GROWER[®] du fournisseur Le Gouessant. Il comporte 47% de protéines pour 13% de lipides. Le profil nutritionnel de cet aliment est indiqué dans l'Annexe 3. Cet aliment est déjà utilisé par la Pisciculture Hennequart à partir du stade précédent mais également pour l'élevage en étang.

Enfin, malgré des coûts d'investissement et énergétiques plus importants, M. Hennequart souhaite conserver une autonomie optimale de chaque bassin d'élevage afin de faciliter la maintenance et la gestion du cheptel.

Budget et délai du projet

Le budget spécifique dédié à la faisabilité de ce projet n'a pas été fixé de manière préliminaire. Toutefois, dans un souci d'optimisation, M. Hennequart souhaite prioriser la réduction des coûts de maintenance et de fonctionnement plutôt que les coûts d'investissement. Il est essentiel de noter que le déploiement complet du projet est prévu d'ici avril 2024.

La Figure 2 vise à récapituler le cahier des charges initial du projet.

- | | | |
|---|---|---|
| 1 Contextualisation <ul style="list-style-type: none">• Productivité de plus en plus faible des étangs• Augmentation du phénomène d'eutrophisation | 3 Périmètre du projet <ul style="list-style-type: none">• <u>Espèce</u>: <i>Acipenser baerii</i>• <u>Poids</u>: 700gr à 3kg• <u>Nombre d'individus</u>: 7 000 | 5 Contraintes du projet <ul style="list-style-type: none">• <u>Densité</u>: < 20 kg/m³• <u>Débit d'eau neuve</u>: < 5m³/h• <u>Aliment</u>: STURGEON GROWER[®]• <u>Caractéristique</u>: Autonomie des bassins |
| 2 Objectif du projet <ul style="list-style-type: none">• Consolider la production de caviar (~3 tonnes par an)• Création d'une unité de production en système recirculé | 4 Ressources du projet <ul style="list-style-type: none">• <u>Localisation</u>: Site de Fernin• <u>Lieu de rejets</u>: étang des Vallées• <u>Apport d'eau</u>: Forage à 14°C | 6 Budget et délais <ul style="list-style-type: none">• <u>Budget</u>: Indéterminé• <u>Délais</u>: Avril 2024 (fin du projet) |

Figure 2. Cahier des charges de la création d'une unité de production en système recirculé



Partie I - Etude bibliographique : Les systèmes recirculés en aquaculture pour l'élevage acipenséricole

Dans un premier temps, nous allons nous pencher sur les caractéristiques des systèmes recirculés en aquaculture, en prenant en compte les différents équipements les composants. Les paramètres d'élevage acipenséricole et les bases de dimensionnement de chaque équipement sont également indiqués.

I.1 Intérêts des systèmes recirculés en aquaculture

La méthode d'élevage évoquée dans le cadre de cette étude est celle des systèmes aquacoles en recirculation, parfois incorrectement qualifiés de « circuit fermé » et communément appelés « circuit recirculé » ou « RAS » (Recirculated Aquaculture Systems). Les RAS sont composés de différents organes permettant une filtration et un traitement de l'eau d'élevage. La Figure 3 vise à résumer l'évolution de l'intensité de recirculation des systèmes d'élevage piscicole vis-à-vis de la ressource d'eau neuve : du système le plus répandu « circuit ouvert » au RAS plus ou moins complexe par ajout de différents organes techniques. Pour cela, on utilise généralement le ratio m^3 d'eau neuve utilisée par kg d'aliment distribué, même s'il est également possible d'exprimer le pourcentage de recirculation de l'eau d'élevage (Tocqueville *et al.*, 2019).

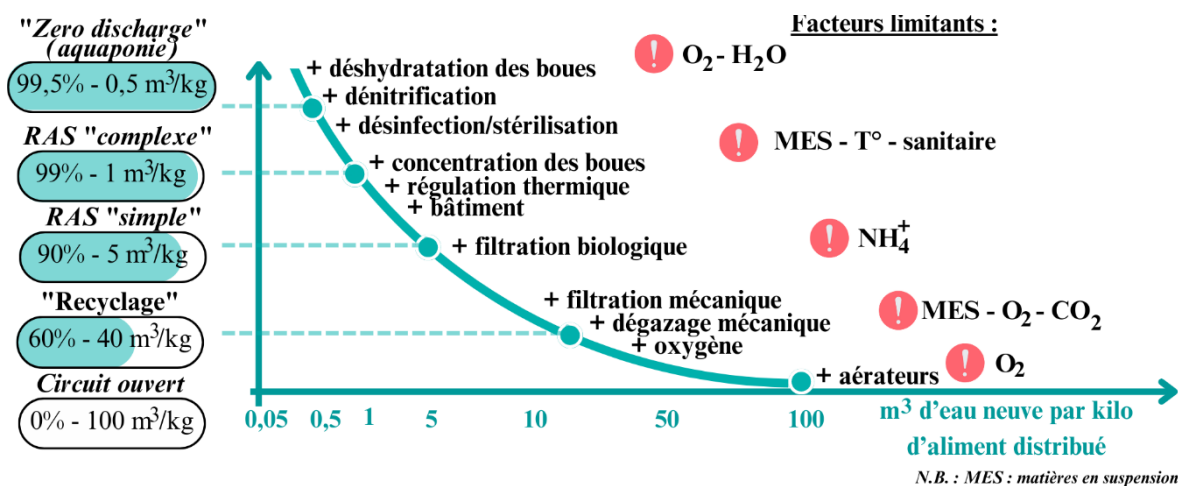


Figure 3. Schéma de l'évolution du ratio m^3 d'eau neuve par kilogramme d'aliment distribué en élevages piscicoles (Tocqueville *et al.*, 2019)

Un des atouts majeurs des RAS est le contrôle, par le pisciculteur, de tous les paramètres d'élevage pouvant affecter la croissance des poissons (Figure 4). Cela permet d'obtenir des conditions stables et optimales, réduisant le stress et améliorant la croissance des poissons.

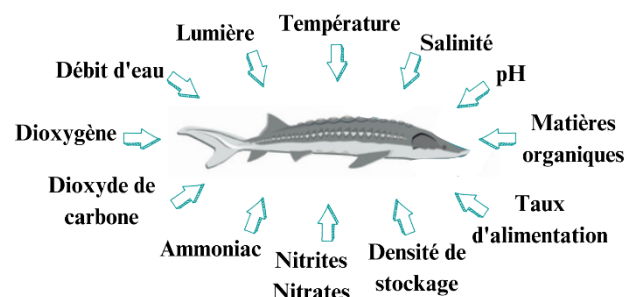


Figure 4. Principaux paramètres affectant la croissance et le bien-être des poissons d'élevage





Ces conditions optimales se traduisent par un modèle de croissance régulier et prévisible qui permet à l'éleveur de prédire quand le poisson aura atteint un certain stade ou une certaine taille. Cela favorise donc la gestion globale de l'exploitation.

I.2 L'environnement du bassin d'élevage

I.2.A Le bassin d'élevage

La sélection appropriée de la conception du bac d'élevage, comprenant la taille, la forme, la profondeur de l'eau et la capacité d'auto-nettoyage, peut entraîner un impact significatif sur les performances de l'espèce élevée. Différents types de bassins avec leurs propriétés sont illustrés par le Tableau 1.

Tableau 1. Propriétés des différents types de bassin d'élevage (Bregnballe, 2022)

Propriétés	Circulaire 	Orthogonal 	Raceway 	Raceway en D 
Capacité d'auto-nettoyage	5	5	3	4
Temps de résidence des particules	5	5	3	4
Homogénéité de l'O ₂	5	5	3	5
Utilisation de l'espace	2	4	5	3
Coûts d'investissement	4	3	5	2
Manipulation des poissons	4	3	5	2

N.B. : Notes de 1 à 5, où 5 est la meilleure note

Les espèces pélagiques, comme les salmonidés, nécessitent des volumes d'eau importants et affichent de meilleures performances dans des conditions de courant soutenu. A l'inverse, lorsque le poisson réside au fond, l'espace en surface au sol du bassin devient primordial permettant une réduction de la profondeur de l'eau et de la vitesse du courant.



L'esturgeon est une espèce nageant sur le fond du bassin, remaniant ainsi continuellement les dépôts de sédiments.

I.2.B Les caractéristiques physiques de l'eau d'élevage

La thermorégulation est essentielle pour maintenir une température stable et appropriée dans un RAS. Les températures optimales varient en fonction des espèces élevées, et un contrôle précis de la température peut favoriser une croissance saine et optimale des poissons. Des systèmes de chauffage ou de refroidissement sont alors utilisés pour maintenir une température constante selon les besoins spécifiques des espèces et des conditions environnementales.



La température optimale pour l'élevage d'esturgeons est comprise entre 19 et 22°C (Chebanov *et al.*, 2011, Kappenman *et al.*, 2009). L'esturgeon sibérien montre cependant une bonne résistance aux températures élevées, atteignant 25-26°C, à condition que deux mesures préventives soient prises simultanément : l'absence d'alimentation et un niveau élevé d'oxygène.

Le contrôle du pH est un aspect important de la gestion d'un RAS. Un pH approprié est nécessaire pour maintenir l'équilibre acido-basique dans l'eau et éviter les fluctuations excessives qui peuvent être stressantes pour les organismes aquatiques. Des dispositifs tels que des régulateurs automatiques de pH ou des systèmes de dosage peuvent être utilisés afin d'ajuster le pH en fonction des besoins du système et des espèces élevées.



Pour l'élevage d'esturgeons, il est recommandé de conserver un pH neutre compris entre 6,5 et 8 (Delage, 2015).

I.3 La filtration mécanique des matières en suspension

La filtration mécanique influe de manière directe sur la qualité générale de l'eau d'élevage et exerce une influence significative sur le fonctionnement de l'organe vital du système, à savoir le filtre biologique, abordé dans la partie I.4. Il est donc impératif de garantir des normes élevées de fiabilité et de performance optimales pour cet élément clé (Chen & Malone, 1991). Les matières en suspension (MES) se composent de matières fécales, de biofloc (incluant des bactéries vivantes et mortes) et d'aliments non consommés. Une concentration excessive de MES peut induire des effets indésirables directs sur la santé des poissons, tels que des irritations branchiales et la création d'un environnement propice à la prolifération d'agents pathogènes (Chapman *et al.*, 1987). Différents équipements de filtration mécanique couramment utilisés en aquaculture sont exposés par le Tableau 2.

Tableau 2. Caractéristiques des principales techniques de filtration des MES (Muir, 1982)

Technique	Taille MES (μm)	Type de fonctionnement	Perte de charge (m)	Débit traité (m^3/h)	MES éliminées (%)
Décanteur	>100	Gravitaire	-	40	40 – 60
Filtre à sable	>20	Pression	2 – 20	2 – 100	60 – 90
Filtre à tambour	>60	Gravitaire	-	15 – 2 500	5 – 50
Filtre à cartouche	>0,1	Pression	0,5 - 3	1 - 10	90



Le dimensionnement d'une unité de filtration mécanique découle du calcul de la charge organique du système, c'est-à-dire la quantité de MES produite par les poissons dans le bassin et du débit de recirculation interne du RAS. La sélection des équipements se fait ensuite grâce aux données constructeurs des différents filtres mécaniques.

I.4 La filtration biologique

I.4.A L'importance de la filtration biologique

L'azote représente un élément nutritif indispensable à la survie de tous les organismes vivants, jouant un rôle crucial dans la composition des protéines, des acides nucléiques, de l'adénosine, des phosphates, des nucléotides pyrimidiques et des pigments. Dans le contexte de l'élevage aquacole, les déchets azotés proviennent principalement de quatre sources majeures : l'ammoniac (issu de l'urée, de l'acide urique et des acides aminés excrétés par les poissons, principalement par diffusion branchiale sous forme non-ionisée NH_3), les débris organiques issus des organismes morts et mourants, les aliments non consommés ainsi que les excréments, et enfin l'azote gazeux provenant de l'atmosphère. La décomposition de ces composés azotés revêt une importance particulière dans les RAS, en raison de la toxicité potentielle de l'ammoniac, des nitrites et des nitrates (Timmons & Vinci, 2022).



Pour ce qui est des nitrites, les conséquences létales de la toxicité de ces derniers chez l'esturgeon sibérien résultent de la perturbation simultanée de multiples fonctions physiologiques, notamment la régulation ionique, respiratoire, cardiovasculaire et excrétoire. Pour cette espèce, la concentration médiane létale (CL50) des nitrites après 72 heures d'exposition s'est révélée être de 130mg/L (Huertas *et al.*, 2002).

Le processus de conversion de l'ammonium (NH_4^+) en nitrite (NO_2^-), suivi par la conversion ultérieure en nitrate (NO_3^-) au sein d'un filtre biologique, est communément appelé nitrification. Ces deux étapes de réaction se déroulent de manière séquentielle, principalement

en raison de la vitesse cinétique plus élevée de la première étape par rapport à la seconde. Cette réaction est réalisée par deux groupes de bactéries distincts sur le plan phylogénétique, qui agissent de manière synergique pour accomplir ce processus (Figure 5). Ces bactéries nitrifiantes se caractérisent principalement par leur nature autotrophe chimiosynthétique obligatoire, utilisant le dioxyde de carbone (CO₂) comme principale source de carbone inorganique, et leur nature d'aérobies obligatoires, nécessitant de l'oxygène pour leur développement (Hagopian & Riley, 1998). Le processus de nitrification produit de l'acide (H⁺) entraînant ainsi une diminution de pH. Afin de le stabiliser, l'ajout d'une base (chaux, hydroxyde de sodium ...) est nécessaire. De même, pour 1g de NH₄⁺ nitrifié, 3,6g d'O₂ est consommé par les bactéries.

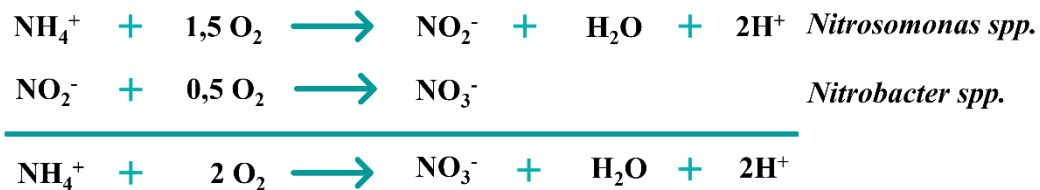


Figure 5. Réactions du processus de nitrification dans un filtre biologique

Etant donné que l'ammoniac et l'ammonium établissent un équilibre acido-basique, la quantité d'ammoniac présente dans l'eau d'élevage est influencée par la température et le pH de celle-ci. À une température de 20°C et un pH de 7, le pourcentage d'ammoniac atteint 0,4% (Antonioni *et al.*, 1990). De même, la température influe sur la croissance bactérienne et ainsi sur le taux de nitrification. L'activité bactérienne a lieu entre 0 et 30°C avec un optimal atteint entre 28 et 30°C. Entre 19 et 22°C, le taux de nitrification est compris entre 0,8 et 1,0gNH₄⁺/m²/j (Timmons & Vinci, 2022).

Enfin, dans les biofiltres, les bactéries nitrifiantes coexistent généralement avec des micro-organismes hétérotrophes comme les bactéries hétérotrophes qui métabolisent les composés organiques dégradables. Cependant, ces dernières se développent beaucoup plus rapidement que les bactéries nitrifiantes et l'emportent ainsi dans la compétition pour l'espace et l'oxygène dans les biofiltres lorsque les concentrations de MES sont élevées. Pour cette raison, il est impératif que l'eau de source des biofiltres soit aussi propre que possible, avec une concentration minimale de matières organiques totales (Ebeling *et al.*, 2006).

1.4.B Les différents équipements de filtration biologique

En aquaculture, la construction de biofiltres vise à favoriser une croissance optimale du biofilm. L'utilisation de différents équipements dépend de l'approvisionnement en oxygène et de la gestion du biofilm. En Europe, les principaux biofiltres utilisés dans les RAS sont les lits fixes et les lits fluidisés, chacun offrant des environnements de croissance différents pour les bactéries nitrifiantes (EUMOFA, 2020). Dans un lit fixe (Figure 6.1), les bactéries se développent sur un substrat stationnaire, nécessitant un nettoyage régulier pour éviter l'accumulation de déchets. En revanche, dans un lit fluidisé (Figure 6.2), un courant constant d'eau traverse le substrat, empêchant l'accumulation de déchets et favorisant une oxygénation efficace, l'élimination des déchets et une distribution uniforme des nutriments, bénéfique pour la croissance des bactéries nitrifiantes (Emparanza, 2009 ; Timmons, 2000). Les deux types de biofiltres utilisent des média filtrants (curler, bioball ou biochips) pour offrir une surface propice à la croissance des bactéries nitrifiantes. Une plus grande surface spécifique de ces média (surface totale développée en m² par unité de volume en m³) permet de réduire la nécessité d'augmenter le volume du biofiltre (Timmons & Vinci, 2022).

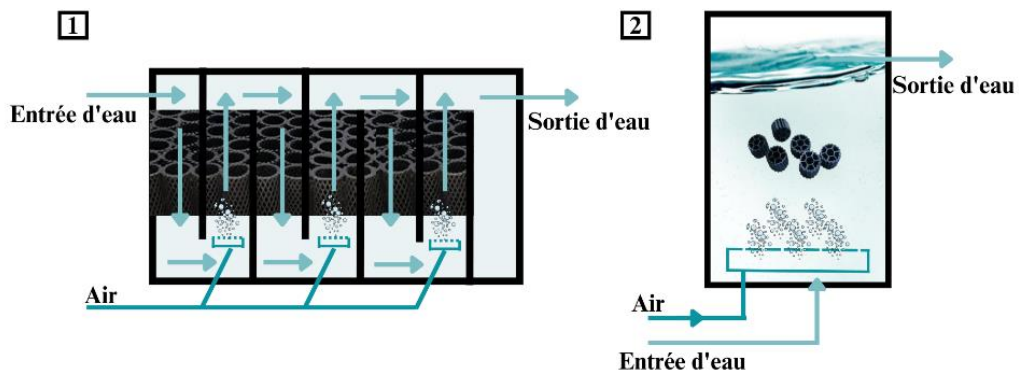


Figure 6. Fonctionnement d'un lit fixe (1) et d'un lit fluidisé (2) (Bregnballe, 2022)



Le dimensionnement d'un lit fixe ou fluidisé s'effectue en 5 étapes (Lekang, 2013) :

1. Calcul de la quantité d'azote ammoniacal total dissous dans l'eau.
2. Calcul de la quantité d'ammonium dans l'eau à température et pH donnés (Antoniou *et al.*, 1990)
3. Calcul de la surface de média nécessaire, c'est-à-dire le rapport entre la quantité d'ammonium et le taux de nitrification à température donnée. Il est communément admis d'utiliser un facteur de sécurité de 2 à 3 fois la surface de média nécessaire lors d'un dimensionnement d'un biofiltre (Lekang, 2013).
4. Calcul du volume de média nécessaire, correspondant au rapport entre la surface de média et la surface spécifique de ce dernier.
5. Calcul du volume final du biofiltre, en prenant en compte le taux de remplissage en média, correspondant généralement entre 30 et 60% du volume total du biofiltre.

Selon Timmons & Vinci (2022), pour une efficacité optimale, il est recommandé d'installer deux filtres de nitrification. Une approche judicieuse consiste à soumettre une partie du volume d'un des biofiltres à deux cycles de filtration mécanique et biologique, augmentant ainsi le temps de rétention de l'eau et améliorant l'interaction entre les bactéries nitrifiantes et les rejets azotés. Cette stratégie favorise une meilleure filtration biologique et une rétention accrue de particules solides et de débris, maintenant la qualité de l'eau au niveau optimal. En équilibrant la charge de filtration, cette méthode réduit également la dépendance à un seul biofiltre et assure un fonctionnement sécurisé en cas de panne. Pour maintenir la stabilité et l'efficacité du biofilm, les deux filtres doivent être alimentés en permanence.

1.4.C La dénitrification

Historiquement, le nitrate, produit final de la nitrification, n'a pas suscité de préoccupations majeures dans les systèmes de recirculation aquacole en raison de sa faible toxicité pour les organismes d'eau douce (Lee *et al.*, 2000). Cependant, avec le degré élevé de réutilisation de l'eau, la réduction des nitrates devient de plus en plus importante, car des accumulations de 300 à 1 000 mg/L de nitrates ne sont pas rares. La dénitrification biologique est un processus microbien anaérobie en deux étapes qui convertit les nitrates en azote gazeux, réalisé par des bactéries anaérobies facultatives hétérotrophes et autotrophes, telles que *Pseudomonas spp.* ou *Alcaligenes spp.* De nombreux procédés de traitement utilisés en aquaculture sont des adaptations de procédés utilisés dans l'industrie du traitement des eaux usées (Lee *et al.*, 2000).



Selon Hamlin (2006), la CL50 des nitrates à 96 heures pour des esturgeons sibériens pesant entre 7 et 700 grammes se situe entre 397 et 1 028 mg/L.



Le dimensionnement d'une unité de dénitrification se déroule de manière presque similaire aux lits fixes et fluidisés (Ersever *et al.*, 2014 ; Lee *et al.*, 2000) :

1. Calcul de la quantité de nitrates, sachant que pour 1g de NH_4^+ consommé, 3,4g de NO_3^- est produit. On suppose une conversion complète de l'ammoniac en nitrate, ce qui peut ne pas être réaliste dans les conditions réelles de l'élevage car d'autres processus biologiques et physico-chimiques peuvent influencer les concentrations de nitrates dans le système.
2. Calcul de la surface de média nécessaire, correspondant au rapport entre la quantité de nitrates à dénitrifier et le taux de dénitrification (généralement $2\text{gNO}_3^-/\text{m}^2/\text{j}$).
3. Calcul du volume de média nécessaire, correspondant au rapport entre la surface de média et la surface spécifique de ce dernier.
4. Calcul du volume final de l'unité, en prenant en compte le taux de remplissage en média, compris généralement entre 25 et 40% du volume total du biofiltre.
5. Choix de la source de carbone organique pour les bactéries hétérotrophes, généralement du méthanol, de l'acétate ou de l'éthanol.

1.5 L'ozonation et la désinfection UV

L'ozonation ou la désinfection par UV sont deux pratiques courantes dans les RAS pour contrôler la croissance des microorganismes pathogènes et réduire les risques de maladies. L'ozone est souvent utilisé comme agent désinfectant car il est efficace contre un large éventail de micro-organismes, y compris les bactéries, les virus et les protozoaires. L'ozone est produit par des générateurs d'ozone qui transforment le dioxygène de l'air (O_2) en ozone (O_3). Il est ensuite diffusé dans l'eau pour détruire les agents pathogènes présents. Néanmoins, de par sa potentielle toxicité et ses coûts d'investissement et de fonctionnement élevés, l'utilisation de l'ozone est moins répandue que celle de stérilisateur à lampes UV permettant de détruire une partie des ADN et ARN bactériens et viraux (Bablon *et al.*, 1991 ; Miller *et al.*, 1999).



Pour les esturgeons, la dose UV minimale pour réduire la prolifération de *Aeromonas*, *Flexibacter* et *Flavobacteria* est fixée à 25 mWs/cm^2 (Semenov & Semenova, 2022).

1.6 La circulation de l'eau entre les compartiments

1.6.A La mise en mouvement de l'eau

La mise en mouvement de l'eau dans les systèmes recirculés en aquaculture est d'une importance capitale pour assurer une circulation adéquate de l'eau, maintenir une oxygénation suffisante et favoriser une bonne distribution des nutriments. En effet, en cas de rupture de l'alimentation en eau, le décès des animaux peut survenir de manière extrêmement rapide (moins de 15 minutes à une densité de 80 kg/m^3). Deux méthodes couramment utilisées pour la mise en mouvement de l'eau dans un RAS sont le pompage et l'airlift, chacune offrant des avantages spécifiques (Barrut *et al.*, 2012).

Le pompage est une méthode traditionnelle et largement utilisée pour la circulation de l'eau dans les systèmes RAS. Il utilise des pompes pour aspirer l'eau d'un réservoir et la faire circuler à travers les différents compartiments du système. Les pompes permettent de déplacer l'eau sur de longues distances et de surmonter les différences de niveau entre les différents compartiments du système. De plus, elles offrent une grande flexibilité dans la conception du

système en permettant la mise en place de plusieurs circuits d'eau indépendants pour répondre aux besoins spécifiques des différentes phases de production (Lawson, 2012).



Pour dimensionner un système de pompage, il faut se référer aux courbes caractéristiques des pompes fournies par les fournisseurs. Ces courbes représentent la capacité d'une pompe à générer un débit en fonction de la hauteur de charge.

L'airlift, en revanche, est une méthode alternative qui utilise l'air comprimé pour mettre en mouvement l'eau dans un RAS. Il fonctionne en injectant de l'air sous pression dans un conduit immergé, créant ainsi une différence de densité entre l'eau et l'air. Cette différence de densité entraîne l'ascension de l'eau à travers le conduit, créant un mouvement de circulation. L'avantage principal de l'airlift réside dans son efficacité énergétique. En comparaison avec le pompage, l'airlift nécessite moins d'énergie pour mettre en mouvement l'eau dans un RAS. Néanmoins, il a une capacité de circulation plus limitée que le pompage, ce qui le rend plus adapté aux systèmes de petite à moyenne taille (Barrut *et al.*, 2012).



La puissance d'air nécessaire pour l'airlift peut être calculé grâce à la relation suivante (Barrut *et al.*, 2012) : $P_{Air} = D_{Air} \times \Delta charge$
 Où P_{Air} : Puissance d'air (W), D_{Air} : débit d'air nécessaire pour fournir le débit d'eau souhaité dans l'airlift (m^3/s) et $\Delta charge$: la perte de charge (Pa).

1.6.B Les connexions hydrauliques

Enfin, les connexions hydrauliques jouent un rôle fondamental dans les RAS, permettant de faire circuler l'eau d'élevage dans tous les composants de ce dernier, de l'apport d'eau neuve aux rejets du système. Le diamètre d'une canalisation en PolyChlorure de Vinyle (PVC) dépend du débit à assurer ainsi que de la vitesse de circulation de l'eau dans la canalisation. Il est essentiel que celle-ci soit suffisante pour garantir un confort d'utilisation de l'eau à tous les endroits de prélèvement. Par ailleurs, une vitesse trop élevée risque d'entraîner une détérioration des parois internes du conduit.



La relation entre débit, vitesse et diamètre interne de la canalisation est la suivante (Butet, 2015) :

$$D_{Eau} = v \times \frac{\pi d^2}{4000} \Rightarrow d = \sqrt{\frac{4000 D_{Eau}}{\pi v}}$$

Où D_{Eau} : débit de l'eau (L/s), v : vitesse moyenne de l'eau (m/s), comprise entre 1 m/s et 4,5 m/s et d : diamètre intérieur de la canalisation (mm).

1.7 Les transferts de gaz

1.7.A L'aération et l'oxygénation

La disponibilité de l'oxygène dissous est généralement le premier facteur qui limite l'augmentation de la capacité de charge et de production dans les systèmes de recirculation intensifs. En utilisant uniquement l'aération comme moyen de fournir de l'oxygène dissous, un système ne peut supporter qu'environ 40 kg de poissons par m^3 d'eau. Cependant, en utilisant de l'oxygène pur à l'aide de générateurs ou de systèmes d'injection d'oxygène gazeux pour

augmenter la quantité de ce dernier dans la colonne d'eau, les densités de peuplement peuvent facilement être triplées à plus de 120 kg de poissons par m³ d'eau (Timmons & Vinci, 2022). Cette méthode permet d'ajuster précisément les niveaux d'oxygène dans l'eau en fonction des besoins spécifiques des poissons. La quantité d'oxygène nécessaire est donc tributaire de trois facteurs : la biomasse de poissons, l'espèce élevée et la taille du biofiltre (Colt *et al.*, 1991). Enfin, une oxygénation supplémentaire peut être utilisée pour augmenter les niveaux d'oxygène dans les systèmes RAS lorsqu'il y a une demande accrue, par exemple pendant les périodes de haute densité de stockage, de températures élevées ou lorsque les taux de renouvellement d'eau sont limités.



Chez l'esturgeon, lorsque l'apport d'O₂ aux cellules musculaires n'est pas adéquat, par exemple en cas d'hypoxie environnementale, les poissons utilisent des mécanismes pour maintenir leur activité énergétique intensive. Dans de telles situations, la seule source d'ATP (adénosine triphosphate) disponible est la glycolyse. Toutefois, en l'absence d'O₂ suffisant, une partie de l'acide pyruvique produit lors de la glycolyse est convertie en acide lactique, entraînant une baisse du pH sanguin. Lorsque l'activité musculaire diminue, un apport supplémentaire en O₂ est nécessaire pour convertir l'acide lactique en acide pyruvique par le biais du cycle de Krebs. Cet apport d'O₂ est appelé « dette en O₂ ». En l'absence d'une réoxydation de l'acide lactique, ce dernier peut être converti en alcool et excrété, entraînant ainsi une perte d'O₂. De ce fait, la croissance des poissons peut être sévèrement affectée, compromettant ainsi leur bien-être et leur croissance. Il est recommandé de conserver une concentration d'O₂ dissous supérieure à 6 mg/L (Nonnotte *et al.*, 1993).



Le dimensionnement d'une unité d'aération ou d'oxygénation passe obligatoirement par le calcul des besoins en O₂ de l'espèce élevée. Le choix de se limiter, ou non, à une unité d'aération dépendra alors de ces besoins.

1.7.B Le dégazage

Le dégazage est une opération cruciale dans un RAS pour éliminer les gaz indésirables en particulier le dioxyde de carbone. Le CO₂ peut s'accumuler dans l'eau en raison de la respiration des poissons et des bactéries du filtre biologique et peut entraîner une diminution du pH ainsi qu'un stress pour les organismes aquatiques. Différentes techniques de dégazage peuvent être utilisées telles que l'aération, l'utilisation de dégazeurs à vide ou l'utilisation de colonnes de dégazage (Colt & Bouck, 1984).



Des niveaux constants de CO₂ dépassant 20 à 25 mg/L nuisent à l'alimentation du poisson et limitent l'apport d'oxygène dans son sang. Il est recommandé de maintenir une concentration de CO₂ inférieure à 20mg/L (PIAAM, 2012).



Les règles pour la construction d'une colonne de dégazage sont (Ifremer, 2010) :

1. une hauteur fonctionnelle d'au moins 1 mètre
2. un dimensionnement des anneaux d'environ 1/8 ° à 1/10 ° du diamètre intérieur de la colonne
3. un diamètre de colonne limitant la vitesse d'écoulement de l'eau à 700 m/h

I.8 La gestion des effluents

Enfin, un aspect important à prendre en compte est la gestion des boues et le traitement des déchets solides afin de minimiser les impacts environnementaux. Les boues et les déchets solides produits par les poissons peuvent entraîner une accumulation de matières organiques, de nutriments et de substances potentiellement nocives (Pagand, 1999). La gestion des boues et le traitement des déchets solides doivent être adaptés aux spécificités de chaque RAS et à sa réglementation (Roque d'Orbcastel, 2008). L'acceptabilité sociétale et environnementale d'une unité de production en RAS devra inévitablement prendre en compte la gestion des rejets issus du système de production.

D'après l'Arrêté du 01/04/2008 fixant les règles techniques auxquelles doivent satisfaire les piscicultures d'eau douce, l'augmentation de la concentration en moyenne sur 24 heures des MES, de l'ammonium, des nitrites et des phosphates ne doit pas dépasser les valeurs respectives de 15 mg/L, 0,5 mg/L, 0,3 mg/L et 0,5 mg/L (Housset & Dauphin, 2022).

La Figure 7 a pour dessein de synthétiser le fonctionnement technique général d'un RAS et de décrire l'intégralité de la boucle de l'eau, de son introduction (apport d'eau neuve) dans le système jusqu'à sa réutilisation grâce à la mise en œuvre d'une technologie de filtration.

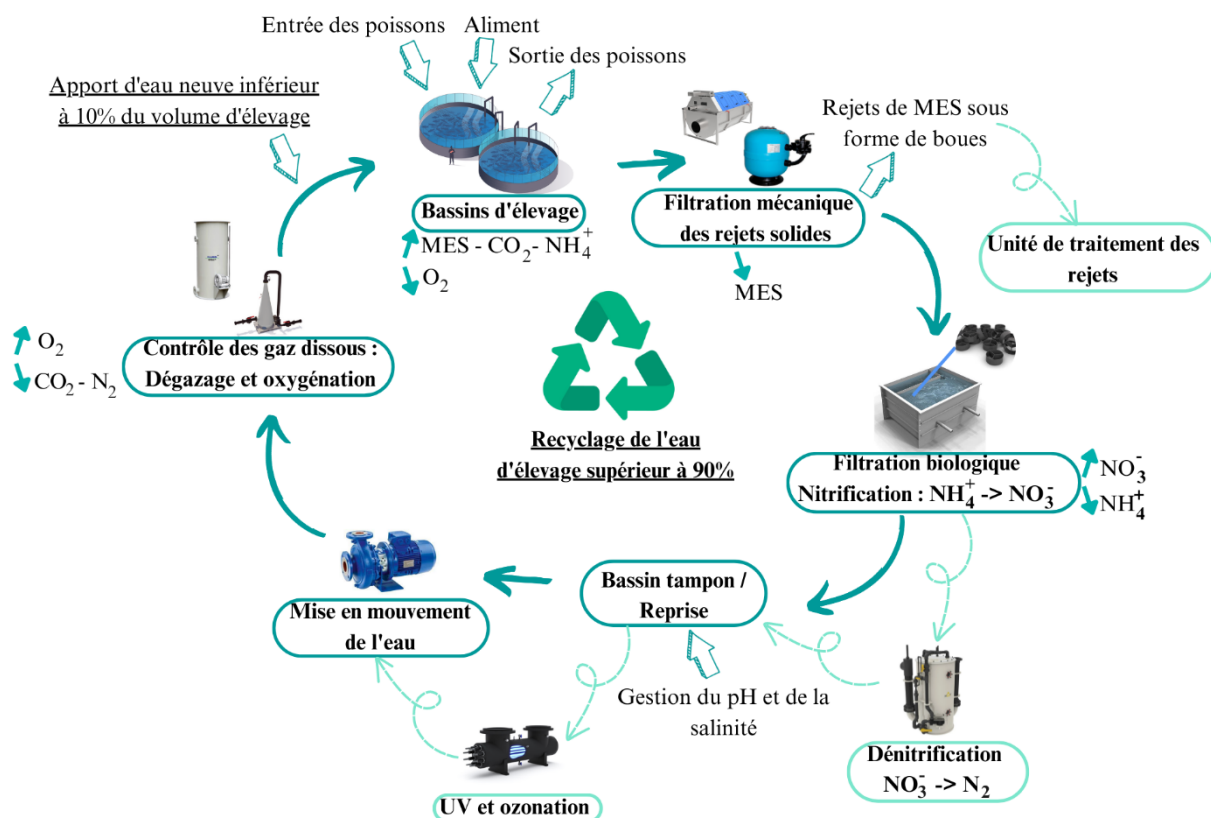


Figure 7. Schéma de fonctionnement technique général d'un système RAS (Tocqueville *et al.*, 2019)

La conception d'un RAS doit tenir compte du fait que les poissons ont des besoins différents en fonction de leur stade de vie et de leur taille. Il est important que l'unité de production réponde aux besoins spécifiques des différents stades de croissance.



Partie II – Démarche de travail

II.1 Les données d'élevage

II.1.A Ouverture et débit de recirculation de l'unité de production

Avant de débiter la conception de l'unité de production, quatre paramètres primordiaux ont été calculés : le volume d'élevage total nécessaire, l'ouverture du système, le degré de recirculation de l'eau neuve ainsi que le débit de recirculation interne au circuit. Pour ce qui est de l'ouverture du système, la quantité maximale d'aliment distribué quotidiennement a été estimée et fixée à 1% de la biomasse finale par jour. Quant au débit de recirculation interne, il a été fixé à 1 renouvellement d'eau d'élevage par heure.

II.1.B Les besoins et les rejets des esturgeons

Les besoins et rejets des esturgeons de l'unité de production ont été calculés pour une biomasse maximale, atteinte en fin de cycle. Un facteur de risque de 20% a été pris en compte.

- ❖ Rejets de matières en suspension (Jatteau *et al.*, 1993) :

$$Qte_{MES} = [1 - Kd] \times [33 IC - 20] \times \frac{Qte_{aliment}}{100}$$

Où Qte_{MES} est la quantité de MES par jour (kg/j), Kd le coefficient de décantation du bassin ($Kd=0$ s'il n'y a pas de décantation), IC l'indice de conversion (compris entre 1,5 et 3 pour un esturgeon sibérien à 20°C, ici $IC = 2$) et $Qte_{aliment}$ la quantité d'aliment distribué par jour (kg/j).

- ❖ Rejets de l'azote ammoniacal total (Jatteau, 1997) :

$$Qte_{TAN} = TAN_{out} \times BW_{finale}$$

Où Qte_{TAN} est la quantité d'azote ammoniacal produite par jour (mg/j), TAN_{out} l'azote ammoniacal excrété (pour un aliment contenant 45% de protéines et pour un esturgeon de 3kg, $TAN_{out} = 252$ mg/kg/j) et BW_{finale} la biomasse en fin de cycle (kg). Cependant, comme le STURGEON GROWER® contient 47% de protéines, nous avons décidé de prendre un facteur de risque de 50% sur la valeur de l'azote ammoniacal excrété, soit $TAN_{out} = 378$ mg/kg/j.

- ❖ Rejets de composés phosphatés (Xue *et al.*, 2012) :

$$Qte_P = [-0,189 + 0,866 \times Q_{P\text{ aliment}}] \times N_{esturg}$$

Où Qte_P est la quantité produite de composés phosphatés (g), $Q_{P\text{ aliment}}$ la quantité de phosphore contenue dans l'aliment ingéré par un poisson (g) et N_{esturg} le nombre d'esturgeon.

- ❖ Consommation de dioxygène (Nonnotte *et al.*, 2018) :

$$Qte_{O_2} = Qte_{M\acute{e}tabo\ O_2} \times BW_{finale}$$

Où Qte_{O_2} est la quantité consommée d' O_2 par heure (kg/h), $Qte_{M\acute{e}tabo\ O_2}$ la quantité consommée d' O_2 par le métabolisme d'un esturgeon (à 20°C, $Qte_{M\acute{e}tabo\ O_2} = 100$ mg/h/kg) et BW_{finale} la biomasse finale (kg).

- ❖ Production de dioxyde de carbone (Hughes, 1964) :

$$Qte_{CO_2} = Qte_{O_2} \times 1,375$$

Où Qte_{CO_2} est la quantité produite de CO_2 par heure (kg/h) et Qte_{O_2} la quantité produite d' O_2 par heure (kg/h).

II.2 Choix et dimensionnement de la nouvelle unité de production

II.2.A Entretien et visite de terrain avec des professionnels de la filière

Pour choisir les différents équipements de la nouvelle unité de production, des entretiens semi-directifs sur le terrain avec des professionnels ont été menés afin de prendre en considération toutes leurs recommandations sur les différents aspects d'un RAS (aspect technique, économique, sanitaire et sociétal).

L'entretien semi-directif est une technique qualitative de recueil d'informations permettant de centrer le discours des personnes interrogées autour de thèmes définis et consignés dans un guide d'entretien. Il offre la possibilité de recueillir des informations diverses : des faits et leurs vérifications, des jugements ou des points de vue, des suggestions, des retours sur les premières hypothèses et des déductions... Il se déroule en 4 étapes :

1. Sélection des professionnels à interviewer : Dans le cadre de ce projet, 10 professionnels et/ou entreprises ont accepté un entretien et/ou une visite de terrain :
 1. Fodina Fish (Almasfuzito, Hongrie)
 2. Tapolcai Pisztrang (Tapolca, Hongrie)
 3. Forus (Komadi, Hongrie)
 4. M. RIDEG, Rideg & Rideg Fish Farm (Homokmegy, Hongrie)
 5. M. MAUDUIT, Esturgeonnière – Caviar Perlita (Le Teich, France)
 6. M. CHEVRE, INRAE Saint-Seurin (Saint-Seurin-sur-L'Isle, France)
 7. M. GARSI, Le lycée Olivier Guichard (Guérande, France)
 8. Dr. LE BRETON, Vet'eau (Grenade sur Garonne, France)
 9. M. TOCQUEVILLE, ITAVI (Paris, France)
 10. M. BOUSSAC, OFB (Orléans, France)
2. Réalisation d'un guide d'entretien : Tous les entretiens semi-directifs ont été conduits de manière semblable en suivant un guide d'entretien préalablement élaboré dont un extrait est indiqué par la Figure 8. Les entretiens ont duré entre 45min et 2h selon les personnes interviewées.
3. Déroulement de l'entretien
4. Analyse des résultats : Elle se fait de manière qualitative grâce à une analyse transversale par thématique. Elle sera explicitée dans la partie III.2.A.

	Thématiques abordées	Exemple de questions principales	Exemple de questions complémentaires
Phase introductive	Votre parcours personnel L'entreprise piscicole	➔ <i>Quel a été votre formation et votre parcours professionnel ?</i> ➔ <i>Quel est votre postelrôle dans l'entreprise piscicole ?</i> ➔ <i>Quelles sont les espèces élevées ? Quel est globalement leur itinéraire technique ?</i>	<i>Depuis combien de temps occupez-vous ce poste au sein de l'entreprise ?</i>
Phase de centrage sur le sujet	Les systèmes recirculés aquacoles	➔ <i>Quelles sont les espèces élevées en RAS et à quel stade ?</i> ➔ <i>Quels sont les équipements de filtration présents dans votre/vos RAS ? Comment sont-ils agencés ?</i> ➔ <i>Comment avez-vous sélectionné les différents éléments de filtration ?</i>	<i>Quelles sont les densités dans les bassins ? Pourquoi avoir choisi d'élever ce stade en RAS ?</i> <i>Quel est l'ouverture du système ? D'où provient l'eau d'élevage ?</i> <i>Avez-vous fait appel à un bureau d'étude ? Si non, pourquoi ?</i>
Phase d'approfondissement	Les avantages et inconvénients des RAS	➔ <i>D'après votre expérience, quels sont les atouts majeurs de votre/vos RAS ?</i> ➔ <i>Comment serait-il possible d'améliorer votre/vos RAS ?</i>	<i>A quels points de blocage vous êtes-vous confrontés lors de la conception ou de la mise en fonctionnement de votre/vos RAS ?</i>
Phase conclusive	Prise de recul sur l'efficacité des RAS	➔ <i>Selon vous, quels sont les principaux points d'attention pour la conception d'un RAS ?</i>	

Figure 8. Extrait du guide d'entretien pour les entretiens semi-directifs

II.2.B Conception et dimensionnement du RAS

Suite aux entretiens, appuyés par des recherches bibliographiques, les différents équipements pertinents nécessaires au fonctionnement d'un RAS avec les caractéristiques répondant aux données d'élevage, tels que les bassins d'élevage, les systèmes de filtration, les pompes et les échangeurs de chaleur ont été identifiés puis dimensionnés, selon les bases de dimensionnement indiquées dans la partie I. La sélection des équipements les plus appropriés a pris en compte différents critères tels que l'efficacité énergétique, la qualité de l'eau, la facilité d'entretien, la durabilité et les coûts associés, calculés à l'aide des données constructeurs.

Seule l'étude de faisabilité technico-économique d'un projet de panneaux photovoltaïques a été menée exclusivement par EDF ENR, une filiale du groupe EDF.

A la suite de la conception technique de la nouvelle unité de production, une étude prévisionnelle financière a été menée afin de conclure sur la faisabilité du projet.

II.3 Etude financière de la nouvelle unité de production

L'étude financière d'un projet vise à évaluer sa viabilité économique en analysant en détail les aspects financiers. Pour cette étude de faisabilité, nous avons suivi une approche itérative, en identifiant progressivement les besoins financiers de l'entreprise tout au long de son activité et en cherchant des ressources correspondantes. Cette évaluation logique nous permettra de prévoir les coûts d'investissement, le chiffre d'affaires attendu et les dépenses courantes de l'unité de production d'esturgeons en système recirculé. Elle évalue également les capitaux nécessaires pour le lancement, la viabilité financière et la capacité à générer des profits.

II.3.A Les investissements et le plan de financement

i. Les coûts d'investissement et l'amortissement des immobilisations

Pour estimer les coûts d'investissement, nous avons sollicité des devis auprès des fournisseurs, ce qui nous permet de disposer d'une estimation précise des dépenses requises pour acquérir le matériel nécessaire à la pisciculture. Certains travaux ont été estimés car effectués directement par le personnel de la pisciculture.

Pour refléter la dépréciation des actifs au fil du temps, nous appliquerons une méthode d'amortissement linéaire, consistant à répartir de manière égale la perte de valeur des immobilisations de manière constante sur sa durée de vie. Cela se justifie notamment par des retours sur investissements ayant lieu environ 8 ans après l'investissement initial, durée à partir de laquelle un esturgeon sibérien femelle est apte à produire du caviar.

ii. Le plan de financement

En considérant que le projet entre dans le cadre de l'action TA 1 "Modernisation, développement et adaptation des activités aquacoles" (objectif 2.1) du Fonds européen pour les affaires maritimes, la pêche et l'aquaculture (FEAMPA), nous bénéficions d'un financement à hauteur de 50% pour les dépenses d'investissement initiales. Cela réduit significativement le besoin de financement en capital, contribuant ainsi à améliorer la viabilité financière du projet.

Pour les dépenses d'investissement restantes, nous pouvons envisager deux types de financement :

- tous les coûts d'investissement sont pris en charge par les fonds propres de l'exploitation
- 30% des dépenses restantes proviennent des fonds propres de l'entreprise, tandis que 70% est financé par un emprunt au taux d'intérêt annuel de 4% remboursable en 10 ans

La capacité d'auto-financement de la Pisciculture Hennequart en 2022, qui s'élevait à 470 371€, a également été prise en compte pour évaluer le besoin de financement complémentaire. Si les coûts d'investissement dépassent cette somme, la deuxième option de financement sera préférée pour assurer la mise en œuvre réussie du projet.

II.3.B Le compte de résultat prévisionnel

Le compte de résultat est un tableau financier qui synthétise l'activité économique de l'entreprise sur un exercice comptable. Il regroupe l'ensemble des produits et des charges, aboutissant à un résultat positif (bénéfice) ou négatif (perte).

Dans cette partie, les données chiffrées ont été calculées à l'aide d'un classeur Excel, en utilisant l'année comptable de la pisciculture du 01/10/2021 au 30/09/2022 comme référence. Cette période a été choisie pour exclure l'impact de la crise sanitaire de la Covid-19, et l'exercice comptable en cours (01/10/2022 au 30/09/2023) non-clôturé. Généralement, les prévisionnels financiers sont réalisés sur 3 exercices comptables. Or, dans le cas d'une exploitation acipenséricole, les retours sur investissements ont lieu environ 8 ans après l'investissement initial, durée à partir de laquelle un esturgeon sibérien femelle est apte à produire du caviar. Nous allons donc réaliser un prévisionnel financier sur 10 ans.

i. Les produits d'exploitation

Les produits d'exploitation ont été calculés en se basant sur les hypothèses ci-dessous :

- Les ventes de marchandises et de poissons d'étang, ainsi que les activités de visites sont indépendantes du projet et identiques à l'année de référence.
- La production de caviar est constante au cours des années (objectif du projet) et est égale à 3 tonnes par an, représentant 3 000 esturgeons femelles.
- 30% des esturgeons sexés sont des femelles pouvant produire à partir de 8 ans.
- Prix du caviar vendu au grossiste : 425€/kg
- Prix du caviar vendu en vente directe : 900€/kg (moyenne pondérée entre le prix pour les particuliers et le tarif pour les restaurateurs)
- La part du caviar vendu au grossiste et en vente directe varie de 1% par an au profit de cette dernière. Elle est actuellement de 55% en faveur du grossiste.
- La production de caviar stockée est constante au cours des années car le caviar est produit lorsque le stock est quasiment terminé.
- La vente de surplus d'électricité produit par les panneaux photovoltaïques est estimée à 4 000€/an par EDF ENR.

ii. Les charges d'exploitation

Pour garantir une analyse précise des charges d'exploitation, nous avons calculé les coûts de fonctionnement en nous basant sur les spécifications des fabricants (puissance utile) et en prenant en compte un facteur de 20%, pour couvrir la consommation électrique des appareils (puissance absorbée). Dans un second temps, les coûts de maintenance ont été évalués en fonction des durées de vie et des besoins de maintenance, en utilisant des données issues de l'expérience de la pisciculture ou fournies par les fabricants d'équipements.

En ce qui concerne l'alimentation des esturgeons, nous avons estimé que les quantités d'aliment distribué correspondaient à 1,5% de la biomasse. Une table de croissance théorique a donc été calculée en définissant le taux de croissance spécifique (SGR), c'est-à-dire le pourcentage d'augmentation du poids du poisson par jour, à 0,2%/j (Tshering et al., 2022).

- Par la suite, les charges d'exploitation ont été calculées selon les hypothèses ci-dessous :
- Seules les charges d'achat d'aliment, d'électricité, de maintenance et les dotations aux amortissements sont dépendantes du projet. Les autres charges sont supposées identiques à l'année de référence.
 - Le prix de l'électricité, de l'aliment et de l'oxygène augmente de 5% par an.
 - Les charges salariales (salaires et cotisations sociales) augmentent de 1% par an.
 - Prix MW d'électricité à l'année N : 190€/MWh
 - Prix de l'aliment à l'année N : 2€/kg

iii. Autres produits et charges

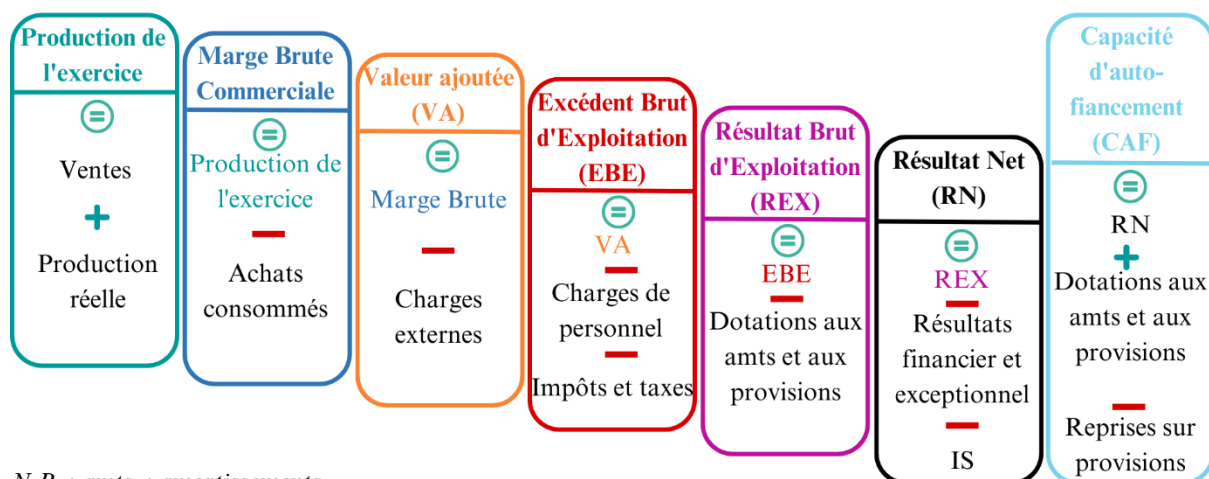
Les charges financières correspondront aux intérêts d'emprunt. Pour calculer l'amortissement de l'emprunt, nous utiliserons un amortissement constant, autrement dit la part d'emprunt remboursée est identique à chaque versement. Les intérêts se calculent sur la base du capital encore à rembourser. Les annuités sont égales à la somme de l'amortissement et des intérêts.

Quant aux produits exceptionnels, ils correspondent aux quote-parts de subvention calculées en fonction de l'amortissement de chaque immobilisation. Enfin, en ce qui concerne l'impôt sur les sociétés (IS), d'après la loi des finances 2023, il s'élève à 25% sur la totalité du résultat fiscal, pour les exercices ouverts à compter du 1^{er} janvier 2023 (Bercy Infos, 2023).

II.3.C Les indicateurs économiques de la viabilité du projet

i. Les soldes intermédiaires de gestion (SIG) et le seuil de rentabilité

Donnée essentielle pour la gestion de sa société, la rentabilité de cette dernière se doit d'être analysée dans le but de s'assurer de sa viabilité et de sa pérennité. L'étude de la rentabilité nécessite alors de repérer puis de comparer des indicateurs clefs : les SIG. Ces derniers permettent de mener une analyse plus poussée et précise qu'une simple analyse du compte de résultat. Les SIG se calculent en plusieurs étapes (Figure 9).



N.B. : amts : amortissements

Figure 9. Les soldes intermédiaires de gestion (SIG)

Dans un deuxième temps, nous calculerons le seuil de rentabilité, représentant le chiffre d'affaires (CA) nécessaire pour atteindre un point d'équilibre financier, c'est-à-dire le niveau minimal de CA requis pour éviter un déficit. Plus le rapport entre le seuil de rentabilité et le CA est faible, plus le projet est viable. Le seuil de rentabilité se calcule de la façon suivante :

$$\text{Seuil}_{\text{rentabilité}} = \frac{\text{Charges fixes}}{\text{Taux de marge variable}} = \frac{\text{Charges fixes} \times \text{CA}}{\text{CA} - \text{Charges variables}}$$

ii. Le budget de trésorerie

Le budget de trésorerie est un outil prévisionnel financier visant à représenter les dépenses et les recettes attendus sous forme de flux monétaires prévisionnels sur l'horizon de la prévision financière. La variation de trésorerie correspond à la différence entre ces encaissements et ces décaissements (Figure 10).



Figure 10. Le budget de trésorerie

II.3.D L'analyse comparative et l'analyse de risque

i. Comparaison des systèmes de production en étang et en système recirculé : évaluation du prix de l'esturgeon au kilogramme

Pour atteindre une analyse exhaustive, nous procéderons au calcul minutieux du prix de l'esturgeon par kilogramme pour chacun des systèmes de production étudiés, à savoir l'élevage en étang traditionnel et le système recirculé (RAS). Cette évaluation rigoureuse permettra ainsi de déterminer avec précision l'impact économique et de mesurer la rentabilité et la viabilité financière inhérente à chacun des systèmes envisagés pour un stade de développement similaire.

Dans un premier temps, les charges opérationnelles seront prises en compte, celles-ci étant directement liées au volume d'activité de chaque système. Par la suite, les moyennes des annuités d'emprunt et d'amortissement annuel seront intégrées au calcul afin d'obtenir un coût de rentabilité moyen pendant la durée de l'emprunt. En ce qui concerne les étangs, les données utilisées seront basées sur une estimation des pratiques de production actuellement en vigueur.

ii. Analyse de différents scénarii prospectifs

Dans le but d'évaluer la viabilité du projet, une analyse de plusieurs scénarii potentiels sera effectuée. Pour ce faire, nous procéderons à une comparaison entre notre analyse financière et un scénario prospectif sans l'installation d'une nouvelle unité de production. Dans ce contexte, deux hypothèses liées à la gestion des étangs seront considérées :

1. Une diminution progressive de la densité d'esturgeons par étang à partir de l'année N+1, entraînant une baisse annuelle de 2 % de la production de caviar. Les charges d'exploitation resteront identiques, à l'exception des coûts d'achat d'aliments.
2. L'abandon progressif des étangs actuellement fragiles, à raison d'un étang par an, entraînant une baisse de 2% de la production de caviar. Les charges d'exploitation liées à ces étangs, telles que les coûts d'achat d'aliments et d'aération, diminueront, tandis que les autres charges demeureront inchangées.



Partie III – Résultats

III.1 Les données d'élevage

III.1.A Ouverture et débit de recirculation du RAS

Les quatre paramètres essentiels (volume total d'élevage, ouverture du système, débit de recirculation interne et d'eau neuve) calculés pour la biomasse maximale sont présentés dans le Tableau 3. Ainsi, dans le cadre du projet, un volume d'élevage minimum de 1 050 m³ est requis pour maintenir une densité maximale de 20 kg/m³. Afin de garantir une capacité de variation du débit d'eau neuve de forage, nous avons déterminé que le débit utilisé serait de 4,5 m³/h, correspondant à 90% du débit total disponible. Par conséquent, l'ouverture du système est établie à 0,5 m³/kg d'aliment distribué et le débit de recirculation d'eau neuve a été estimé à 10,3%/j. Enfin, le débit de recirculation interne a été fixé à un renouvellement d'eau d'élevage par heure, soit un débit de 1 050 m³/h.

Tableau 3. Calcul des 4 paramètres essentiels pour l'élevage de 7000 esturgeons de 3kg, de densité maximale de 20 kg/m³, en système recirculé

Paramètre	Abréviation	Formule de calcul	Valeur
Volume total d'élevage	V _{tot}	BW _{finale} / d _{max}	1 050 m ³
Ouverture du système	O _{système}	D _{EN} x 24h / Qte _{aliment}	0,5 m ³ /kg d'aliment
Débit de recirculation interne	D _{int}	N _{renouv} x V _{tot}	1 050 m ³ /h
Débit de recirculation d'eau neuve	D _{EN recircu}	[D _{EN} x 24h / V _{tot}] x 100	10,3 %/j

Où BW_{finale} : biomasse finale (kg), d_{max} : densité maximale (kg/m³), D_{EN} : débit d'eau neuve (m³/h), Qte_{aliment max} : quantité maximale d'aliment distribué par jour (kg/j) et N_{renouv} : Nombre de recirculation de l'eau d'élevage par heure (h⁻¹).

En outre, il est nécessaire de connaître la quantité d'eau d'élevage d'un RAS avant de le dimensionner. Dans le cadre de ce projet, un système de filtration sera mis en place pour couvrir un quart du volume total d'élevage. Cette solution présente un équilibre optimal entre l'autonomie des bassins et la rentabilité économique d'un RAS, discuté dans la partie IV.1.A.

III.1.B Les besoins et les rejets des esturgeons

Les rejets totaux de MES, de TAN et de phosphates sont respectivement pour un RAS de l'unité de production de 24,2±4,8 kg/j, 2,0±0,4 kg/j et 0,35±0,08 kg/j. La consommation d'O₂ atteint 0,53±0,11 kg/h. La production de CO₂ quant à elle augmente de 0,73±0,15 kg/h. Les calculs des besoins et des rejets des esturgeons sont exposés dans le Tableau 4.

Tableau 4. Besoins et rejets d'une unité de production aquacole accueillant 7000 esturgeons de 3kg, de densité maximale de 20 kg/m³

Paramètre	Abréviation	Valeur pour l'unité de production complète	Valeur pour un RAS
Rejets de MES	Qte _{MES}	96,6 ± 19,3 kg/j	24,2 ± 4,8 kg/j
Rejets de TAN	Qte _{TAN}	7,9 ± 1,6 kg/j	2,0 ± 0,4 kg/j
Rejets de phosphates	Qte _P	1,4 ± 0,3 kg/j	0,35 ± 0,08 kg/j
Consommation d'O ₂	Qte _{O2}	2,1 ± 0,4 kg/h	0,53 ± 0,11 kg/h
Production de CO ₂	Qte _{CO2}	2,9 ± 0,6 kg/h	0,73 ± 0,15 kg/h








N.B. : Les formules de calcul sont indiquées dans la partie II.1.B.

III.2 Choix et dimensionnement de la nouvelle unité de production

III.2.A Entretien et visites de terrain avec des professionnels de la filière

Abordés lors des 10 entretiens, la synthèse des recommandations et des points de vigilance à prendre en compte lors de la conception d'un RAS sont exposés dans le Tableau 5.

Tableau 5. Synthèse des entretiens semi-directifs concernant les recommandations et les points de vigilance des équipements de filtration d'un RAS de l'unité de production

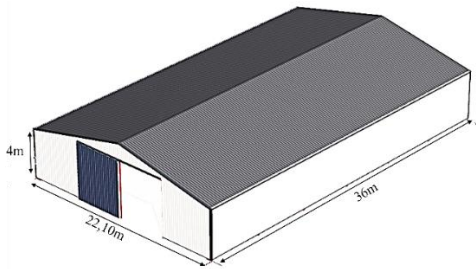
Thématiques	Recommandations	Points de vigilance / Commentaires
Bassins d'élevage 	<ul style="list-style-type: none"> - Bassins raceways (3, 4, 5 et 7) - Bassins circulaires (1, 2, 4 et 6) 	<ul style="list-style-type: none"> - Surface au sol importante (4 et 5) - Profondeur comprise entre 1m et 1,5m pour créer des « zones d'ombre » (4) - Matériaux PEHD facilitent désinfection (8)
Filtration mécanique 	Filtre à tambour à maille intermédiaire (tous)	<ul style="list-style-type: none"> - Filtre à tambour nécessite toujours un by-pass en cas de colmatage (4 et 6) - 2 filtres à tambour pour en avoir un de secours en cas de panne (5)
Filtration biologique : nitrification 	<ul style="list-style-type: none"> - Lit fluidisé (tous) - <u>Biomédia</u> : Curler en polyéthylène (PE) avec une surface spécifique supérieure à 800m²/m³ (tous) 	<ul style="list-style-type: none"> - 2 ou 3 filtres biologiques en série pour une meilleure filtration (3, 4, 6 et 7) - Avoir un lit fluidisé de secours (5) - <u>Dimensionnement du lit fluidisé</u> : pour 1kg d'aliment, il faut 1m³ de lit fluidisé (4) - <u>Dimensionnement de la soufflante</u> : 7 fois le volume d'eau du filtre biologique (4) - By-pass pour pouvoir désinfecter un filtre biologique tout en alimentant le second (8)
Dénitrification	Pas nécessaire (tous)	/
UV et ozonation 	Pas nécessaire pour des esturgeons de plus de 500 grammes (1, 2, 3, 4, 5 et 8)	<ul style="list-style-type: none"> - Lampes à ultraviolets (UV) à placer avant filtration biologique pour protéger les bactéries (6) - Lampes à UV à placer après la filtration mécanique et biologique pour limiter la concentration de MES dans l'eau (7)
Mise en mouvement de l'eau 	<ul style="list-style-type: none"> - Airlift quand la pente à remonter est faible (5, 6 et 7) - Pompage facilite la maintenance car celle de l'airlift est importante (1, 2, 3 et 4) 	<ul style="list-style-type: none"> - Toujours expérimenter l'airlift sur un petit volume (7) - Airlift est une méthode pour resaturer l'eau en O₂ (5 et 7)
Aération / Oxygénation 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas nécessaire car il y a les soufflantes du lit fluidisé (5 et 7) - Diffuseurs indépendants dans chaque bassin (4 et 6) 	<ul style="list-style-type: none"> - Avoir un système d'oxygénation (diffuseur ou injecteur) de secours en cas de concentrations en TAN ou nitrites élevées (tous) - Maintenir une concentration d'oxygène dissous supérieure à 6mg/L (8)
Dégazage	<ul style="list-style-type: none"> - Colonne de dégazage (4 et 7) - Aérateur dans cuve de reprise suffit (5, 6 et 8) 	- Colonne de dégazage permet de resaturer l'eau en oxygène (4 et 7)
Approche sociétale d'un RAS 	- Se procurer du matériel de rechange en amont pour pallier aux défauts techniques (4, 6 et 9)	<ul style="list-style-type: none"> - Les RAS facilitent la réglementation pour l'élevage de nouvelles espèces (4 et 9) - Peu d'acceptabilité des consommateurs vis-à-vis des projets de RAS, principalement pour la salmiculture (7 et 9)

Où 1 : Fodina Fish ; 2 : Tapolcai Pisztrang ; 3 : Forus ; 4 : Rideg & Rideg Fish Farm ; 5 : Esturgeonnière ; 6 : INRAE Saint-Seurin ; 7 : Lycée Olivier Guichard ; 8 : Vet'eau ; 9 : ITAVI & 10 : OFB

III.2.B Conception et dimensionnement du RAS

i. Dimensionnement des hangars

Avant d'envisager les différentes configurations possibles du système d'élevage, il est primordial d'évaluer les dimensions des hangars disponibles. Dans un souci de rentabilité et de facilité d'installation, nous opterons pour une charpente métallique et une ossature en kit fournies par SCREB, le fournisseur actuel de la Pisciculture Hennequart. Les dimensions extérieures sont limitées à 22,10m en largeur et 60m en longueur (données constructeurs). Toutefois, comme 1050 m³ d'élevage sont requis, sans compter l'espace nécessaire pour le système de filtration et la circulation du personnel, il apparaît que ces dimensions sont légèrement insuffisantes pour permettre l'élevage dans un seul hangar (1 150m²).



Deux hangars de dimensions 22,10m (L) X 36m (l) X 4m (H) seront installés, afin de répondre aux besoins d'espace tout en assurant une meilleure gestion de l'élevage (Figure 11). Un bardage en panneaux sandwich permettra une isolation thermique.

Figure 11. Dimensions d'un hangar SCREB pour la nouvelle unité de production

ii. Les bassins d'élevage

Il est primordial de tenir compte des particularités de l'esturgeon, une espèce qui réside principalement au fond des bassins et qui agite continuellement les sédiments. Dans cette optique, notre choix s'est porté sur la construction de bassin raceways en polyéthylène haute densité (PEHD) avec des angles coupés à 45°, offrant une surface adéquate tout en évitant les dépôts angulaires. De plus, une pente d'environ 2%, ainsi qu'une légère incurvation des angles de la partie inférieure du bassin, sera établie entre l'entrée et la sortie du bassin, permettant une évacuation optimale des eaux de rejets. Il est judicieux d'envisager l'implantation de bassins de dimension 15m (L) x 5m (l) x 1,2m (P moyenne), totalisant 90m³, comme représenté par la Figure 12, afin de maximiser la vitesse du courant (Sheltz, 1986). Dans la suite de cette partie, nous nous intéresserons au dimensionnement d'un RAS de volume d'élevage de 270m³ correspondant à 3 bassins. **Un hangar sera composé de 2 RAS, soit 6 bassins. L'unité de production correspondra alors à 2 hangars, soit 4 RAS et 12 bassins au total.**

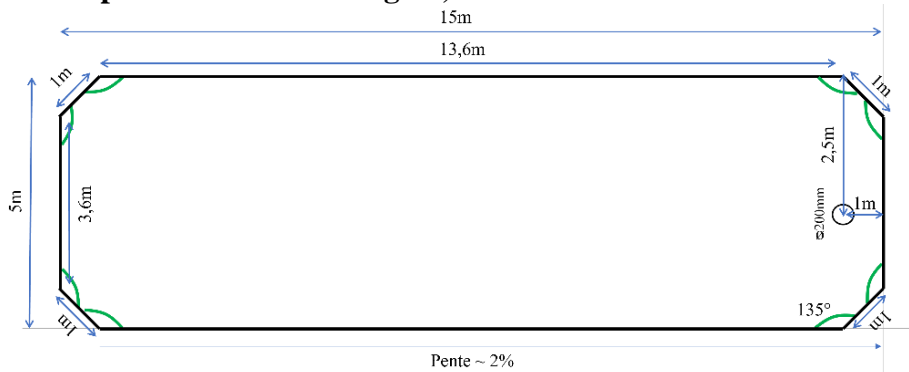


Figure 12. Schématisation d'un bassin d'élevage en vue aérienne

Pour le chauffage de l'eau d'élevage, une pompe à chaleur Eau/Eau sera mise en place pour chauffer exclusivement l'apport d'eau neuve de 14°C à 20°C, soit de 6°C.

iii. La filtration mécanique

Comme présenté dans le Tableau 1 (section I.3) et évoqué lors des entretiens (Tableau 5), les filtres à tambour sont les plus adaptés pour un débit d'eau d'élevage élevé (270 m³/h) avec de faibles teneurs en MES (3,8 mg/L/h < 10 mg/L/h). Quant à la taille de filtration choisie, nous avons opté pour une taille de 63µm, permettant d'assurer une efficacité de filtration optimale tout en prévenant d'éventuelles obstructions.

Le modèle retenu est le filtre à tambour sur bâti avec arrivée par tuyau du fournisseur Faivre Industrie Environnement 63µm de la série 120, doté de 6 plaques, ayant une capacité de filtration de 367 m³/h. Les spécifications techniques de ce filtre sont présentées à l'Annexe 4.

iv. La filtration biologique : le compartiment de nitrification

De manière similaire à la filtration mécanique, le critère prédominant pour choisir un filtre de nitrification est le débit élevé de renouvellement de l'eau (270 m³/h). De plus, suite aux entretiens menés, compte tenu du risque d'encrassement et de la complexité de l'entretien d'un biofilm dans un lit fixe, le choix privilégié pour la filtration biologique se porte sur le lit fluidisé. En outre, deux lits fluidisés de dimensions différentes seront mis en place pour assurer un fonctionnement optimal de la filtration biologique. En ce qui concerne le choix du support biologique, nous privilégierons le média HXF12KLL en PE recyclé, proposé par le fournisseur Aqualor, présentant une surface spécifique ($S_{\text{spécifique}}$) de 859 m²/m³. D'après les calculs de dimensionnement d'un biofiltre (Tableau 6), il faudrait $7,3 \pm 1,5$ m³ de média donc un volume du biofiltre de $24,3 \pm 4,9$ m³ minimum pour un remplissage (%remplissage) de 30%.

Tableau 6. Dimensionnement d'un lit fluidisé pour un RAS

Paramètre	Abréviation	Valeur pour un RAS
Azote ammoniacal total	Qte TAN	$2,0 \pm 0,4$ kg/j
Ammonium	Qte NH ₄ ⁺	$(1 - \%_{\text{NH}_3}) \times \text{Qte TAN} = 2,0 \pm 0,4$ kg/j
Surface de média	S _{média}	$2,5 \times (\text{Qte NH}_4^+ / t_{\text{TAN}}) = 6 250 \pm 1250$ m ²
Volume de média	V _{média}	$S_{\text{média}} / S_{\text{spécifique}} = 7,3 \pm 1,5$ m ³
Volume du biofiltre	V _{biofiltre}	$V_{\text{média}} / \%_{\text{remplissage}} = 24,3 \pm 4,9$ m ³

Où %_{NH₃} : pourcentage de NH₃ dissous et t_{TAN} : taux de nitrification (gNH₄⁺.m⁻².j⁻¹)

Ainsi, nous partirons sur 2 lits fluidisés en série de dimensions respectives de 5mx4,5mx1,2m (27 m³) et 5mx3,5mx1,2m (21 m³), soit 48 m³ au total.

Pour assurer une circulation adéquate de l'air, nous utiliserons une soufflante, qui permettra de faire parvenir l'air à travers des tuyaux PVC perforés. Le volume d'air nécessaire devant être compris entre 5 et 7 fois le volume du biofiltre, soit entre 240 m³ et 336 m³, nous avons donc choisi la soufflante HPE Séries HSC0415-1MT301, vendue par la Coopérative Française de l'Aquaculture (C.O.F.A). Ses données techniques sont indiquées dans l'Annexe 5.

v. Le compartiment de dénitrification

Pour le calcul des nitrates, nous nous référerons au bilan de la réaction de la nitrification, abordée dans la partie I.3.A. Ainsi, pour 1 gNH₄⁺ consommé, 3,4 gNO₃⁻ est produit, soit $6,8 \pm 1,4$ kg/j. Le taux de renouvellement étant de 10,3% du volume d'élevage par jour, la quantité de nitrates dans l'eau s'élève au maximum à $237,6 \pm 48,1$ mg/L (< 397 mg/L).

Ainsi, l'installation d'une unité de dénitrification supplémentaire ne semble pas obligatoire à ce stade.

vi. L'ozonation et la désinfection UV

A la suite des entretiens, il a été souligné qu'à partir de 500 à 600 grammes une unité de désinfection est peu utile car les poissons sont beaucoup plus résistants aux pathogènes si les conditions d'élevage optimales sont respectées. De plus, étant donné que M. Hennequart est responsable de la production de ses propres alevins et qu'il a connu peu d'épisodes de maladies au cours de ses années de production, cela justifie d'autant plus la non-utilisation d'unité de désinfection à partir de ce stade. Cette prise de risque sera discuté dans la partie IV.I.A.

En somme, il ne semble pas essentiel d'utiliser une unité de désinfection de l'eau.

vii. La mise en mouvement de l'eau

La conception hydraulique du système d'eau repose sur un fonctionnement gravitaire, avec une pente à remonter de seulement 2%. Dans ces conditions, tant les pompes que l'airlift peuvent être envisagés comme solutions de circulation de l'eau. Cependant, la méthode de l'airlift n'est pas maîtrisée par tous les techniciens aquacoles de la pisciculture, a contrario de la maintenance des pompes.

Notre choix se portera sur des pompes à hélices basse-pression de la marque LINN, vendues par le fournisseur Aqualor, dont la consommation énergétique maximale est comparable à celle des pompes à air.

Les courbes des pompes sont indiquées à l'Annexe 6. Un bassin de reprise sera aménagé pour faciliter le pompage de l'eau. L'arrivée d'eau neuve sera dirigée directement vers ce bassin de reprise, même si la possibilité d'utiliser un circuit de contournement (by-pass) sera envisagée pour le remplissage initial des bassins.

viii. Les connexions hydrauliques

En supposant une vitesse moyenne de l'eau de 2,5 m/s et un débit de 90 m³/h ou bien de 270 m³/h, le diamètre des tuyaux PVC est respectivement de 125 mm et 200 mm. Afin de minimiser les pertes de charges, l'utilisation de coudes à 45° est recommandée. Pour les soufflantes, un tuyau PVC de 200 mm distribuera l'air dans plusieurs tuyaux PVC de 50 mm.

ix. Les transferts de gaz

D'après les observations émises par Timmons & Vinci (2022), l'utilisation exclusive de l'aération comme moyen d'apport d'oxygène dissous dans le système permettrait de soutenir une densité d'élevage d'environ 40 kg/m³.

Dans cette perspective, le Flobull 1CV de la marque Faivre Industrie Environnement permettra la production de 0,9 kgO₂/h (données techniques en Annexe 7). Il sera installé dans le bassin de reprise.

Néanmoins, dans des situations d'urgence, telles qu'une panne de la pompe de circulation ou une concentration excessive de nitrites, l'installation de diffuseurs céramiques d'oxygène, placés directement dans les bassins, sera envisagée. Quant au dégazage, étant donné que seule l'aération est utilisée sans ajout d'oxygène dans l'eau, et compte tenu de la faible densité d'élevage, l'installation d'une colonne de dégazage apparaît comme superflue pour maintenir une concentration faible en CO₂ dissous dans le système.

III.3 Etude de l'analyse financière de l'unité de production

III.3.A Les investissements

i. Les coûts d'investissement et les amortissements des immobilisations

L'analyse des résultats concernant les coûts d'investissement au sein de l'unité de production, explicités par le Tableau 7, révèle un montant total de 1 057 437€. Cette somme se répartit principalement dans la construction du bâtiment, englobant la charpente, le bardage ainsi que les panneaux photovoltaïques, représentant 48% du montant total. Les dépenses pour la mise en place des bacs d'élevage et de filtration constituent le second poste le plus important, comptant pour 38% de l'ensemble des coûts. Il est intéressant de souligner que l'investissement prédominant au sein des équipements de filtration est associé à l'acquisition des filtres à tambour. Les durées et les amortissements de ces immobilisations sont présentés à l'Annexe 9.

Tableau 7. Coûts d'investissement de l'unité de production en système recirculé

	Bâtiment			Bassin d'élevage et de filtration			Filtration mécanique	Mouvement de l'eau
	Hangar-charpente	Bardage	Panneaux photovoltaïques	Coffrage	Bac de filtration béton	Bac d'élevage	Filtre à tambour	Pompes de circulation
Quantité	2	2	NA	4	4	12	4	12
Prix unitaire (HT)	41 684,00 €	172 980,00 €	NA	7 500,00 €	7 500,00 €	28 564,85 €	24 266,00 €	1 275,00 €
Valeur totale (HT)	83 368,00 €	347 960,00 €	73 586,00 €	30 000,00 €	30 000,00 €	342 778,20 €	97 064,00 €	15 300,00 €
	Filtration biologique		Aération/Oxygénation		Autres			
	Soufflantes	Média de biofiltration	Aérateurs	Diffuseur O2 céramique	Tuyaux PVC	LED	Pompe à chaleur	Grilles
Quantité	4	58	4	12	NA	12	1	NA
Prix unitaire (HT)	1 590,20 €	190,00 €	2 090,90 €	136,00 €	NA	499,00 €	1 620,00 €	NA
Valeur totale (HT)	6 360,80 €	11 020,00 €	8 363,60 €	1 632,00 €	20 000,00 €	5 988,00 €	1 620,00 €	8 000,00 €
Total besoins (HT)								1 057 437,00 €

ii. Le plan de financement

Le FEAMPA subventionnera le projet à hauteur de 50%, soit 528 719€. Ensuite, pour permettre l'emprunt, les fonds propres de l'entreprise financeront le projet à hauteur de 15%, soit 158 616€. Enfin, l'emprunt demandé à rembourser sera de 370 103€ auquel s'ajoutent les intérêts d'un montant de 81 423€. Le plan de financement est récapitulé dans le Tableau 8. Les amortissements d'emprunt et les quote-parts de subvention sont indiqués à l'Annexe 10.

Tableau 8. Plan de financement de l'unité de production en système recirculé

Méthode de financement	Montant (HT)
Fonds propres	158 615,55 €
Emprunt	370 102,95 €
Subvention	528 718,50 €
Autre financement	- €
TOTAL RESSOURCES	1 057 437,00 €

III.3.B Le compte de résultat prévisionnel

Tout d'abord, les coûts de fonctionnement et de maintenance pour l'unité de production complète ont été calculés et sont illustrés par la Figure 14. Au total, l'énergie de fonctionnement quotidienne de l'unité de production s'élève à 31 kWh, si tous les équipements fonctionnent simultanément. Les deux premiers postes de consommation énergétique, représentant plus de 50% de la consommation totale, sont les soufflantes et les pompes de circulation. Quant aux coûts de maintenance, ils ont été estimés à 12 000€ par an et sont majoritairement composés par l'entretien des pompes de circulation et des filtres à tambour.

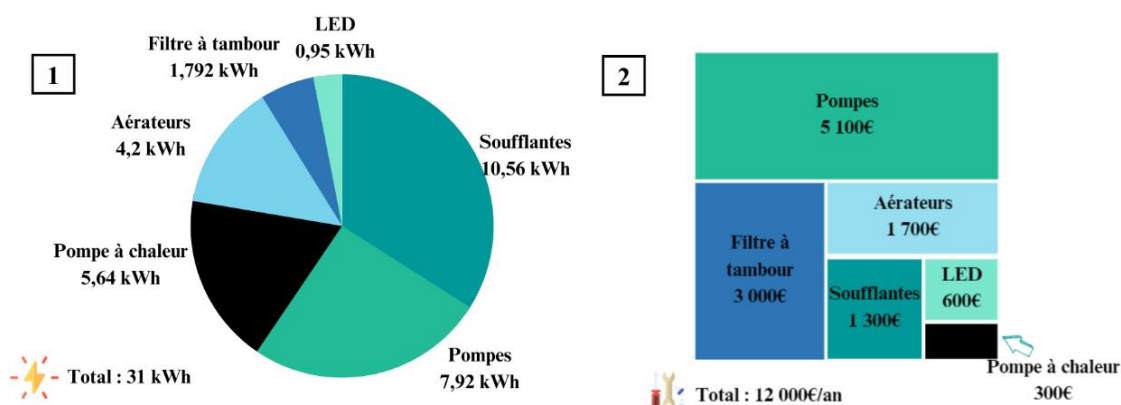


Figure 14. Répartition des postes de consommation énergétique (1) et des coûts de maintenance (2) de l'unité de production

La Figure 15 représente l'évolution des bénéfices après impôts sur une période de 10 ans après l'installation de l'unité de production. Sur cette période, les bénéfices nets diminuent de 24% passant de 310 016€ à 234 288€. Etant donné qu'aucune mesure compensatoire (augmentation du prix de vente du caviar) n'a été appliquée face à l'augmentation des coûts des matières premières et de l'énergie, ce qui sera abordé en détail dans la partie IV.2.B, cette diminution des bénéfices est principalement due à une augmentation des charges d'exploitation (12%) supérieure à celle des produits d'exploitation (6%). Le compte de résultat prévisionnel est détaillé à l'Annexe 11.

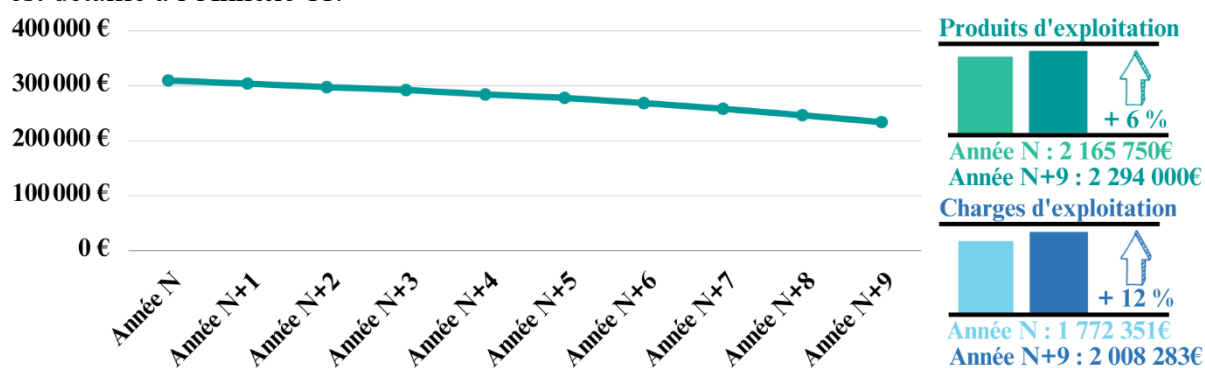


Figure 15. Evolution des bénéfices nets sur une période de 10 ans après la mise en place de l'unité de production

III.3.C Les indicateurs économiques de la viabilité du projet

i. Les soldes intermédiaires de gestion (SIG) et le seuil de rentabilité

Les seuils de rentabilité pour les années N et N+9 sont présentés par le Tableau 9. Ils sont évalués respectivement à 1 623 488€ et 1 855 938€, et définissent donc les niveaux de revenus nécessaires pour couvrir les coûts totaux et atteindre un équilibre financier. L'année N et l'année N+9 présentent un seuil de rentabilité respectif de 75% et 81% du CA de l'année, indiquant que 25% et 19% des revenus au-delà de ce seuil contribueront aux bénéfices nets.

Tableau 9. Seuils de rentabilité de l'année N et de l'année N+9 de l'unité de production

	Année N	Année N+9
Charges fixes	1 177 803 €	1 210 501 €
Charges variables	594 548 €	797 781 €
Chiffre d'affaires (CA)	2 165 750 €	2 294 000 €
Seuil de rentabilité	1 623 488 €	1 855 938 €
Pourcentage du CA de l'année	75 %	81 %

Les SIG calculés pour l'année de départ (Année N) et l'année de fin du prévisionnel (N+9) sont indiqués par la Figure 16. Au cours des 10 années, l'entreprise enregistre une légère croissance de 6% de son chiffre d'affaires. La valeur ajoutée et l'excédent brut d'exploitation diminuent de 7% au cours des 10 années, suite à une augmentation de la part des achats consommés, passant de 20% à 25% du chiffre d'affaires. Cela traduit également une diminution du résultat d'exploitation, qui est passé de 393 399€ à 285 717€ en année N+9, tout en maintenant une capacité d'autofinancement (CAF) positive de 17% du chiffre d'affaires.

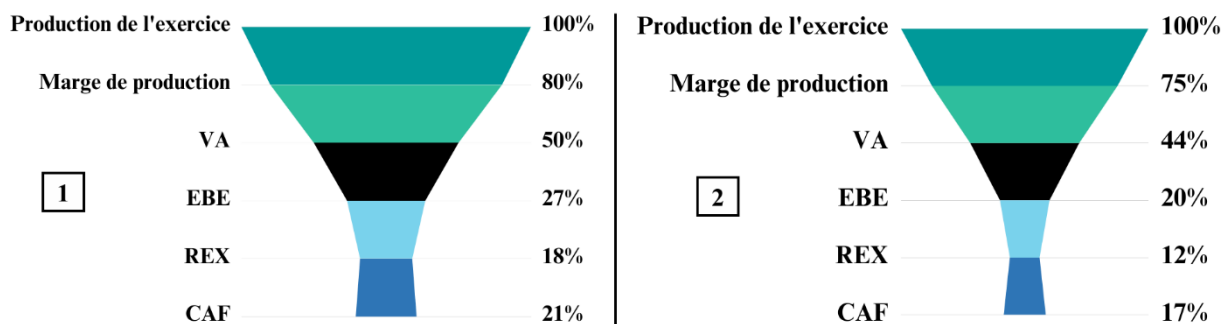


Figure 16. Les SIG de l'année N (1) et de l'année N+9 (2) de l'unité de production

ii. Le budget de trésorerie

Le solde de trésorerie se caractérise par une constante positivité, bien que durant la période d'analyse, une réduction de 19 % soit observée, passant de 424 267 € à 341 925 €. Cette décroissance trouve son origine dans l'accroissement significatif de 27 % des dépenses liées aux achats de matières premières, conjugué à une élévation de 9 % des charges afférentes au personnel. Cependant, il est important de noter que les fonds propres initialement investis, évalués à 158 615 €, pourront être entièrement recouverts dès la première année d'exploitation. Cette conjoncture témoigne d'une gestion équilibrée et d'une perspective encourageante pour la pérennité financière de l'entreprise. La variation du solde est explicitée par la Figure 17. Tous les encaissements et décaissements sont présentés par l'Annexe 12.

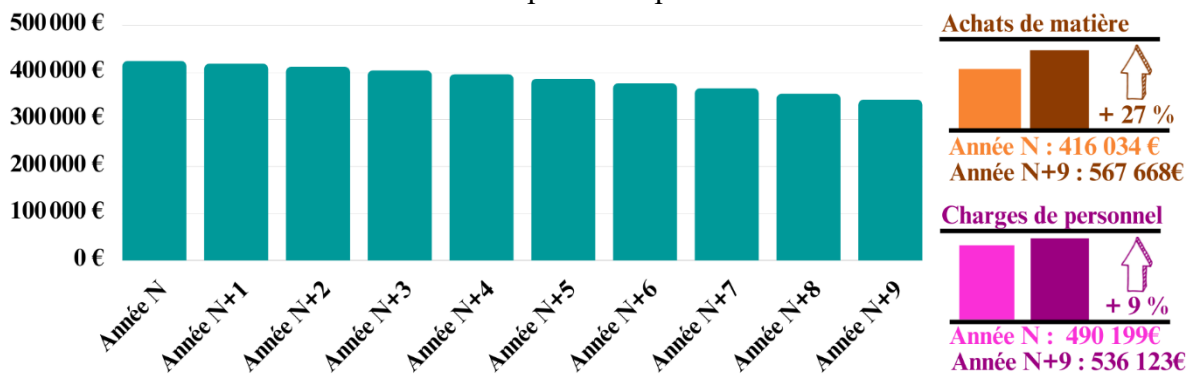


Figure 17. Variation du solde de trésorerie sur une période de 10 ans après la mise en place de l'unité de production

III.3.D L'analyse comparative

i. Comparaison système de production en étang et en système recirculé : calcul du coût de l'esturgeon au kilogramme

La Figure 18 présente la répartition des différents postes de dépenses pour la production d'un kilogramme d'esturgeon entre 700 grammes et l'âge d'être sexé. L'analyse des charges révèle que l'alimentation constitue le principal poste de dépenses, contribuant à plus de 75% du coût final par kilogramme de poisson, tant en système d'étang qu'en système recirculé. Cette prépondérance souligne l'impact significatif de la nutrition sur le processus d'élevage. L'écart

accru des coûts de main-d'œuvre entre les deux systèmes s'explique par la durée prolongée du cycle de croissance en étang, deux fois supérieure à celle en système recirculé, due notamment à l'absence d'alimentation lors de la période hivernale. Une comparaison détaillée avec un élevage en étang à un stade similaire révèle que malgré des coûts supérieurs en termes d'énergie et de maintenance, le système recirculé parvient à afficher un coût par kilogramme de poisson inférieur, grâce à une gestion de la croissance optimale. Enfin, les données présentées établissent ainsi le coût du kilogramme de poisson à 9,35 € pour le système en étang, tandis qu'il s'élève à 7,93 € pour le système recirculé sans considérer les annuités d'emprunt, soit 15% moins cher. Cependant, une fois les annuités d'emprunt prises en compte, le coût du kilogramme de poisson produit en système recirculé augmente à 10,08 €.

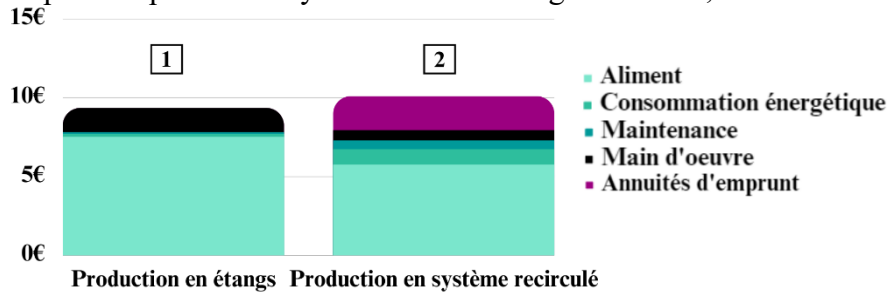


Figure 18. Comparaison des coûts de production de l'élevage en étangs et en système recirculé pour la production d'un kilogramme d'esturgeon sibérien entre 700gr et 3kg

ii. Analyse de différents scénarii prospectifs

L'examen des trois scénarii alternatifs (II.3.D.ii) révèle des nuances significatives quant à leurs impacts sur la viabilité financière de l'entreprise. Les bénéfices nets de la mise en place de chaque scénario sont présentés par la Figure 19. Un modèle hypothétique et peu plausible, caractérisé par l'absence de mise en place d'une unité de production et l'ignorance des conséquences des variations climatiques, démontre une diminution progressive des bénéfices nets au fil des années. Bien que ceux-ci soient plus élevés que dans les autres scénarii, cette diminution souligne l'importance d'anticiper la hausse des coûts de l'énergie et des matières premières. En contraste, le deuxième scénario, dans lequel la densité d'esturgeons dans les étangs diminue, expose une trajectoire de perte croissante de 91%, jusqu'à un résultat de 39 290€. Dans un contexte différent, le troisième scénario, où la densité d'esturgeons dans les étangs reste stable mais avec diminution du nombre d'étangs, présente également une réduction progressive des bénéfices nets. Bien que les chiffres soient plus positifs que dans le deuxième scénario, ils montrent néanmoins une diminution continue, s'établissant à 78 829 € à la dixième année. Enfin, le quatrième scénario, impliquant la mise en œuvre d'une unité de production, se distingue par des bénéfices nets qui évoluent de manière similaire à ceux du scénario théorique.

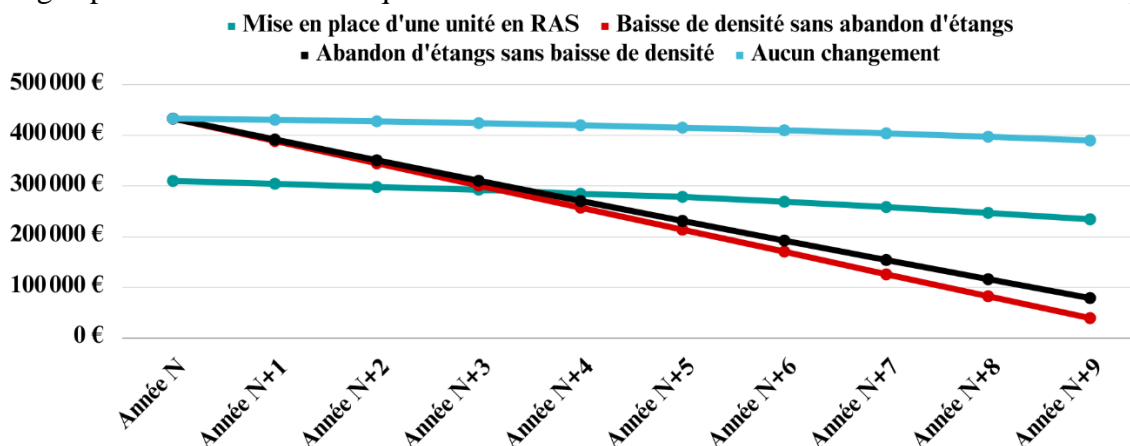


Figure 19. Evolution des bénéfices nets sur 10 ans selon 4 scénarii de gestion d'élevage



Partie IV : Discussion

Dans un dernier temps, notre démarche vise à appréhender les avantages inhérents à l'établissement d'une unité de production en système recirculé pour des esturgeons pesants entre 700 grammes et 3 kilogrammes. Ce faisant, nous nous focaliserons sur le contexte spécifique de l'exploitation de la Pisciculture Hennequart. Contrairement aux deux parties précédentes, la présente section s'attachera à considérer de manière conjointe l'ensemble des paramètres, qu'ils soient d'ordre productif, sanitaire, économique ou technique. Cette approche intégrée vise à mettre en évidence les atouts ainsi que les limites de ce projet.

IV.1 Optimisation des paramètres opérationnels

IV.1.A Système gravitaire : réduction des coûts énergétiques dans le RAS

Au premier abord, le système de recirculation mis en œuvre peut sembler relativement simple. Cependant, il est impératif de garder à l'esprit que bien que l'ouverture du système soit faible, la densité d'esturgeons (20 kg/m^3) demeure faible pour un RAS, en comparaison avec d'autres systèmes qui peuvent atteindre des densités allant jusqu'à 100 kg/m^3 selon l'espèce (Tocqueville *et al.*, 2019). La conception du RAS a été dimensionnée en fonction des exigences spécifiques et des expériences de la Pisciculture Hennequart. En effet, la présence d'une eau légèrement trouble ne perturbe pas les esturgeons, qui préfèrent généralement les zones ombragées. De même, en l'absence d'épisodes de maladies, l'installation d'une lampe à UV ne semble pas indispensable, à condition de prendre des mesures préventives adéquates (changement de bottes dans le sas, désinfection annuelle...). En cas de survenue d'un tel épisode, la conception des raceways avec des angles coupés permettra d'intégrer des lampes UV si nécessaire. Par unité, les coûts d'investissement augmenteront de 4 500€ et la consommation énergétique de 1,1 kWh. Cependant, le principal facteur limitant pour les esturgeons demeure la présence de nitrites et de nitrates dans l'eau d'élevage. En ce qui concerne les nitrites, l'introduction de deux lits fluidisés devrait contribuer à résoudre cette problématique, même si cela induit une augmentation de la consommation énergétique des soufflantes, qui constituent le principal poste de consommation. Pour ce qui est des nitrates, une surveillance s'impose d'autant plus que la tolérance des esturgeons à ces composés diminue à mesure qu'ils grandissent. En cas de pics élevés de la concentration en nitrates, il sera possible de faire fluctuer le débit d'eau neuve pour ouvrir le système (Hamlin, 2016).

Dans un second temps, le choix d'adopter un mode de fonctionnement gravitaire pour le système de circulation d'eau au sein d'un RAS constitue une stratégie visant à minimiser les dépenses opérationnelles. En outre, la faible pente nécessaire pour le pompage réduit les coûts énergétiques de manière significative. Parallèlement, l'intégration de panneaux solaires, bien que représentant une augmentation de 7% dans les dépenses d'investissement, confère la capacité d'auto-consommer environ 37% de la consommation électrique annuelle, principalement pendant la période estivale. Cette approche engendre ainsi une réduction substantielle de la consommation énergétique totale. Les coûts énergétiques globaux représentent alors 12,5% des coûts de production, ce qui semble cohérent avec l'étude réalisée par Tocqueville *et al.* (2019) indiquant que les coûts énergétiques représentaient environ 10% des coûts de fonctionnement.

Le choix de quatre RAS, chacun composé de trois bassins de 90 m^3 , a été privilégié en raison de divers avantages techniques et économiques. Cette configuration assure une distribution homogène de la biomasse, prévenant ainsi les problèmes liés aux fortes densités et

à la compétition alimentaire. Elle offre également une flexibilité opérationnelle, où un des systèmes peut être mis hors service pour maintenance ou retardé dans sa mise en route en fonction de la croissance des individus. En comparaison avec d'autres approches, telles qu'un RAS unique par hangar ou des RAS individuels pour chaque bassin, la solution proposée présente un équilibre entre les coûts d'investissements et opérationnels, la gestion simplifiée du cheptel et la diversification des risques de maintenance. Cette configuration peut se traduire par une meilleure stabilité opérationnelle et un contrôle plus efficace des paramètres de l'eau.

IV.1.B Ensemencement des lits fluidisés : période cruciale pour la production

D'un point de vue technique, l'ensemble des équipements a été surdimensionné pour prévenir tout problème. Cependant, même avec la présence de deux lits fluidisés, il demeure une période critique liée à leurensemencement. Étant donné que les travaux s'achèveront en avril, coïncidant avec la première mise en eau des bassins, la fenêtre temporelle pour l'ensemencement des filtres biologiques pourrait être restreinte. En effet, les filtres biologiques nécessitent un temps de démarrage pour que le biofilm, constitué de bactéries nitrifiantes, se développe. Le processus de colonisation bactérienne requiert des conditions appropriées telles qu'une température de l'eau supérieure à 7-8°C et une concentration en oxygène dissous supérieure à 4 mg/L. Une mise en service prématurée du biofiltre avant l'établissement adéquat de ce biofilm pourrait engendrer une faible efficacité voire une inefficacité totale. Habituellement, la période de démarrage du filtre se situe entre 20 et 40 jours, en fonction de facteurs tels que la température et le pH. Cependant, l'inoculation de cultures bactériennes ou l'introduction de substrats bactériens préexistants peuvent accélérer ce processus (Geetha Preena *et al.*, 2021 ; Timmons & Vinci, 2022).

Au cours de cette phase de démarrage, une exposition réduite aux nitrites, produits finaux du processus de filtration, est cruciale. Étant donné la toxicité potentielle des nitrites, particulièrement pour les poissons, il est essentiel de surveiller attentivement ce paramètre. Dans ce contexte, les niveaux de chlorure (Cl⁻) jouent un rôle particulièrement important chez les espèces d'eau douce pour prévenir ou réduire la toxicité des nitrites. En effet, plusieurs études ont démontré que les nitrites sont des inhibiteurs compétitifs de l'absorption des chlorures, ce qui expliquerait pourquoi une augmentation de la concentration de chlorure dans l'eau protège les poissons à la fois contre l'absorption des nitrites par les branchies et contre leur toxicité. Ainsi, l'ajout de chlorure dans l'eau est considéré comme la méthode la plus efficace pour protéger les poissons d'eau douce contre la contamination par les nitrites, notamment pendant la période mise en fonctionnement du biofiltre (Jensen, 2003 ; Matsche *et al.*, 2012).

IV.2 Objectif principal de l'unité de production : consolider durablement la production

IV.2.A Comparaison avec le système d'élevage en étangs

L'analyse comparative des coûts par kilogramme de poisson par cycle (Figure 18) révèle une majoration de 15% pour un élevage en milieu étang par rapport à un système recirculé. Ces observations rejoignent les conclusions de Lavenant *et al.* (1995) qui ont rapporté une réduction de 20% à 25% des coûts de production pour le bar et le turbot dans le contexte d'un système recirculé par rapport à un système ouvert.

Les coûts de production en aquaculture résultent d'une conjonction de multiples paramètres, incluant l'envergure de l'installation, la technologie employée, l'efficacité opérationnelle, les charges de personnel et en matières premières, ainsi que les contingences environnementales.

Les systèmes recirculés tirent profit de cadences de croissance plus soutenues et de taux de conversion alimentaire améliorés, facteurs concourant à l'abaissement des coûts de production, comme illustré dans cette situation (Martins *et al.*, 2010). Actuellement, le cycle de croissance au sein de la Pisciculture Hennequart s'étend sur deux années, faisant passer les poissons de 700 grammes à 2,5 kg, alors qu'un esturgeon en système recirculé peut atteindre environ 3 kg en une seule année (Tshering *et al.*, 2022). Cependant, ils sollicitent également des investissements initiaux supérieurs en termes d'équipements et d'infrastructures, un aspect non pris en compte dans cette analyse comparative du fait de la complexité inhérente à la comparaison exclusive des amortissements dans la phase étang. Dans le cadre des discussions relatives aux investissements, il est important de mentionner que les demandes de devis ont été soumises en juin 2023, période durant laquelle l'inflation est encore présente en France sur une base de +4,5% par an (Claisse & Chouteau, 2023). Par conséquent, il est envisageable que les coûts des investissements puissent excéder les prévisions énoncées. Une étude du PIIAM (2012) portant sur un projet similaire a souligné que, à la même période de réalisation, un dépassement budgétaire avait été observé, atteignant 13,5%.

Dans son ensemble, du point de vue du coût de production, il est clair que l'intégration d'une unité de production présente une rentabilité théoriquement supérieure à celle d'un élevage en milieu étang. Cette perspective de viabilité économique s'affirme comme l'un des avantages clés intrinsèque à la mise en place de l'unité de production.

IV.2.B La durabilité de l'état financier sur le long terme

Les différents scénarii illustrés à la Figure 19 mettent en évidence la complexité des facteurs impliqués. L'intégration de l'unité de production semble apporter une stabilité relative des bénéfices nets, bien que leur valeur soit réduite de 38% par rapport au premier scénario. L'effet de la densité des esturgeons et des facteurs climatiques sur les résultats financiers confirme la nécessité d'une approche proactive pour garantir la pérennité économique à long terme. L'intégration de ces paramètres dans la prise de décision stratégique apparaît essentielle pour anticiper les éventuelles variations et adapter les pratiques en conséquence.

Cependant, les bénéfices nets diminuent de 24%, tout comme la variation du solde de trésorerie qui baisse de 19%, principalement en raison d'une augmentation de 27% des achats de matières premières. Cette diminution est mise en avant principalement par un EBE chutant de 27% à 20% sur une période 10 ans. De manière similaire, au cours de la période d'étude, le seuil de rentabilité demeure toujours proche de 80 % du chiffre d'affaires, mettant en évidence la nécessité pour l'entreprise de maintenir une production constante. Cette dépendance vis-à-vis d'une production stable démontre l'importance d'une gestion rigoureuse et proactive des opérations afin de maintenir l'équilibre financier et la viabilité du projet. Les fluctuations dans la production pourraient avoir un impact significatif sur la viabilité et la capacité de l'entreprise à atteindre son seuil de rentabilité. Néanmoins, malgré l'augmentation des charges, les prix de vente du caviar n'ont pas été ajustés dans cette étude pour permettre une comparaison du projet de l'unité de production avec la production en étang. Une analyse comparative avec les prix pratiqués par d'autres entreprises de production de caviar (Tableau 10) révèle un prix moyen d'environ 2 080 €/kg pour les particuliers, soit 35 % de plus que les 1 300 €/kg de la Pisciculture Hennequart. Dans un marché en évolution constante, une augmentation des prix de vente du caviar, en vente directe, de 1% pourrait être envisagée pour compenser une augmentation identique des charges. Compte tenu que la demande de caviar est supérieure à l'offre, cette éventualité ne devrait pas susciter de complications majeures (Bronzi *et al.*, 2019).

Tableau 10. Prix du caviar au kilo pour les particuliers de 6 entreprises françaises de production acipenséricole

Entreprises	Prix du caviar au kilo
Caviar de Sologne	1 300 €
Caviar Perlita	2 050 €
Caviar de Neuvic	2 400 €
Caviar de Gensac	1 800 €
Maison Prunier	2 250 €
Caviar de France	1 930 €
Prix moyen (hors Caviar de Sologne)	2 086 €

N.B. : Tous les prix proviennent des boutiques en ligne correspondant au nom de marque.

IV.3 Objectif final : la production de caviar

IV.3.A Maximisation de la quantité de caviar

Un aspect non traité jusqu'à présent, mais crucial pour la production de caviar, est la question du sexage des esturgeons en fin de cycle. Cette étape joue un rôle déterminant dans la quantité totale de caviar produite et revêt une importance primordiale, puisque l'objectif direct du projet est l'obtention d'esturgeons en âge d'être sexés. Le sexage consiste en une présélection des femelles ayant le potentiel de produire du caviar ultérieurement. Il se base sur deux critères essentiels : les performances de croissance et la morphologie des individus. Lors de la manipulation de sexage, toutes les femelles ne répondant pas aux critères spécifiques ne sont pas conservées (Williot & Sabeau, 1999). Actuellement, en procédant au sexage des poissons à un poids de 2,5 kg par échographie, le rendement en femelles aptes pour une production de caviar future, choisies selon leur croissance, celle de leurs gonades et leur apparence externe (nombre de nageoires, absence de torsion de la nageoire caudale ...), atteint environ 30%. Cependant, il est envisageable d'augmenter ce rendement à 35%, ce qui aurait un léger impact positif sur la production, grâce à une meilleure croissance à ce stade. Après discussions avec les pisciculteurs rencontrés, les rendements en sexage se situent entre 30% et 45%, selon les critères définis par les entreprises.

Il est également essentiel de rappeler que l'objectif principal de la mise en place de cette unité de production est de consolider la production de caviar dans les années à venir. En accord avec le Plan d'Aquaculture d'Avenir 2021-2027, qui sous-tend les subventions du FEAMPA, la filière acipenséricole vise à consolider sa part de marché actuelle tout en maintenant une croissance annuelle minimale de 5% à 10%, en mettant alors l'accent sur la qualité du produit. Le projet s'insère donc parfaitement dans les critères d'octroi des subventions du FEAMPA qui vise à contrebalancer l'essor de la production de caviar en provenance de Chine (Bronzi *et al.*, 2019).

IV.3.B La qualité du produit final

Enfin, un des aspects qui n'a pas du tout été abordé au cours de ce mémoire est la qualité du produit fini : le caviar. Les recherches concernant la qualité des poissons provenant des RAS sont rares, et aucune ne les oppose à ceux issus de systèmes ouverts. L'accent est principalement mis sur la manière dont différentes conditions d'eau ou méthodes d'élevage (comme la densité, le type et le rationnement d'aliment) influencent la croissance et la qualité des poissons (Roque d'Orbcastel *et al.*, 2009). Une préoccupation majeure est l'émergence d'un goût inhabituel, l'« *off-flavor* », ou, plus généralement, de modification de la qualité du caviar (Auffret *et al.*, 2013).

Les caractéristiques entre ces deux méthodes d'élevage diffèrent principalement par la qualité de l'eau et les variations thermiques. Ces éléments pourraient justifier une croissance accélérée des poissons en RAS, entraînant par la suite des différences de qualité du produit final. À titre illustratif, un taux d'adiposité élevé chez les truites de RAS peut influencer le rendement (tant en termes de carcasse que de filet) et potentiellement altérer la teinte de la chair (Bugeon *et al.*, 2010). De plus, une vitesse de croissance accrue pourrait impacter la structure du muscle, en augmentant le nombre et le volume des fibres musculaires, ce qui pourrait induire des variations de consistance (Lefèvre & Bugeon, 2008).

Parmi les multiples variables qui distinguent ces deux méthodes d'élevage, les différences de profils thermiques de l'eau semblent cruciales. Afin d'évaluer l'effet lié à la qualité de l'eau, il serait essentiel de stabiliser la température dans le RAS pour reproduire le même environnement thermique que celui des étangs. Toutefois, selon Labbé *et al.* (2014), les différences de qualité du produit entre les deux environnements sont minimales et inconstantes. Par exemple, la constance du pH musculaire indique que le métabolisme musculaire des poissons et leurs réserves énergétiques ne sont pas altérés par la méthode d'élevage choisie. Cette recherche révèle que l'influence de la technique d'élevage sur la qualité de la chair est relativement négligeable, suggérant ainsi que le RAS est une alternative viable pour produire des poissons de qualité comparable à ceux élevés en système ouvert. En ce qui concerne le caviar, il est plausible qu'une année supplémentaire passée en RAS, avant la maturation des esturgeons femelles, ait un impact minimal, voire inexistant, sur la qualité du produit final. En effet, comme les œufs matures ne sont pas encore formés et que leur développement se poursuivra ultérieurement en étang, le produit ne devrait subir aucune altération.

Dans un dernier temps, on peut également supposer que la baisse de densité améliorera la production primaire et la biodiversité de l'étang (Broyer *et al.*, 1997). Les avantages écologiques de cette approche mériteraient d'être examinés de manière approfondie, en considérant les interactions entre la densité des esturgeons, la qualité de l'eau et la dynamique des écosystèmes aquatiques.

La Figure 20 a pour objectif de récapituler l'identification des forces, des faiblesses, des opportunités et des menaces qui entourent le projet.

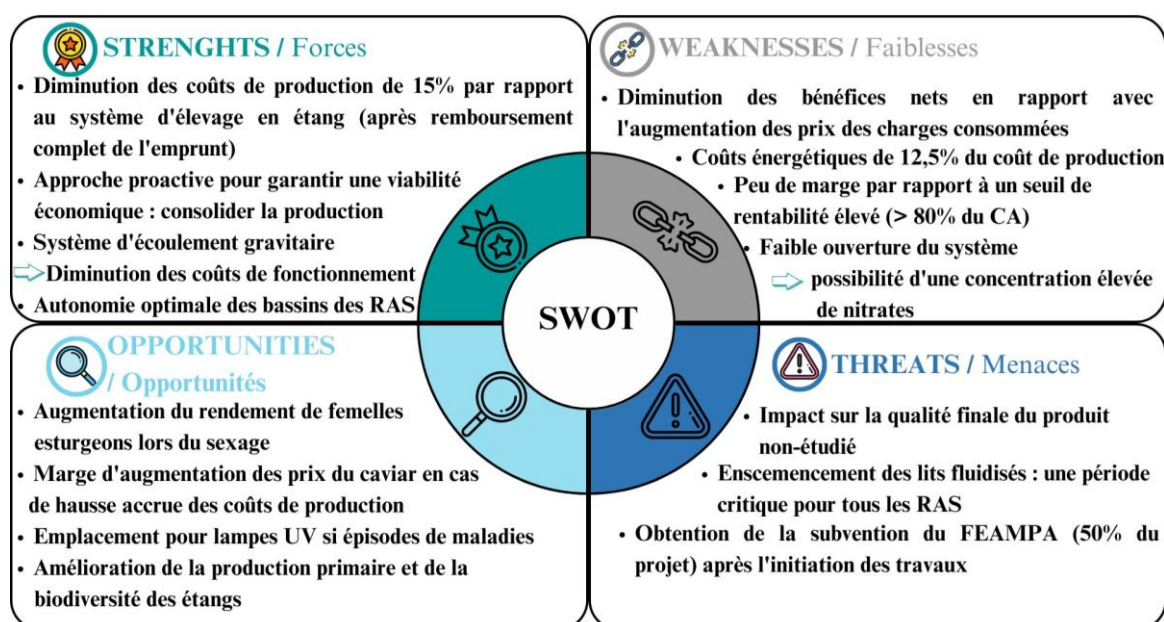


Figure 20. Matrice SWOT du projet de construction d'une unité de production en RAS



Conclusion

Le cœur de cette étude s'est centré sur l'évaluation technico-économique d'un système aquacole recirculé destiné à l'élevage des esturgeons, en se penchant sur le cas spécifique de la Pisciculture Hennequart. L'ambition de cette entreprise est claire : élaborer un plan proactif pour contrer les effets du réchauffement climatique sur l'élevage d'esturgeons en étangs.

La configuration du système a été étudiée pour répondre aux besoins biologiques de l'esturgeon. Cette démarche a englobé plusieurs étapes, notamment le dimensionnement des différents composants d'un système recirculé aquacole (filtration mécanique et biologique, compartiment d'aération et système de pompage) garantissant ainsi une qualité d'eau optimale. La minimisation des coûts énergétiques et l'autonomie de gestion du cheptel ont été les priorités de ce processus. L'introduction de panneaux photovoltaïques, loin d'être un simple geste écologique, s'inscrit dans une logique de pérennité économique, visant à réduire les coûts énergétiques sur le long terme. Toutefois, d'un point de vue technique, le système peut présenter le risque d'une accumulation de nitrates dans l'eau, en raison d'une faible ouverture du système (0,5 m³/kg d'aliment distribué).

Au-delà des aspects purement techniques, la viabilité financière s'est avérée être un pilier de notre réflexion. Notre analyse détaillée des coûts de production, en prenant en compte tant les dépenses initiales que les frais d'exploitation, a mis en lumière l'importance d'innovations durables pour équilibrer le budget, en cas de réchauffement climatique conduisant à une baisse de densité dans les étangs ou un abandon de ces derniers. Ainsi, la viabilité du projet dépend fortement de l'évolution des coûts opérationnels, qui tendent à augmenter. Une augmentation des prix de vente du caviar sera alors à considérer.

Bien que les systèmes recirculés aient fait l'objet de notre étude centrale, nous ne pouvons ignorer l'essor des cages en étangs dans l'univers aquacole. Cette technique, bien que différente, présente des avantages complémentaires et pourrait être envisagée comme une diversification future pour la Pisciculture Hennequart. La combinaison des deux systèmes pourrait non seulement renforcer la robustesse opérationnelle de l'établissement, mais aussi offrir une flexibilité face aux défis futurs du marché (Halwart *et al.*, 2009).



Bibliographie

- Antoniou, P., Hamilton, J., Koopman, B., Jain, R., Holloway, B., Lyberatos, G. & Svoronos, S.A., 1990. Effect of temperature and pH on the effective maximum growth rate of nitrifying bacteria. *Water Research*, 24 (1). pp. 97-101.
- Auffret, M., Yergeau, E., Pilote, A., Proulx, E., Proulx, D., W Greer, C., Vandenberg, G. & Villemur, R., 2013. Impact of water quality on the bacterial populations and off-flavour in recirculating aquaculture systems. *FEMS Microbiology Ecology*, 84 (2). pp. 235-247.
- Bablon, G., Bellamy, M.M., Bourbigot, F.B., Daniel, M., Doré, F., Erb, G., Gordon, B., Langlais, A., Laplanche, B., Legube, G., Martin, W.J., Masschelein, G., Pacey, D.A., Rechhow, D.A. & Ventresque, C., 1991. Fundamental aspects. In : Langlais, B. Reckhowand, D.A & Brink, D.R. (Eds.). *Ozone in water treatment : application and engineering*. American Water Works Association Research Foundation. Denver, Colorado. pp. 11-132.
- Balvay, G., 1980. Fonctionnement et contrôle du réseau trophique en étang. In : Billard, « La pisciculture en étang », INRA, Paris. pp. 47-79.
- Barrut, B., Blancheton, J.P., Champagne, J.Y. & Grasmick, A., 2012. Water delivery capacity of a vacuum airlift – Application to water recycling in aquaculture systems. *Aquaculture Engineering*, 48. pp. 31-39.
- Bercy Infos, 2023. L'impôt sur les sociétés, comment ça marche ? Bercy Infos Entreprises – Fiscalité. 4min.
- Bregnballe, J., 2022. A guide to recirculation aquaculture. An introduction to the new environmentally friendly and highly productive closed fish farming systems. Rome. FAO and Eurofish International Organisation. 120p.
- Bronzi, P., Chebanov, M., Michaels, J.T., Wei, Q., Rosenthal, H. & Gessner, J., 2019. Sturgeon meat and caviar production : Global update 2017. *Journal of Applied Ichthyology*, 35 (1). pp. 257-266.
- Broyer, J. & Curtet, L., 2011. The influence of fish farming intensification on taxonomic richness and biomass density of macrophyte-dwelling invertebrates in French fishponds. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, 400 (10). 12p.
- Broyer, J. & Curtet, L., 2012. Biodiversity and fishfarming intensification in french fishponds systems. *Hydrobiologia*, 694 (1). pp. 205-218.
- Bugeon, J., Lefèvre, F., Cardinal, M., Uyanik, A., Davenel, A. & Haffray, P., 2010. Flesh quality in large rainbow trout with high or low fillet yield. *Journal of Muscle Foods*, 21 (4). pp. 702-721.
- Broyer, J., Curtet, L., Maillier, S. & Bove, J.J., 1997. Incidences de la gestion des étangs piscicoles de la Dombes sur la flore aquatique remarquable. *Écologie*, 28. pp. 323-336.
- Butet, Y., 2015. Les installations de plomberie sanitaire : Règles de calcul. Sogi Communication. 96p.

- Chapman, P.E., Popham, J.D., Cgriffin, J., Michaelson, J., 1987. Differentiation of physical from chemical toxicity in solid waste fish bioassay. *Water, Air, and Soil Pollution*, 33. pp. 295-308.
- Chebanov, M., Rosenthal, H., Gessner, J., Van Anrooy, R., Doukakis, P., Pourkazemi, M., & Williot, P., 2011. Sturgeon hatchery practices and management for release guidelines. FAO fisheries and aquaculture technical paper 570 (I).
- Chen, S. & Malone, R.F., 1991. Suspended solids control in recirculating aquaculture systems. *Engineering Aspects of Intensive Aquaculture*. In : Proceedings from the Aquaculture Symposium, Cornell University, Ithaca, New York, 1991. pp. 170-186.
- Claisse, A. & Chouteau, L., 2023. Flash conjoncture France – En juin, l’inflation diminue sur un an et s’établit à +4,5%. Direction générale du Trésor. Ministère de l’économie, des finances et de la souveraineté industrielle et numérique.
- Colt, J. & Bouck, G., 1984. Design of packed columns for degassing. *Aquaculture Engineering*, 3. pp. 251-273.
- Colt, J.E., Orwicz, K., Bouck, G., 1991. Water quality considerations and criteria for high-density fish culture with supplemental oxygen. In : Colt, J., White R.J. (Eds.), *Fisheries BioEngineering Symposium 10*, American Fisheries Society, Bethesda, MD. pp. 372-385.
- Combrouze, P., 2004. Plans d’eau du limousin : eutrophisation 2003. *Aqua-Gestion-Limousin Aquaculture*. 4p.
- Delage, N., 2015. Etude expérimentale des effets des conditions environnementales (température, oxygène, polluants) sur la survie, le développement et le comportement des stades embryo-larvaires d’esturgeons européen, *Acipenser sturio*. *Ecotoxicologie*. Université de Bordeaux.
- Ebeling, J., Timmons, M.B. & Bisogni, J.J., 2006. Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia-nitrogen in aquaculture systems. *Aquaculture*, 257 (1-4). pp. 346-358.
- Emparanza, E.J.M., 2009. Problems affecting nitrification in commercial RAS with fixed bed biofilters for salmonids in Chile. *Aquacultural Engineering*, 41. pp. 91-96.
- EUMOFA, 2020. *Recirculating Aquaculture Systems*. 50p.
- Ersever, I., Ravindran, V., Tsai, H.H. & Pizbazari, M., 2014. Modeling and design of anaerobic fluidized bed reactor with recycling for denitrification of reverse osmosis concentrates. *Chemical Engineering Science*, 108. pp. 111-122.
- Geetha Preena, P., Rejish Kumar, V.J. & Bright Singh, I.S., 2021. Nitrification and denitrification in recirculation aquaculture systems : the processes and players. *Reviews in Aquaculture*, 13 (4). 23p.
- Hagopian, D.S. & Riley, J.G., 1998. A closer look at the bacteriology of nitrification. *Aquaculture Engineering*, 18. pp. 223-244.
- Halwart, M., Soto, D. & Arthur, J.R., 2009. *Aquaculture en cage - Études régionales et aperçu mondial*. FAO, Document technique sur les pêches (498).

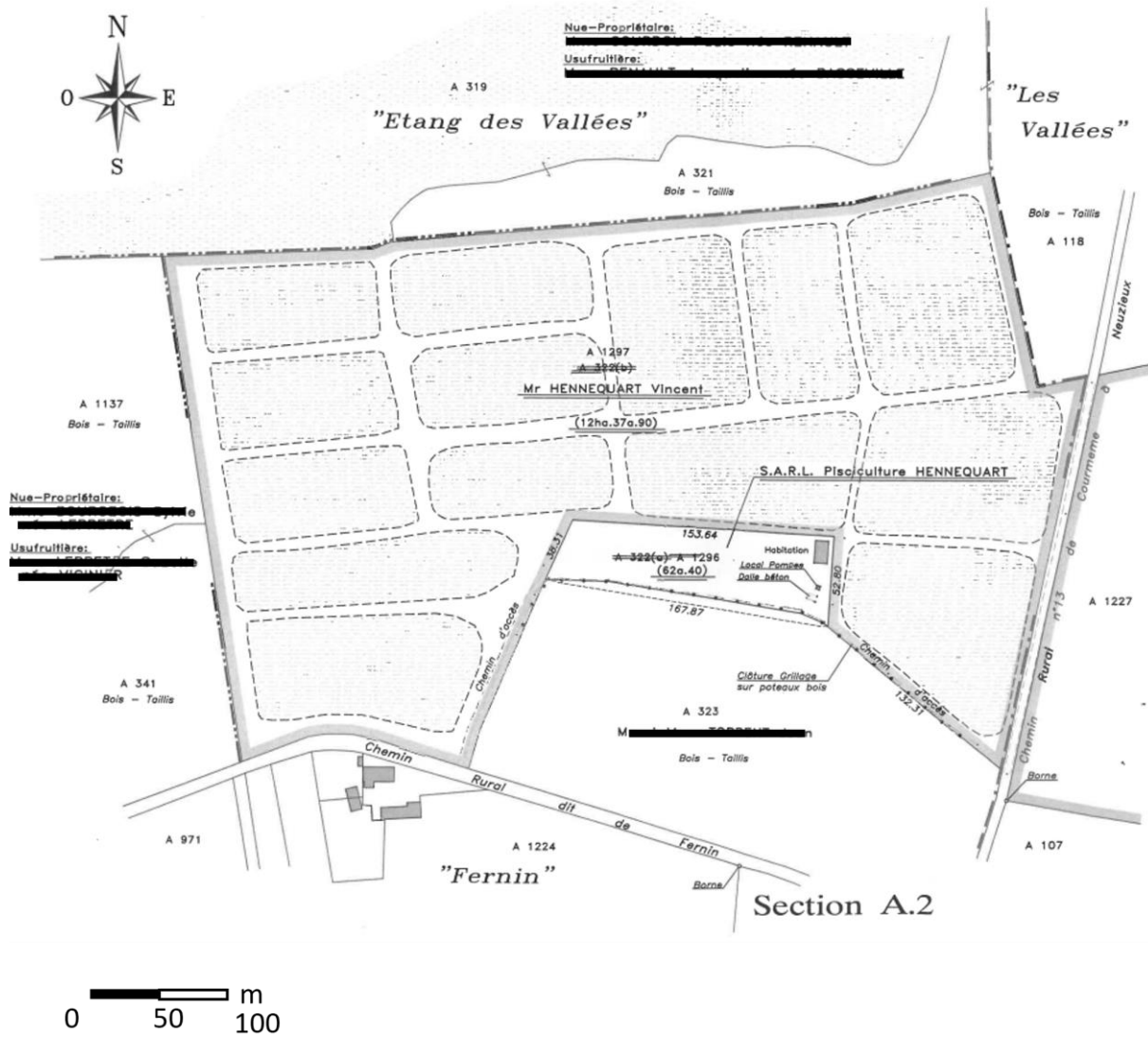
- Hennequart, J., 1999. La pisciculture en étangs. *Zones Humides Infos*, 26. pp. 11-12.
- Housset, B. & Dauphin, J.B., 2022. Création, régularisation, mise aux normes et vidanges des plans d'eau au titre de la loi sur l'eau. 42p. En collaboration avec la préfète de la région Centre-Val-de-Loire.
- Hughes, G.M., 1964. Fish Respiratory homeostatis. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 18. pp. 81-107.
- Huertas, M., Gisbert, E., Rodriguez, A., Cardona, L., Williot, P., Castello-Orvay, F., 2002. Acute exposure of Siberian sturgeon (*Acipenser baeri*, Brandt) yearlings to nitrite: median-lethal concentration (LC50) determination, haematological changes and nitrite accumulation in selected tissues. *Aquatic Toxicologie*, 57. pp. 257–266.
- IE&A, 2011. Documents d'objectifs de la Zone de Protection spéciale (ZPS) « étangs de Sologne », site Natura 2000 FR2410013. 286 p.
- Ifremer, 2009. Les systèmes en circuit recirculé : intérêts et cas d'utilisation. Fiche d'information Ifremer. 3p.
- Ifremer, 2010. La sursaturation des gaz dissous en aquaculture. Fiche Information Ifremer. 3p.
- Jatteau, P., 1997. Daily patens of ammonia nitrogen output of Siberian sturgeon *Acipenser baeri* (Brandt) of different body weights. *Aquaculture research*, 28. pp. 551-557.
- Jatteau, P., Petit, J. & Duret, J., 1993. Impact de l'aquaculture sur l'environnement prévention et contrôle. *Aquaculture et Environnement Nantes*. 18p.
- Jensen, F.B., 2003. Nitrite disrupts multiple physiological functions in aquatic animals. *Comparative Biochemistry Physiology Part A*, 135. pp. 9–24.
- Kappenman, K.M., Fraser, W.C., Toner, M., Dean, J., & Webb, M.A., 2009. Effect of temperature on growth, condition, and survival of juvenile shovelnose sturgeon. *Transactions of the American Fisheries Society*, 138 (4), pp. 927-937.
- Labbé, L., Lefèvre, F., Bugeon, J., Fostier, A., Jamin, M. & Gaumé, M., 2014. Conception d'un système innovant de production de truites en eau recirculée. *INRA Production Animale*, 27 (2). pp. 135-146
- Lavenant, M., De La Pomelie, C. & Paquote, P., 1995. Aquaculture en système clos : estimation des coûts de production pour l'élevage du bar et du turbot. 21p.
- Lawson, T.B, 2012. *Fundamentals of Aquacultural Engineering*. Springer New York, New York. 364 p.
- Lee, P.G., Lea, R.N., Dohmann, E., Prebilsky, W., Turk, P.E., Ying, H. & Whitson, J.L., 2000. Denitrification in aquaculture systems : an example of a fuzzy logic control problem. *Aquacultural Engineering*, 23 (1). pp. 37-59.
- Lefèvre, F. & Bugeon, J., 2008. Base biologique de la qualité du poisson. *Sciences des Aliments*, 28 (4-5). pp.365-377.
- Lekang, O.I., 2013. *Aquaculture Engineering*. John Wiley & Sons, Ltd. 432p.

- Mabilleau, M. & Pelsy, F., 2013. Les oiseaux aquatiques « patrimoniaux » nicheurs en Sologne (2000-2010). *Ornithos*, 20 (4). pp. 193-205.
- Marcel, J., 1989. La pisciculture en étangs. In : Barnabe, G., « Aquaculture » 2^{ème} Ed TEC DOC. pp. 615-652.
- Martens, D.A., 2005. Encyclopedia of Soils in the Environment. Earth Systems and Environmental Sciences, 1. pp. 378-382.
- Martins, C.I.M, Eding, E.H., Verdegem, M.C.J, Heinsbroek, L.T.N, Schneider, O., Blancheton, J.P., Roque d'Orbcastel, E. & Verreth, J.A.J, 2010. New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability. *Aquaculture Engineering*, 43 (3). pp. 83-93.
- Matsche, M.A., Markin, E., Donaldson, E., Hengst, A. & Lazur, A., 2012. Effect of chloride on nitrite-induced methaemoglobinemia in Atlantic sturgeon, *Acipenser oxyrinchus oxyrinchus* (Mitchill). *Journal of Fish Diseases*, 35. pp. 873–885.
- Miller, R.V., Jeffrey, W., Mitchell, D. & Elasri, M., 1999. Bacterial responses to ultraviolet light. *ASM News*, 65. pp. 535-541.
- Muir, J.F., 1982. Recirculated system in aquaculture, In : Muir, J.F. & Roberts, R.J. (Eds.). *Recent Advances in Aquaculture*, 1, Croom Helm and Westview Press, London. 453 p.
- Nonnotte, G., Maxime, V., Truchot, J.P., Williot, P. & Peyraud, C., 1993. Respiratory responses to progressive ambient hypoxia in the sturgeon, *Acipenser baerii*. *Respiration Physiology*, 91. pp. 71–82.
- Nonnote, G., Williot, P., Pichavant-Rafini, K., Rafini, M., Maxime, V. & Nonnotte, L., 2018. Oxygen Demand in Sturgeon Farming. In: Williot, P., Nonnotte, G., Chebanov, M. (eds) *The Siberian Sturgeon (Acipenser baerii, Brandt, 1869) Volume 2 - Farming*. Springer, Cham.
- Pagand, P., 1999. Traitement des effluents piscicoles marins par lagunage a haut rendement algal. Thèse de doctorat d'Hydrologie : Université de Montpellier I. 220p.
- PIAAM, 2012. Mise au point de techniques pour une croissance, une maturation et une vitellogenèse accélérées chez l'esturgeon à museau court (*Acipenser brevirostrum*) d'élevage. Rapport définitif.
- Région Centre-Val-de-Loire, 2023. Etat des lieux de la ressource en eau en région Centre-Val-de-Loire au 6 août 2023. Indicateur Calcaires Beauce Captif. 67p.
- Richier, S., Broyer, J., Valla, T., Jacquet, J., Laboulandine, S. & Hansen, E., 2016. Dans un contexte de déprise piscicole, la chasse peut-elle jouer un rôle complémentaire voire alternatif pour la préservation de l'écosystème étang ? Premier bilan des actions lancées en Sologne depuis 2013. *Faune Sauvage*, 313. pp. 38-43.
- Robin, J. & Vallod, D., 2001. L'off-flavor en aquaculture continentale – Synthèses bibliographie. *ISARA-OFIMER*, 33. pp. 2-56.
- Roque d'Orbcastel, E., 2008. Optimisation de deux systèmes de production piscicole : biotransformation des nutriments et gestion des rejets. *Sciences agronomiques et écosystèmes*. Toulouse, INPT.

- Roque d'Orbcastel, E., Blancheton, J.P. & Aubin, J., 2009. Towards environmentally sustainable aquaculture: Comparison between two trout farming systems using Life Cycle Assessment. *Aquacultural Engineering*, 40 (3). pp. 113-119.
- Sarazin, G., Oublier-Lloberas, C., Bertru, G., Brient, L., Vezie, C., Bernard, C., Coute, A., Hennion, M.C., Robillot, C. & Tandeau de Marsac, N., 2002. Première évaluation du risque toxique aux cyanobactéries d'eau douce en France : Le programme « EFFLOCYA ». *Revue des Sciences de l'Eau*, 15 (1). pp. 315-326.
- Semenov, A. & Semenova, K., 2022. Ultraviolet disinfection of water in recirculating aquaculture system : a caviar study at sturgeon caviar fish farm. *Acta agriculturae Slovenica*, 118 (3). 4p.
- Sheltz, J., 1986. Conception des installations d'élevage. In : *Techniques d'élevage intensif et d'alimentation des poissons et de crustacés*. Vol II. FAO. Italie. 29p.
- Timmons, M.B., 2000. Aquacultural engineering-experiences with recirculating aquaculture system technology, Part 1. *Aquacultural Magazine*, 26 (1). pp. 52-56.
- Timmons, M.B. & Vinci, B.J., 2022. *The Yellow Book of Recirculating Aquaculture*. 5th Edition. Ithaca Publishing Company LLC. 809p.
- Tocqueville, A., Gaumé, M., Foucard, P., Rollet, P.E. & Vidal-Giraud, R., 2019. Etude sur la pisciculture en circuit « recirculé » - Rapport Final 2019. Possibilités techniques de développement et de diversification, évaluation de la rentabilité et de l'acceptabilité des consommateurs. FranceAgriMer, Pêche et Aquaculture – Les études. 96p.
- Tshering, P., Pemo, Gyelpo, P., Thsering, S. & Wangchuk, K., 2022. Growth performance and feed conversion efficiency of siberian sturgeon (*Acipenser baeri*) at mid-elevational zone. *Bhutan Journal of Animal Science (BJAS)*, 6 (1). pp. 92-96.
- Williot, P. & Sabeau, L., 1999. Elevage d'esturgeons et production de caviar : exemple de l'esturgeon sibérien (*Acipenser baerii*) en France. *Académie de l'Agriculture de France*, 85 (8). pp. 71-83.
- Xue, M., Yun, B., Wang, J., Sheng, H., Zheng, Y., Wu, X., Qin, Y. & Li, P., 2012. Performance, body compositions, input and output of nitrogen and phosphorus in Siberian sturgeon, *Acipenser baerii* (Brandt), as affected by dietary animal protein blend replacing fishmeal and protein levels. *Aquaculture Nutrition*, 18 (5). 9p.

Annexes

Annexe 1. Plan du site de Fernin de la pisciculture Hennequart



Annexe 2. Synthèse de l'analyse des paramètres physico-chimique et microbiologiques de l'eau de forage, réalisé le 06/10/2022 par CARSO – Laboratoire Santé Environnement Hygiène de Lyon

Paramètres analytiques	Résultats	Méthodes	Limites de qualité
Analyses physiques			
Température de l'eau	14°C	Sonde	25°C
pH	7,7	Electrochimie	-
Conductivité électrique brute à 25°C	330 µS/cm	Potentiométrie	-
Carbone organique total	< 0,2 mg/L	IR	10 mg/L
Fluorures	0,38 mg/L	Chromatographie ionique	-
Cyanures totaux	< 10 µg/L	Flux continu (CFA)	50 µg/L
Analyses chimiques			
Cations			
Calcium dissous	41,2 mg/L	ICP/AES après filtration	-
Magnésium dissous	8,2 mg/L	ICP/AES après filtration	-
Sodium dissous	11,9 mg/L	ICP/AES après filtration	200 mg/L
Potassium dissous	3,9 mg/L	ICP/AES après filtration	-
Ammonium	< 0,05 mg/L	Spectrophotométrie	4 mg/L
Anions			
Chlorures	17 mg/L	Chromatographie ionique	200 mg/L
Sulfates	6,1 mg/L	Chromatographie ionique	250 mg/L
Nitrates	< 0,5 mg/L	Flux continu (FCA)	100 mg/L
Nitrites	< 0,02 mg/L	Spectrophotométrie	-
Carbonates	0 mg/L	Potentiométrie	-
Bicarbonates	179,0 mg/L	Potentiométrie	-
Métaux			
Aluminium	< 10 µg/L	ICP/MS	-
Arsenic	6 µg/L	ICP/MS	100 µg/L
Chrome	< 5 µg/L	ICP/MS	50 µg/L
Fer	< 10 µg/L	ICP/MS	-
Manganèse	10 µg/L	ICP/MS	-
Nickel	< 5 µg/L	ICP/MS	-
Plomb	< 2 µg/L	ICP/MS	50 µg/L
Cuivre	< 0,010 µg/L	ICP/MS	-
Mercuré	< 0,5 µg/L	Fluorescence	-
Analyses microbiologiques			
Micro-organismes aérobies à 36°C	< 1 UFC/mL	Incorporation	-
Micro-organismes aérobies à 22°C	< 1 UFC/mL	Incorporation	-
Bactéries coliformes	< 1 UFC/100mL	Filtration	20 000
Escherichia coli	< 1 UFC/100mL	Filtration	10 000
Entérocoques	< 1 UFC/100mL	Filtration	-
Pseudomonas aeruginosa	< 1 UFC/250mL	Filtration	-

Annexe 3. Profil nutritionnel indicatif de l'aliment STURGEON GROWER® de Le Goouessant Aquaculture



GAMME ESTURGEON



Aliments extrudés pour l'élevage d'Esturgeons

- Gamme **très protéique** et **peu lipidique** pour **limiter les dépôts adipeux dans les gonades**
- **Supplémentés** en **vitamines (C et E)**, **minéraux** et **hépatoprotecteurs** pour **renforcer la santé intestinale**
- **Aliment caviar** enrichi en **DHA et omégas 3**

* Sans PAT: Protéines Animaux Terrestres

	STURGEON GROWER	STURGEON EXTRA	STURGEON CAVIAR
Réf. Commerciale	1 / 2 / 3 / 4 / 5 / 7 / 9 / 11 / 13	2 / 3 / 4 / 5 / 7 / 9	5 / 7 / 9 / 11 / 13
Diamètre (mm)	1,7 / 2,5 / 3,2 / 4 / 5,5 / 7,5 / 9,5 / 11,5 / 13,5	2,5 / 3,2 / 4 / 5,5 / 7,5 / 9,5	5,5 / 7,5 / 9,5 / 11,5 / 13,5
Présentation	Granulé	Granulé	Granulé
Poids vifs (conseillé)	5 à 200 g	200 à 3 000 g	3 000 à > 5 000 g

CONDITIONNEMENT

Sac de 25 kg, big-bag ou vrac

Stocker l'aliment dans un endroit propre, frais et sec.

FLOTTAISON

Aliment coulant (x)

PROFIL NUTRITIONNEL INDICATIF

	STURGEON GROWER	STURGEON EXTRA	STURGEON CAVIAR
Protéine (%)	47	45	50
Lipides (%)	13	17	11
Energie Brute (MJ/Kg)	20	20,9	20,2
Energie Digestible (MJ/Kg)	16,8	18,2	17,6
Amidon (%)	11	12,7	16
Cellulose (%)	2,5	2	1,5
Cendres (%)	11	9,7	8,7
Phosphore (%)	1,5	1,2	1,3

VITAMINES INCORPORÉES

Vit. A (UI/Kg)	12 000	17 200
Vit. D3 (UI/Kg)	2 100	3 000
Vit. E (mg/Kg)	340	600
Vit. C (mg/Kg)	525	1 000

DURABILITÉ

Chez Le Goouessant nous pensons que l'aquaculture est durable si elle allie performance, qualité et préservation des ressources marines, c'est pourquoi nous sommes certifiés Global GAP.



Source : Le Goouessant Aquaculture, 2021. Gamme Esturgeons – Aliments extrudés pour l'élevage d'Esturgeons. https://aqua.legouessant.com/wp-content/uploads/ESTURGEON_FR- TR_08-2021-1.pdf, consulté le 27/03/23.

Annexe 4. Données techniques d'un filtre à tambour 63 µm par arrivée par tuyau (série 120, 6 plaques) de Faivre Industrie Environnement

❖ **Spécifications :**

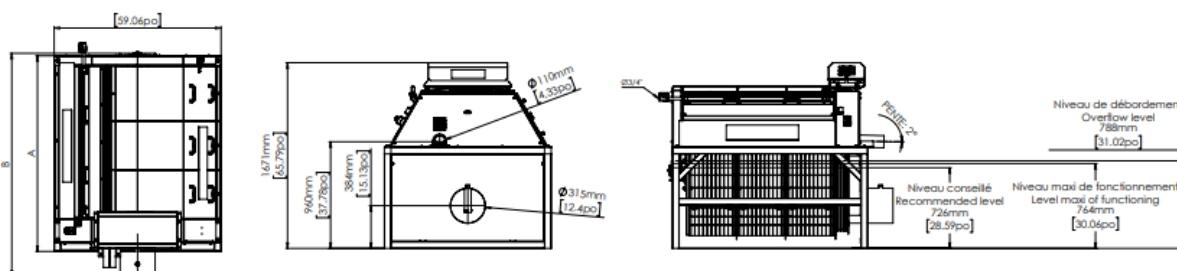
Modèles	Ø Entrée-sortie in standard	Puissance moteur	Filter surface	Nombre de plaques	Diam. sortie goulotte	Nombre de buses
3 - 120	Ø 315 mm (62l/s max.) Ø 350 mm (79l/s max.) Ø 400 mm (105l/s max.)	370 W	1,29 m ²	3	Ø 110 mm	5
6 - 120			2,58 m ²	6		10
9 - 120			3,87 m ²	9		15
12 - 120			5,16 m ²	12		20

❖ **Plan technique :**

● Arrivée par tuyau



	3-120		6-120		9-120		12-120	
Poids net	372 kg 820 lbs		457 kg 1008 lbs		534 kg 1177 lbs		621 kg 1369 lbs	
Unité	cm	in	cm	in	cm	in	cm	in
Largeur	150	59	150	59	150	59	150	59
Hauteur	167	64	167	64	167	64	167	64
Longueur (A)	87	34	131	51	175	69	219	86
Longueur (B)	113	44	157	62	201	79	245	96



Source : Faivre Industrie Environnement, 2023. Filtre à tambour – Série 120. <https://www.faire-aqua.fr/wp-content/uploads/2023/03/Filtre-Rotoclean-Serie-120-FR.pdf>, consulté le 05/06/23.

Annexe 5. Données techniques d'une soufflante HPE Séries HSC0415-1MT301, vendue par la Coopération Française de l'Aquaculture (COFA)

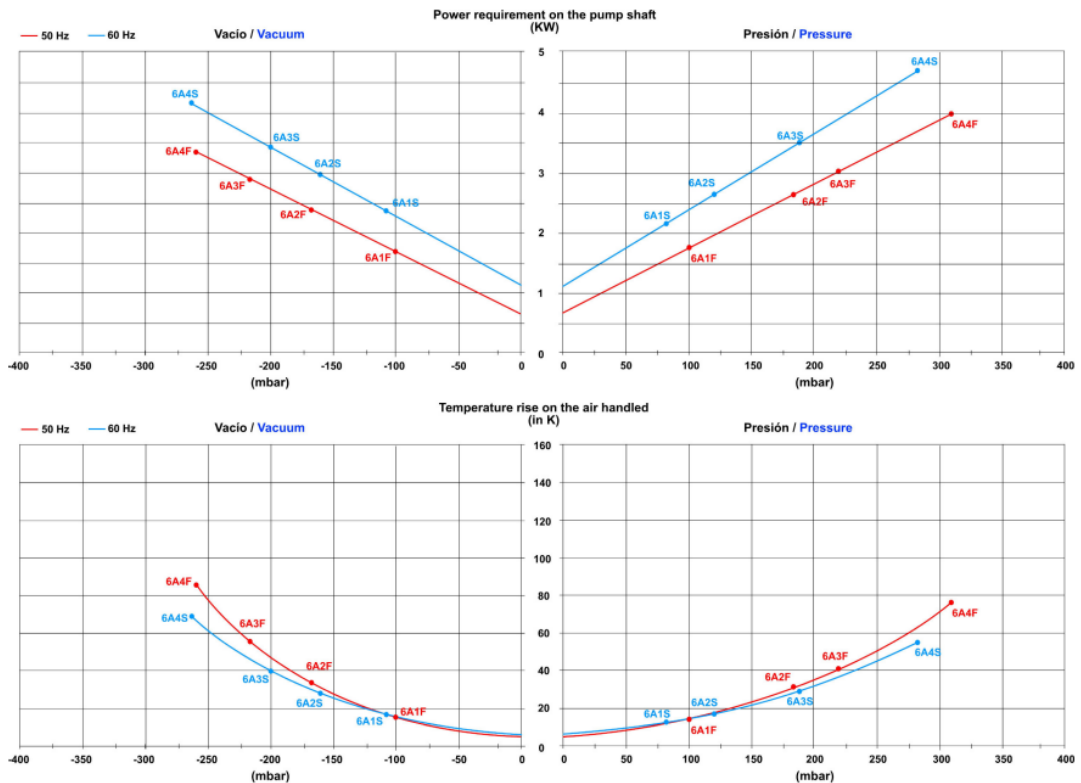
❖ Spécifications :

Modelo Model	Frec. Freq. (Hz)	Caudal máx. Max. Airflow (m ³ /h)	Vacío máx. Max. Vacuum (mbar)	Presión máx. Max. Pressure (mbar)	Potencia Output (Kw)	Tensión Voltage (V) ¹⁾	Consumo Current (A)	Nivel sonoro Noise Level (dB(A)) ²⁾	Curva Curve (N ^º)	Peso Weight (Kg)
HSC0415-1MT161-6	50	420	-100	100	1.6	Δ 200-240 / Y 345-415	Δ 8.5 / Y 4.9	70	6A1F	29
	60	500	-110	80	2.05	Δ 220-275 / Y 380-480	Δ 8.8 / Y 5.1	73	6A1S	
HSC0415-1MT221-6	50	420	-170	170	2.2	Δ 200-240 / Y 345-415	Δ 9,7 / Y 5.6	70	6A2F	32
	60	500	-160	120	2.55	Δ 220-275 / Y 380-480	Δ 10.3 / Y 6.0	73	6A2S	
HSC0415-1MT301-6	50	420	-220	220	3,0	Δ 200-240 / Y 345-415	Δ 12.5 / Y 7.2	70	6A3F	37
	60	500	-200	190	3.45	Δ 220-275 / Y 380-480	Δ 12.6 / Y 7.3	73	6A3S	
HSC0415-1MT401-7	50	420	-260	310	4,0	Δ 345-415 / Y 600-720	Δ 9.0 / Y 5.2	70	6A4F	43
	60	500	-260	280	4.6	Δ 380-480 / Y 660-720	Δ 9.0 / Y 5.2	73	6A4S	

¹⁾ Disponibles otros voltajes bajo pedido/ *Other voltages are available on request.*

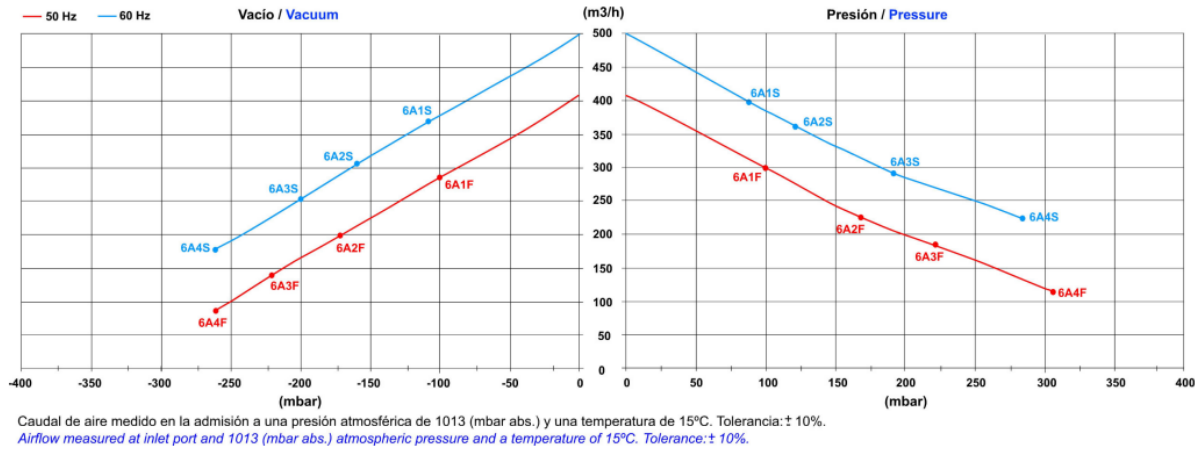
²⁾ Nivel sonoro medido de acuerdo a la norma EN ISO 3744 a 1 m de distancia con mangueras conectadas / *Noise level measurement according to EN ISO 3744 at 1 m distance with hoses connected.*

❖ Courbes de puissance et de température :



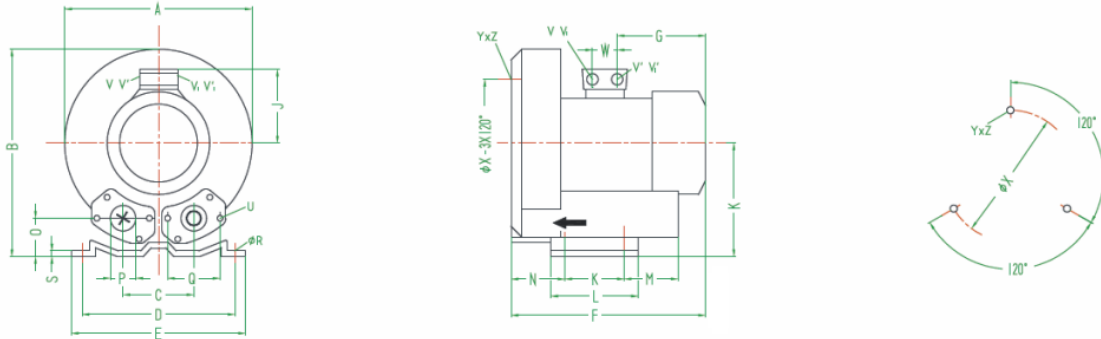
Curvas de rendimiento basadas en aire a una temperatura de 15 °C (288 K) y presión atmosférica de 1013 mbar con una tolerancia de +/- 10 %.
The performance curves are based on air at a temperature of 15 °C (288 K) and an atmospheric pressure of 1013 mbar with a tolerance of +/- 10 %.

❖ Capacité d'aspiration :



❖ Dimensions :

Dimensiones / Dimensions



Modelo / Model	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	O	P	Q	ØR
HSC0415-1MT161-6	382	384	125	290	325	387	191	197	128	140	180	84	109	54	2"	83	15
HSC0415-1MT221-6	382	384	125	290	325	387	191	197	128	140	180	84	109	54	2"	83	15
HSC0415-1MT301-6	382	384	125	290	325	419	189	197	135	140	180	84	109	54	2"	83	15
HSC0415-1MT401-7	382	384	125	290	325	432	209	197	148	140	180	84	109	54	2"	83	15
Modelo / Model	S	U	V	V'	V1	V1'	Y x Z	X	ØX	W							
HSC0415-1MT161-6	4.5	M8 x 17	-	-	M25 x 1.5	M16 x 1.5	M10 x 20	0° / 120° / 240°	240	29							
HSC0415-1MT221-6	4.5	M8 x 17	-	-	M25 x 1.5	M16 x 1.5	M10 x 20	0° / 120° / 240°	240	29							
HSC0415-1MT301-6	4.5	M8 x 17	M32 x 1.5	M32 x 1.5	M32 x 1.5	M32 x 1.5	M10 x 20	0° / 120° / 240°	240	42							
HSC0415-1MT401-7	4.5	M8 x 17	M32 x 1.5	M32 x 1.5	M32 x 1.5	M32 x 1.5	M10 x 20	0° / 120° / 240°	240	42							

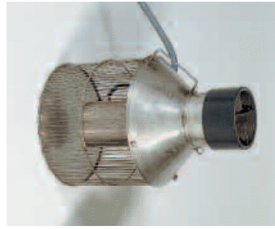
Dimensiones en mm. / Dimensions in mm.

Source : HPE Technology, 2010. Turbina de canal lateral de simple etapa - Series HSC0415-1M. <https://www.cofa.fr/fr/produit/soufflante-hpe-hsc0415-1mt301-6-420-m3-h-220-mbar-3-kw-tri-1643/>, consulté le 05/06/23.

Annexe 6. Spécifications techniques de la pompe basse-pression type 04 de la marque LINN, vendue par Aqualor

Pipe Pump L3 – Efficient pipe pumps for low water pressure-high volume applications.

**Additional new type!
Pressure head up to 5 m!**



Type 01 – 10

Pipe pumps are the ideal means for moving water at low pressure heads economically. They can be used for circulating water, or pumping-out ponds or tanks quickly! Pipe pumps are designed to move large volumes of water for the minimum use of electricity, and are the most efficient and economic way to pump water at low pressure heads.

The pumps are protected against ingress of fish or debris by a robust screen, which also serves as a stand.

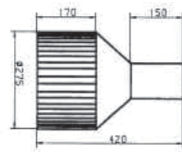


Type 02 + 01

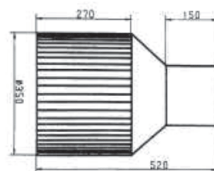
All pumps are made to the usual high Linn standard with stainless steel screen and base.

The robust submersible motor is permanently submerged, ensuring trouble-free cooling. The drive is direct – long shafts, bearings and seals are not required.

The pipe pump can either be hung from the loops provided or positioned easily on the water bed. Installation in the pond or well is easy.



Type 01 + 02
Screen distance 95 mm

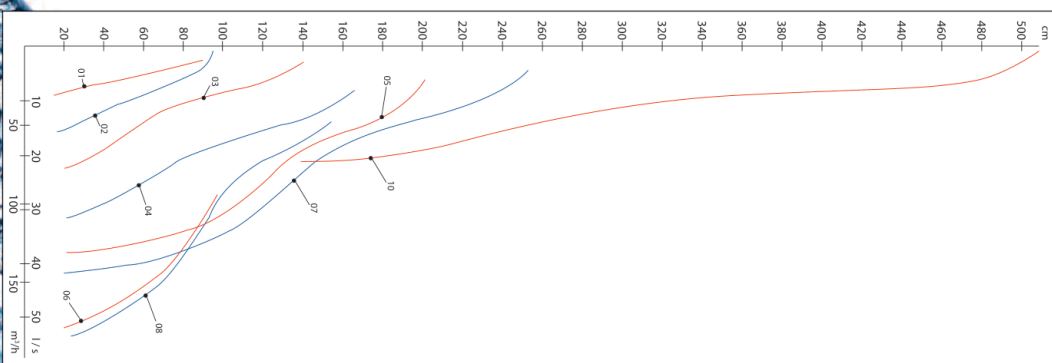


Type 03 - 08
Screen distance 95 mm

Technical												
Type		01*	02	03	04	05	06	07	08	10		
Motor rating	kW	0.10	0.18	0.40	0.55	0.75	0.75	1.1	1.1	1.1		
Power take-up	W	160	280	ca. 450	ca. 700	ca. 1050	ca. 1050	ca. 1400	ca. 1400	ca. 1400		
Voltage	V	230	230	230/400		230/400		400		2800		
Motor	l/min	2900										
Water del (max)	m ³ /h	29	56	80	100	135	170	150	190	70		
Pressure head	cm	0-75	0-90	0-130	0-150	0-200	0-100	0-260	0-140	140-500		
Pipe Ø	DN	70	100	125	150	150	150	150	150	100		
Weight	kg	12	15								25	

*Type 01 is not ideal for use in water with suspended silt!

- ADVANTAGES:**
- minimal energy consumption
 - quick and flexible to use
 - suitable for many applications
 - lightweight and robust



Source : LINN, 2008. Efficient pipe pumps for low water pressure-high volume applications. <http://pro.aqualor.com/pro/pompes/pompes-a-helice-basse-pression/docs/courbes-pompes.pdf>, consulté le 05/06/23.

Annexe 7. Spécifications techniques d'un aérateur de surface Flobull 1 CV de Faivre Industrie Environnement

❖ Spécifications :

FLOBULL	0,25CV	0,5CV	1CV	2CV	
Puissance utile (kw)	0,18	0,37	0,75	1,5	
Puissance absorbée (kw)	0,32	0,57	1,05	1,95	
Débit d'eau traitée (m3/h)	75	135	225	380	
Production d'oxygène (O2/h)	0,42	0,64	1,12	2,20	
Hauteur de la gerbe (m)	0,65	0,80	1,10	1,40	
Diamètre de la gerbe (m)	2,5	3	3,5	4,5	
Dimensions (m)	0,6x0,6	0,7x0,7	0,9x0,9	0,9x0,9	
Hauteur (m)	0,55	0,68	0,80	0,80	
Poids approx (kg)	16	28	39	42	
Réf.*	220v 1 phase / 50 hz	APF0021	APF0051	APF0101	APF0201
	380-415v 3 ph. / 50 hz	APF0023	APF0053	APF0103	APF0203

* Autres voltages disponibles sur demande.

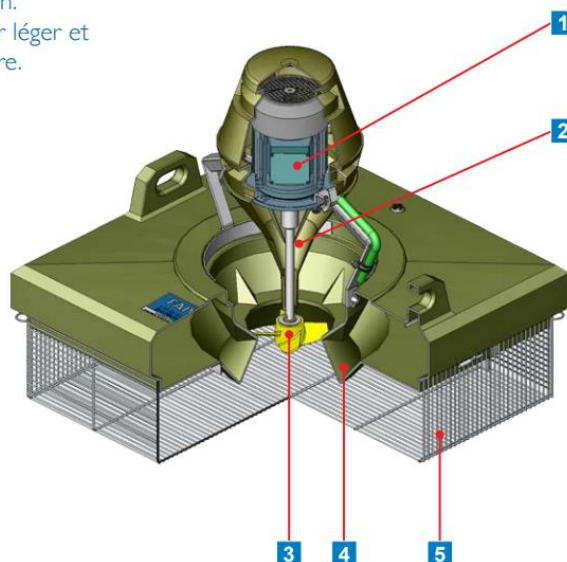
❖ Caractéristiques techniques :

Aérateurs de surface flottants pour élevage intensif en bassin. Grâce à ces 2 poignées incorporées au flotteur, cet aérateur léger et maniable convient parfaitement pour un usage en pisciculture.

CARACTÉRISTIQUES :

- 1 • Moteur IP 55 1500 tr/mn sous capot de protection.
- 2 • Cône diffuseur mélangeur d'air en polyéthylène.
- 3 • Turbine à 4 pales.
- 4 • Flotteur polyéthylène rotomoulé haute densité traité anti-U.V.
- 5 • Grille de filtration écartement 11mm de grande capacité en INOX AISI 304.

Pour utilisation eau de mer : inox AISI 316 L.



Source : Faivre Industrie Environnement, 2020. Aérateurs Flobull. <https://www.faivre-environnement.fr/wp-content/uploads/2020/09/plaquette-flobull.pdf>, consulté le 05/06/23.

Annexe 9. Durées et valeurs d'amortissement économique des immobilisations nécessaires à l'unité de production sur une période de 10 ans

Bâtiment	Quantité	Prix unitaire (HT)	Valeur (HT)	Durée d'amortissement	Taux d'amortissement linéaire	Amortissement économique
Hangar – charpente	2	41 684,00 €	83 368,00 €	20	5%	4 168,40 €
Bardage	2	173 980,00 €	347 960,00 €	20	5%	17 398,00 €
Panneaux photovoltaïques	N/A	N/A	73 586,00 €	30	3%	2 452,87 €
Bassin d'élevage et de filtration			402 778,20 €			
Coffrage	4	7 500,00 €	30 000,00 €	15	7%	2 000,00 €
Bac de filtration béton	4	7 500,00 €	30 000,00 €	15	7%	2 000,00 €
Bac d'élevage	12	28 564,85 €	342 778,20 €	20	5%	17 138,91 €
Filtration mécanique			97 064,00 €			
Filtre à tambour	4	24 266,00 €	97 064,00 €	10	10%	9 706,40 €
Filtre biologique			17 380,80 €			
Média de biofiltration	58	190,00 €	11 020,00 €	15	7%	734,67 €
Soufflantes	4	1 590,20 €	6 360,80 €	5	20%	1 272,16 €
Mouvement de l'eau			15 300,00 €			
Pompe	12	1 275,00 €	15 300,00 €	3	33%	5 100,00 €
Aération/Oxygénation			9 995,60 €			
Aérateurs	4	2 090,90 €	8 363,60 €	5	20%	1 672,72 €
Diffuseur O2 céramique	12	136,00 €	1 632,00 €	5	20%	326,40 €
Autres			20 000,00 €			
Tuyaux PVC	N/A	N/A	20 000,00 €	5	20%	4 000,00 €
Pompe à chaleur	1	1 620,00 €	1 620,00 €	10	10%	162,00 €
LED	12	499,00 €	5 988,00 €	7	14%	855,43 €
Grilles	N/A	N/A	8 000,00 €	15	7%	533,33 €
TOTAL BESOINS (HT)			1 057 437,00 €			

Annexe 10. Amortissements d'emprunt et quote-parts de subvention sur une période de 10 ans dans le cadre du projet d'une nouvelle unité de production

Année	Année N	Année N+1	Année N+2	Année N+3	Année N+4	Année N+5	Année N+6	Année N+7	Année N+8	Année N+9	TOTAL
Capital restant dû	370 102,95 €	333 092,66 €	296 082,36 €	259 072,07 €	222 061,77 €	185 051,48 €	148 041,18 €	111 030,89 €	74 020,59 €	37 010,30 €	370 102,95 €
Amortissement	37 010,30 €	37 010,30 €	37 010,30 €	37 010,30 €	37 010,30 €	37 010,30 €	37 010,30 €	37 010,30 €	37 010,30 €	37 010,30 €	370 102,95 €
Intérêt 4%	14 804,12 €	13 323,71 €	11 843,29 €	10 362,88 €	8 882,47 €	7 402,06 €	5 921,65 €	4 441,24 €	2 960,82 €	1 480,41 €	81 422,65 €
Annuités	51 814,41 €	50 334,00 €	48 853,59 €	47 373,18 €	45 892,77 €	44 412,35 €	42 931,94 €	41 451,53 €	39 971,12 €	38 490,71 €	451 525,60 €

Amortissements et annuités d'emprunt à 4% nécessaire à l'acquisition d'unité de production sur une période de 10 ans

Année	Année N	Année N+1	Année N+2	Année N+3	Année N+4	Année N+5	Année N+6	Année N+7	Année N+8	Année N+9
Quote-part de subvention	34 760,64 €	34 760,64 €	34 760,64 €	32 210,64 €	32 210,64 €	28 575,00 €	28 575,00 €	28 147,29 €	28 147,29 €	28 147,29 €

Quote-parts de subvention du FEAMP à hauteur de 50% des amortissements des immobilisations nécessaire à l'unité de production sur une période de 10 ans

Annexe 11. Compte de résultat prévisionnel sur 10 ans dans le cadre du projet d'une nouvelle unité de production en système recirculé

	Année N	Année N+1	Année N+2	Année N+3	Année N+4	Année N+5	Année N+6	Année N+7	Année N+8	Année N+9
Ventes des marchandises (pisciculture)	4 000,00 €	4 000,00 €	4 000,00 €	4 000,00 €	4 000,00 €	4 000,00 €	4 000,00 €	4 000,00 €	4 000,00 €	4 000,00 €
Production vendue (pisciculture)	2 154 250,00 €	2 168 500,00 €	2 182 750,00 €	2 197 000,00 €	2 211 250,00 €	2 225 500,00 €	2 239 750,00 €	2 254 000,00 €	2 661 212,50 €	2 677 825,00 €
Chiffre d'affaires	2 158 250,00 €	2 172 500,00 €	2 186 750,00 €	2 201 000,00 €	2 215 250,00 €	2 229 500,00 €	2 243 750,00 €	2 258 000,00 €	2 272 250,00 €	2 286 500,00 €
Production stockée	3 500,00 €	3 500,00 €	3 500,00 €	3 500,00 €	3 500,00 €	3 500,00 €	3 500,00 €	3 500,00 €	3 500,00 €	3 500,00 €
Autres produits	4 000,00 €	4 000,00 €	4 000,00 €	4 000,00 €	4 000,00 €	4 000,00 €	4 000,00 €	4 000,00 €	4 000,00 €	4 000,00 €
Total des produits d'exploitation	2 165 750,00 €	2 180 000,00 €	2 194 250,00 €	2 208 500,00 €	2 222 750,00 €	2 237 000,00 €	2 251 250,00 €	2 265 500,00 €	2 279 750,00 €	2 294 000,00 €
Achats de marchandises	10 000,00 €	10 000,00 €	10 000,00 €	10 000,00 €	10 000,00 €	10 000,00 €	10 000,00 €	10 000,00 €	10 000,00 €	10 000,00 €
Achats de matières premières	416 034,00 €	429 785,70 €	444 224,99 €	459 386,23 €	475 305,55 €	492 020,82 €	509 571,86 €	528 000,46 €	547 350,48 €	567 668,00 €
Autres achats et charges externes	655 691,00 €	660 370,60 €	665 284,18 €	670 443,44 €	675 860,66 €	681 548,74 €	687 521,23 €	693 792,34 €	700 377,01 €	707 290,91 €
Impôts, taxes et versements assimilés	10 906,00 €	10 906,00 €	10 906,00 €	10 906,00 €	10 906,00 €	10 906,00 €	10 906,00 €	10 906,00 €	10 906,00 €	10 906,00 €
Salaires et traitements	358 569,00 €	362 154,69 €	365 776,24 €	369 434,00 €	373 128,34 €	376 859,62 €	380 628,22 €	384 434,50 €	388 278,85 €	392 161,63 €
Charges sociales	131 630,00 €	133 946,30 €	135 275,76 €	136 618,52 €	137 974,71 €	139 344,45 €	140 727,90 €	141 125,18 €	142 536,43 €	143 961,79 €
Dotations aux amortissements et dépréciation	189 521,29 €	189 521,29 €	189 521,29 €	184 421,29 €	184 421,29 €	177 150,01 €	177 150,01 €	176 294,58 €	176 294,58 €	176 294,58 €
Total des charges d'exploitation	1 772 351,29 €	1 795 684,58 €	1 819 988,45 €	1 840 209,48 €	1 866 596,54 €	1 886 829,65 €	1 915 505,22 €	1 944 553,05 €	1 975 743,34 €	2 008 282,92 €
Résultat d'exploitation	393 398,71 €	384 315,42 €	374 261,55 €	368 290,52 €	356 153,46 €	350 170,35 €	335 744,78 €	320 946,95 €	304 006,66 €	285 717,08 €
Charges financières	14 804,12 €	13 323,71 €	11 843,29 €	10 362,88 €	8 882,47 €	7 402,06 €	5 921,65 €	4 441,24 €	2 960,82 €	1 480,41 €
Résultat courant avant impôts	378 594,60 €	370 991,72 €	362 418,26 €	357 927,64 €	347 270,99 €	342 768,29 €	329 823,14 €	316 505,71 €	301 045,84 €	284 236,67 €
Produits exceptionnels	34 760,64 €	34 760,64 €	34 760,64 €	33 210,64 €	33 210,64 €	28 575,00 €	28 575,00 €	28 147,29 €	28 147,29 €	28 147,29 €
Impôts sur les bénéfices	103 338,81 €	101 438,09 €	99 294,72 €	97 534,57 €	94 870,41 €	92 835,82 €	89 599,53 €	86 163,25 €	82 298,28 €	78 095,99 €
Bénéfices ou pertes	310 016,43 €	304 314,27 €	297 884,17 €	292 603,71 €	284 611,23 €	278 507,47 €	268 798,60 €	258 489,75 €	246 894,84 €	234 287,97 €

Annexe 12. Budget de trésorerie du projet d'une nouvelle unité de production sur une période de 10 ans

	Année N	Année N+1	Année N+2	Année N+3	Année N+4	Année N+5	Année N+6	Année N+7	Année N+8	Année N+9
Encaissements										
Fonds propres	158 615,55 €									
Emprunts	370 102,95 €									
Subventions	528 718,50 €									
Production vendue (pisciculture)	2 158 250,00 €	2 172 500,00 €	2 186 750,00 €	2 201 000,00 €	2 215 250,00 €	2 229 500,00 €	2 243 750,00 €	2 258 000,00 €	2 272 250,00 €	2 286 500,00 €
Autres produits d'exploitation	4 000,00 €	4 000,00 €	4 000,00 €	4 000,00 €	4 000,00 €	4 000,00 €	4 000,00 €	4 000,00 €	4 000,00 €	4 000,00 €
Total des encaissements	3 219 687,00 €	2 176 500,00 €	2 190 750,00 €	2 205 000,00 €	2 219 250,00 €	2 233 500,00 €	2 247 750,00 €	2 262 000,00 €	2 276 250,00 €	2 290 500,00 €
Décaissements										
Immobilisations	1 057 437,00 €									
Annuités d'emprunts	51 814,41 €	50 334,00 €	48 853,59 €	47 373,18 €	45 892,77 €	44 412,35 €	42 931,94 €	41 451,53 €	39 971,12 €	38 490,71 €
Achat de marchandises	10 000,00 €	10 000,00 €	10 000,00 €	10 000,00 €	10 000,00 €	10 000,00 €	10 000,00 €	10 000,00 €	10 000,00 €	10 000,00 €
Achats effectués de matières	416 034,00 €	429 785,70 €	444 224,99 €	459 386,23 €	475 305,55 €	492 020,82 €	509 571,86 €	528 000,46 €	547 350,48 €	567 668,00 €
Autres achats	655 691,00 €	660 370,60 €	665 284,18 €	670 443,44 €	675 860,66 €	681 548,74 €	687 521,23 €	693 792,34 €	700 377,01 €	707 290,91 €
Etat - impôts	10 906,00 €	10 906,00 €	10 906,00 €	10 906,00 €	10 906,00 €	10 906,00 €	10 906,00 €	10 906,00 €	10 906,00 €	10 906,00 €
Salaires	358 569,00 €	362 154,69 €	365 776,24 €	369 434,00 €	373 128,34 €	376 859,62 €	380 628,22 €	384 434,50 €	388 278,85 €	392 161,63 €
Charges sociales	131 630,00 €	132 946,30 €	134 275,76 €	135 618,52 €	136 974,71 €	138 344,45 €	139 727,90 €	141 125,18 €	142 536,43 €	143 961,79 €
IS	103 338,81 €	101 438,09 €	99 294,72 €	97 534,57 €	94 870,41 €	92 835,82 €	89 599,53 €	86 163,25 €	82 298,28 €	78 095,99 €
Total des décaissements	2 795 420,22 €	1 757 935,38 €	1 778 615,48 €	1 800 695,94 €	1 822 938,43 €	1 846 927,82 €	1 870 886,69 €	1 895 873,26 €	1 921 718,16 €	1 948 575,04 €
Variation du solde de trésorerie	424 266,78 €	418 564,62 €	412 134,52 €	404 304,06 €	396 311,57 €	386 572,18 €	376 863,31 €	366 126,74 €	354 531,84 €	341 924,96 €



Diplôme : Ingénieur Agronome
Spécialité : Sciences Halieutiques et Aquacoles
Spécialisation / option : Aquaculture
Enseignant référent : M. Hervé LE BRIS

Auteur(s) : Auriane RUBIELLO

Date de naissance : 03/03/2000

Nb pages : 40

Annexe(s) : 12

Année de soutenance : 2023

Organisme d'accueil : Pisciculture Hennequart

Adresse :

Le grand Cernéant
41210, Saint-Viâtre

Maître de stage : M. Vincent HENNEQUART

Titre français :

Etude de faisabilité technico-économique d'une unité de production en système recirculé : Cas de la Pisciculture Hennequart.

Titre anglais :

Technical and economic feasibility study of a recirculating system production unit : Case study of the Hennequart Fish Farm.

Résumé (1 561 caractères) :

Face aux défis croissants liés à l'eutrophisation, la Pisciculture Hennequart envisage une solution innovante : la mise en place d'une unité de production en système recirculé (RAS) dédiée spécifiquement aux esturgeons sibériens, *Acipenser baerii*, âgés de 1 à 2 ans. Cette initiative permettra de libérer près de 20% de la surface en eau actuelle des étangs, réduisant ainsi la densité d'esturgeons et leurs impacts sur l'écosystème stagnante tout en assurant une production pérenne. La méthode de conception de cette unité s'appuie sur des entretiens semi-directifs avec des professionnels de la filière acipenséricole, complétés par une recherche bibliographique. L'analyse financière a été menée par l'estimation des coûts d'investissement, de fonctionnement et de maintenance. L'horizon de la faisabilité économique du projet a été fixé à 10 ans pour aligner le retour sur investissement avec la maturation des femelles productrices de caviar. Cette unité, axée sur l'autonomie de gestion du cheptel, sera dotée d'un filtre à tambour 63µm, de deux lits fluidisés en série, d'un bassin de reprise avec aération, le tout alimenté par un système de pompage. La température de l'eau sera stabilisée à 20°C grâce à une pompe à chaleur. Economiquement, le projet, bien que coûteux au départ, est soutenu par des subventions du FEAMPA à hauteur de 50%. Toutefois, face à la hausse des coûts des matières premières et de l'énergie, les bénéfices nets prévus sont en baisse de 24% sur dix ans, sauf à augmenter progressivement de 1% le prix du caviar chaque année.

Abstract (1 429 characters) :

In the face of growing challenges related to eutrophication, Hennequart Fish Farming is considering an innovative solution: the establishment of a recirculating production unit specifically dedicated to 1 to 2-year-old Siberian sturgeons, *Acipenser baerii*. This initiative would free up nearly 20% of the current pond surface area, thereby reducing the density of sturgeons and their impact on the stagnant water ecosystem, while ensuring sustainable production. The design method for this unit is based on semi-structured interviews with professionals in the sturgeon farming sector, supplemented by a literature review. The financial analysis was conducted by estimating the investment, operational, and maintenance costs. The economic feasibility horizon was set at 10 years, assuming a return on investment aligned with the maturation of female caviar producers. This unit, focused on livestock management autonomy, will be equipped with a 63µm drum filter, two series-connected fluidized beds and a recovery basin with aeration, all powered by a pumping system. The water temperature will be maintained at 20°C using a heat pump. Economically, although the project has a high initial cost, it is supported by FEAMPA subsidies covering 50%. However, with rising raw material and energy costs, net profits are expected to decline by 24% over a decade. A gradual 1% annual increase in caviar prices could counteract this trend.

Mots-clés : *Acipenser baerii* – Etude de faisabilité – Analyse technico-économique – Système recirculé (RAS) – Dimensionnement

Key Words: *Acipenser baerii* – Feasibility study – Techno-economic analysis – Recirculating Aquaculture System (RAS) – Design