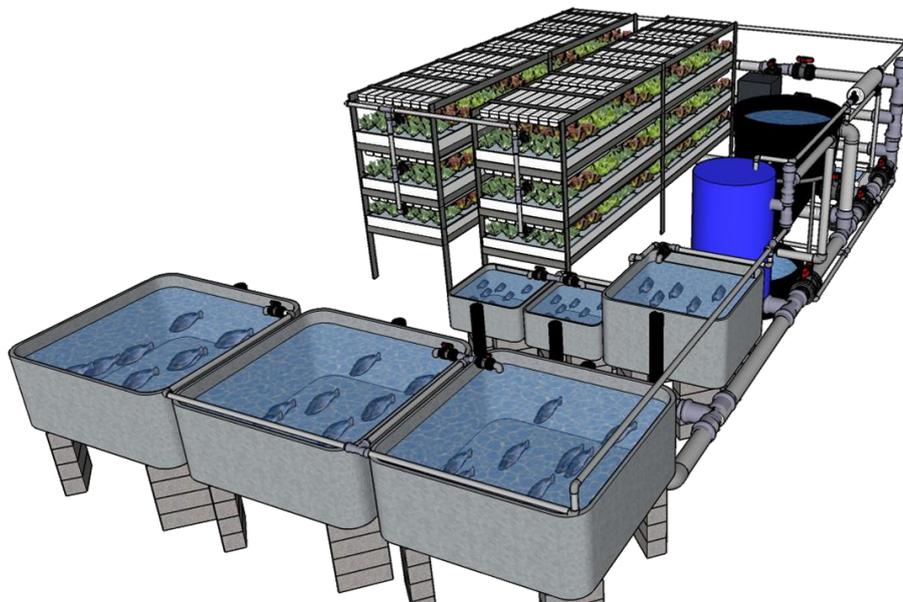

Développement d'un pilote d'aquaculture intégrée associé à un circuit court de distribution

Convention SPW – FEAMP 47-1604-001

Rapport final



Vincent Gennotte, Alicia Noël



Septembre 2023

CERER Pisciculture asbl

Vincent Gennotte, Chargé de projets

Rue de la Justice 10, 4500 Tihange

Tel : 085 27 41 53

Courriel : vincent.gennotte@cerer-pisciculture.be



Unité de Gestion des Ressources Aquatiques et Aquaculture (UGeRAA) – ULiège

Centre de Formation et de Recherche en Aquaculture (CEFRA)

Carole Rougeot, Cheffe de travaux ; Charles Mélard, Chargé de cours

Rue de la Justice 10, 4500 Tihange

Tel : 085 27 41 59

Courriel : C.Rougeot@uliege.be



Centre des Technologies Agronomiques

Isabelle Dufrasne, Directrice

Rue de la Charmille 16, 4577 Modave

Tel : 085 51 27 01

Courriel : isabelle.dufasne@uliege.be



CENTRE DES TECHNOLOGIES AGRONOMIQUES

GAL Pays des Condruses

Jean-François Pêcheur, Directeur

Rue de la Charmille 16, 4577 Modave

Tel : 085 27 49 77

Courriel : jeanfrancois.pecheur@galcondruses.be



Hortiforum asbl – Centre Technique Horticole

Laurent Minet

Chemin de la Sibérie 4, 5030 Gembloux

Tel : 081 62 52 30

Courriel : cthrecherches@skynet.be



Comité d'accompagnement

Philippe Delaunois	SPW Agriculture, Ressources naturelles et Environnement, Direction de la recherche et du développement
Christian Ducarme	Invité, expert aquaculture
Isabelle Dufrasne	Centre des Technologies Agronomiques
François Fontaine	SPW Agriculture, Ressources naturelles et Environnement, Direction des programmes européens
Bertrand Hoc	Collège des producteurs, SOCOPRO asbl
Charles Mélard	Université de Liège, Centre de Formation et de Recherche en Aquaculture
Laurent Minet	Hortiforum asbl – Centre Technique Horticole
Jean-François Pêcheur	GAL Pays des Condruses
Pierre Raulier	Université de Liège, laboratoire de Phytopathologie Intégrée et Urbaine
Carole Rougeot	Université de Liège, Unité de Gestion des Ressources Aquatiques et Aquaculture
Sylvie Van Achter	Cabinet du Ministre de l'Économie, du Commerce extérieur, de la Recherche et de l'Innovation, du Numérique, de l'Agriculture, de l'Aménagement du territoire, de l'IFAPME et des Centres de compétence

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	6
I. Introduction	8
1. contexte	8
1.1. Généralités	8
1.2. Enjeux de l'aquaponie	8
1.3. Production aquacole wallonne	10
2. L'aquaponie	11
2.1. Principe	11
2.2. Aquaculture recirculée	13
2.3. Hydroponie	14
2.4. Systèmes aquaponiques couplé vs découplé	16
II. Objectifs et réalisations	18
1. Objectifs et stratégie	18
2. Réalisations	20
III. Conception, dimensionnement du système	22
1. Site	22
2. Bâtiment	22
3. Système de production	23
3.1. Généralités	23
3.2. Compartiment aquacole	25
3.3. Compartiment hydroponique	26
3.4. Filtration – circulation d'eau	27
3.5. Aération – ventilation – sécurité	30
3.6. Local d'abattage	31
4. Coûts	31
IV. Production : modèle tilapia	33
1. Plan de production	33
2. Qualité de l'eau	36
2.1. Mesures	36
2.2. Contrôle	38
3. Production piscicole	40
3.1. Démarrage	40
3.2. Croissance	40
3.3. Survie	42
3.4. Production	42
3.5. Plan ajusté	43
4. Production maraîchère	45
4.1. Laitues	45
4.2. Plantes en pots	47

V. Production : modèle sandre	49
1. Etude préliminaire	49
2. Plan de production	52
3. Qualité de l'eau	55
4. Production piscicole	57
4.1. Démarrage	57
4.2. Croissance	57
4.3. Survie	58
4.4. Production	60
4.5. Plan ajusté	61
5. Production maraîchère	63
5.1. Laitues	63
5.2. Plantes en pots	64
5.3. Diversification horticole	65
VI. Analyse fonctionnelle	67
1. Bilan de masses	67
1.1. Élevage du tilapia	68
1.2. Élevage du sandre	71
1.3. Conclusion	74
2. Bilan énergétique et hydrique	76
2.1. Bilan énergétique	76
2.2. Bilan hydrique	77
3. Impacts environnementaux	79
3.1. Analyse de cycle de vie	79
3.2. Résultats de l'ACV	82
3.3. Conclusion	86
VII. Distribution – Faisabilité économique	87
1. Evaluation économique du système pilote	87
1.1. Distribution des produits	87
1.2. Bilan économique	89
1.3. Conclusion	95
2. Développement d'un projet commercial	97
2.1. Etudes de marché	97
2.2. Plan d'affaires	97
VIII. Communication – Diffusion	98
Communication scientifique	98
Communication grand public	98
Stages et mémoires	99
Autres projets en aquaponie du CERER-pisciculture	101
IX. Bibliographie	102
X. Annexes (indicateurs)	106

AVANT-PROPOS

Les résultats présentés dans ce rapport sont le fruit de 5 ans et demi de recherche et développement financés par le Service Public de Wallonie Agriculture, Ressources naturelles et Environnement et le Fonds Européens pour les Affaires Maritimes et la Pêche. Ce projet a été mené par l'asbl CERER-Pisciculture, en partenariat avec l'Unité de Gestion des Ressources Aquatiques et Aquaculture de l'ULiège, le Centre des Technologies Agronomiques (Fédération Wallonie-Bruxelles) de Strée, le Groupe d'Action Locale Pays des Condruses et l'asbl Hortiforum.

Nous remercions MM. les ministres René Collin et Willy Borsus (Ministres de l'Agriculture) qui ont accordé cette convention de recherche, et le Service Public de Wallonie Agriculture, Ressources naturelles et Environnement pour son soutien au projet.

De nombreux collaborateurs ont apporté leur contribution à la réalisation de ce projet. Nous les en remercions.

Le CEFRA (directeur : Ch. Mélard), et ensuite l'UGeRAA (Unité de Gestion des Ressources Aquatiques et Aquaculture, C. Rougeot et M. Ovidio) ont contribué à la conception et la construction du système, la gestion de son fonctionnement, l'approvisionnement en alevins et la gestion des élevages piscicoles. Merci particulier à Christian Prignon.

Le CTA (directrice : I. Dufrasne) a pris en charge l'hébergement du système, et participé à l'installation et la construction (C. Lemaire, C. Levaque). Il a également donné une visibilité au projet en facilitant l'organisation de nombreuses visites.

Le GAL Pays des Condruses (directeur : J.-F. Pêcheur) a soutenu le projet dans le cadre du développement local et contribué à l'élaboration des outils de communication (J.-B. Graas), marketing (B. Dewez) et l'identification des circuits de distribution (K. Vanhandenhoven).

Le Centre Technique Horticole (directeur : B. Javaux) et l'asbl Hortiforum (L. Minet) ont fourni un suivi précieux et une expertise indispensable à la mise en place des cultures végétales (choix des variétés, plans de production, support technique) et à la gestion physico-chimique du système.

Merci à l'ensemble des collègues du CERER qui ont assuré la mise en place et le bon fonctionnement du pilote pendant plus de 5 ans (D. Gustin, M. Declercq, T. Lagasse, A. Noël et R. Nivelles).

Les analyses fonctionnelles et économiques du pilote ainsi que les essais de production dans le cadre de la valorisation des effluents ont été menées à bien grâce à la contribution d'étudiants stagiaires et mémorants : H. J. Chery, B. Coulibaly, S. M. Takedo Tchuindjo, E. Declama, O. Sow (Master de spécialisation en Gestion des Ressources Aquatiques et Aquaculture, ULiège-UNamur), J. Leroy et E. Autier Miconi (MSc. in Agriculture, Food technology and environmental Sciences, ESA Angers) et

Tristan Dawance (Bac Développement Durable, HEPN). Merci également à Mamadou Somé, Saïdou Santi et Mohammed N. A. Fagbemi pour leur aide et leur investissement.

Les analyses physico-chimiques des bilans de masses ont été réalisées par le Bureau Environnement et Analyses de Gembloux (BEAGx). Merci à Ph. Maesen.

L'analyse de cycle de vie a été réalisée par A. Forchino et D. Brigolin de l'Université Ca'Foscari (Venise). L'action COST (FA1305) EU Aquaponics Hub a permis de nombreux échanges avec le monde de l'aquaponie européenne et a soutenu la collaboration avec l'Université Ca'Foscari.

Les études de marché et le plan d'affaire ont été réalisés par Christopher Valente et Denis Dumont (Christopher Valente Aquaculture Consultancy).

Merci à l'asbl Devenirs, en particulier A. Delière et J. Genon, pour les échanges et collaborations.

Merci à UMan Architecture (S. Deckmyn) pour les conseils et les plans du bâtiment.

Merci aux membres du comité d'accompagnement et leurs invités pour leurs participations actives et constructives aux réunions.

Merci à F. Fontaine, A. Dethy, V. Maury et A. Herin (DPE, SPW Agriculture, Ressources naturelles et Environnement) pour la guidance et la gestion administrative du projet.

I. INTRODUCTION

1. CONTEXTE

1.1. Généralités

Face aux défis environnementaux et à la demande alimentaire croissante au niveau mondial, l'aquaponie apparaît comme une technique innovante pour la production de poissons et de plantes comestibles. Grâce à ses nombreux avantages (faible consommation en eau, recyclage des nutriments, réduction des déchets, pas d'usage de pesticides), l'aquaponie est aujourd'hui perçue comme une méthode de production agricole durable, respectueuse de l'environnement, et permettant localement de renforcer la sécurité alimentaire et les liens sociaux.

Cette technique repose sur le recyclage des nutriments rejetés par l'élevage de poissons (aquaculture) et leur valorisation dans une culture de plantes hors-sol (hydroponie), dans un principe d'économie circulaire. Elle permet donc de développer la production alimentaire, notamment piscicole, tout en limitant les impacts environnementaux liés à la production de protéines animales.

Avec une consommation de poissons et produits de la mer de près de 24 kg/capita et une production totale (pêche et aquaculture) de 6,2 Mt en UE, la capacité des états membres à rencontrer la demande interne avec leur propre production était de 41% en 2019. En 2020, les importations hors UE ont totalisé 6,15 Mt pour une valeur de 24,2 milliards € (EUMOFA, 2021). Il existe donc une marge énorme de progression pour la production aquacole en Europe.

Par ailleurs, les récentes crises sanitaires et géopolitiques ont souligné les besoins de relocalisation de la production alimentaire.

Cependant, le développement de la production aquacole doit, comme d'autres secteurs de la production agricole, prendre en compte les enjeux économiques et environnementaux actuels, liés notamment à l'épuisement des ressources, la disponibilité des terres (cultivables), de l'eau et la limitation des impacts environnementaux.

1.2. Enjeux de l'aquaponie

L'aquaponie est une technologie émergente qui pourrait contribuer à la production d'aliments durables (König et al., 2018). Ce système combine l'élevage de poissons et la culture de plantes hors-sol dans un circuit fermé, ce qui offre la possibilité de recycler l'eau et les nutriments.

Les principaux avantages de l'aquaponie sont (Somerville et al., 2014) :

- L'économie d'eau. Par rapport à un système d'aquaculture recirculé conventionnel dont l'eau doit être renouvelée pour éviter l'accumulation de nitrates, le système aquaponique permet de diminuer de 90 % la quantité d'eau utilisée. A cela s'ajoute l'économie d'eau réalisée pour la production végétale. En effet, la production végétale aquaponique requiert moins de 10 % de la quantité d'eau nécessaire en agriculture conventionnelle.
- Le recyclage des nutriments. En aquaculture conventionnelle, jusqu'à 80 % de l'azote et 85 % du phosphore entrant dans le système sous forme d'aliment, sont rejetés dans l'environnement sous forme d'effluents (Schneider et al., 2005). En aquaponie, la grande majorité des nutriments nécessaires aux plantes sont apportés par l'aliment des poissons. Ainsi, le système requiert beaucoup moins d'apport externe en nutriments qu'un système hydroponique. De plus, le recyclage de ces nutriments permet de diminuer la teneur en azote et en phosphore de l'effluent et d'éviter ainsi l'eutrophisation du milieu environnant.
- L'aquaponie offre des conditions de culture saines, avec une production de haute qualité similaire aux produits bio car l'utilisation de pesticides est bannie en raison de leur toxicité pour les poissons.
- Enfin, ce type de système de production offre de la flexibilité concernant l'implantation du système. L'installation d'une culture hors-sol peut se faire dans des endroits très variés et qui ne sont pas toujours propices à une culture traditionnelle. Ce dernier point est d'autant plus important que la consommation de produits locaux et la distribution en circuits courts importe aux consommateurs et sont perçues comme des réponses à la crise vécue par les agriculteurs européens. Elles assurent une plus grande transparence quant à la provenance et la qualité des produits et valorisent les marges bénéficiaires faites par les producteurs face à la grande distribution.

Malgré ces avantages indéniables, l'aquaponie fait face à des challenges importants :

- Premièrement, la technicité et donc l'investissement dans un système de production aquaponique peut être élevé. En effet, l'aquaponie combine deux productions et par la même occasion au moins deux fois plus d'investissement que si l'on devait considérer l'horticulture ou l'aquaculture, pour des tailles égales (Turnsek et al., 2020). À cela s'ajoutent les coûts élevés d'exploitation concernant l'alimentation des poissons, les salaires et l'énergie (Konig et al., 2016).
- La gestion de la production nécessite des compétences poussées et multidisciplinaires. Ce qui implique de faire appel à du personnel qualifié.
- Enfin, il reste de grandes inconnues sur le plan législatif et économique qui peuvent constituer des obstacles à l'implantation et la viabilité d'une activité commerciale.

Malgré ces défis, les développements en cours ou déjà opérationnels d'unités ou de fermes de production aquaponiques, notamment aux USA (Superior Fresh), mais également en Europe comme en France (Nouvelles fermes, La Ferme Intégrale) et en Belgique (BIGH), confirment que l'aquaponie se développe en suscitant aujourd'hui un engouement et qu'elle sera un des modes de production aquacole de demain.

Afin de proposer des bases solides au développement wallon de cette activité par de nouveaux producteurs ou comme voie de diversification pour des producteurs (pisciculteurs ou agriculteurs) déjà installés, il est nécessaire de répondre aux enjeux techniques, législatifs et économiques qu'elle suscite : réduction de la dépendance énergétique, optimisation du fonctionnement du système et de l'utilisation des nutriments et de l'eau, mais aussi rentabilité et échelle des installations commerciales.

1.3. Production aquacole wallonne

La production aquacole wallonne est estimée à 320 t/an. La majorité des sites de production sont des sites semi-intensifs, voir extensifs. Classiquement ce sont des étangs alimentés par une dérivation d'un cours d'eau et destinés en grande majorité à la salmoniculture (truite). Près de 80 % de cette production est vendue vivante à destination des pêcheries et du rempoissonnement des rivières (SPW-DGARNE, 2021).

La seule exception, dans le paysage aquacole wallon est l'entreprise Belgian Quality Fish. Cette dernière produit en système aquacole recirculé (RAS) 80 t/an d'esturgeons destinés à la production de caviar.

Bien que le secteur aquacole wallon soit petit, il dispose d'un ancrage historique de la pisciculture dans le patrimoine socio-culturel ainsi que d'un savoir-faire développé au cours des décennies. Ce qui entraîne une image positive des produits aquacoles wallons auprès des consommateurs.

La problématique rencontrée réside dans le fait que la majorité de l'aquaculture pratiquée en Wallonie dépend fortement des conditions pédoclimatiques et que l'accès à une eau de qualité se fait de plus en plus rare.

Malgré tout, les opportunités de développement pour le secteur existent. L'augmentation de la demande de produits de terroirs et de haute qualité nutritionnelle est là. L'intérêt des consommateurs pour les filières locales éveille celui des grandes chaînes de distribution et le secteur de la transformation est déjà implanté en Belgique bien qu'il traite principalement les produits importés. À cela s'ajoute des espaces disponibles pour l'implantation de circuits fermés ainsi que la présence d'institutions universitaires disposant d'une expertise concernant l'élevage de différentes espèces piscicoles et investies dans l'innovation (SPW-DGARNE, 2021). Il existe par conséquent une place pour la croissance et la diversification aquacole en Wallonie, que cela soit au niveau des méthodes de production ou des espèces élevées.

2. L'AQUAPONIE

L'aquaponie combine la production de poissons (aquaculture) et la production végétale hors-sol (hydroponie). Historiquement, l'aquaponie s'inspire d'anciennes pratiques agricoles, telles que la rizipisciculture en Asie du Sud-Est ou encore les « Chinampas » (jardins flottants) des aztèques en Amérique du Sud. Cependant, à cette époque la production piscicole (extensive) n'aurait que peu contribué à la nutrition des plantes. L'aquaponie moderne s'est développée aux USA dans les années 1970, au sein d'institutions à la recherche de pratiques agricoles plus durables. La majorité des systèmes aquaponiques actuels sont basés sur les travaux de James Rakocy et son équipe (Université des Îles Vierges), qui sont souvent considérés comme les fondateurs de l'aquaponie (Somerville et al., 2014).

2.1. Principe

Le principe de base de l'aquaponie est de tirer parti des services et ressources partagés entre l'aquaculture et la production végétale. Pour ce faire, l'infrastructure aquaponique, basée sur la recirculation de l'eau, abrite trois groupes d'organismes distincts : les poissons, les bactéries et les plantes (Figure 1). Cela implique que les paramètres physico-chimiques du système aquaponique doivent respecter les besoins de tous ces organismes simultanément (Somerville et al., 2014 ; Lennard & Goddek, 2019).

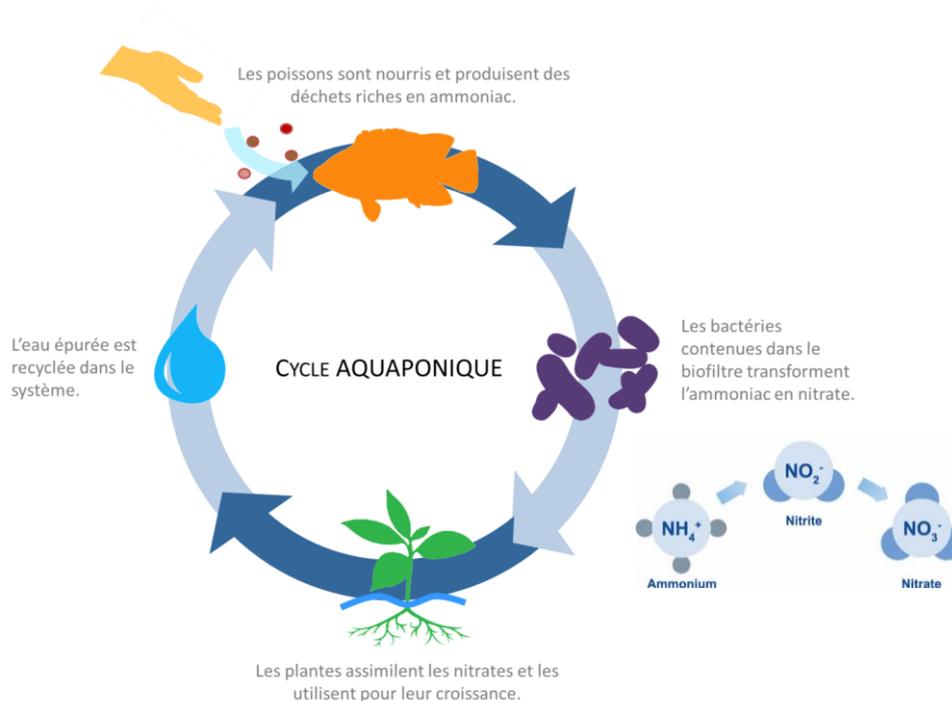


Figure 1. Représentation schématique d'un cycle aquaponique.

De manière simple, les poissons n'assimilent pas l'entièreté des nutriments présents dans l'aliment qui leur est distribué (Figure 2), une partie est excrétée sous forme soluble et de fèces. C'est en particulier le cas pour l'N et la P, qui sont deux nutriments majeurs pour la croissance des végétaux, et dont la part excrétée par les poissons peut atteindre 80 à 85 %.

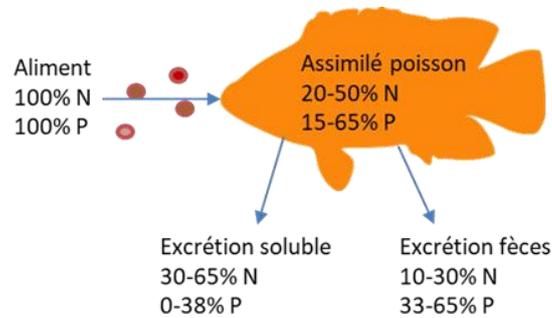


Figure 2. Distribution des nutriments (N et P) apportés par l'alimentation chez le poissons (d'après Anseeuw, 2018).

Les déchets azotés produits par le catabolisme des protéines chez les poissons sont excrétés sous forme d'ammoniac (NH_3) par les branchies principalement. L'ammoniac dans l'eau est présent sous forme non ionisée (NH_3) et ionisée (NH_4^+). La somme de ces deux composés est appelée azote ammoniacal total (TAN) et le ratio entre les deux est contrôlé par le pH, la température et la salinité. L'ammoniac pose problème, car il s'accumule dans les bassins d'élevage et présente une toxicité aigüe élevée pour les poissons. Pour donner un ordre de grandeur, il est généralement recommandé de ne pas dépasser 1 mg/L TAN (Timmons et al., 2002). Il est donc nécessaire de réguler la quantité d'ammoniac présente dans l'eau d'élevage.

C'est ici qu'intervient le deuxième groupe d'organismes nécessaires au bon fonctionnement du système aquaponique : les bactéries. La communauté des bactéries nitrifiantes est principalement composée d'espèces appartenant aux genres *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrospira*, *Nitrobacter* et *Nitrococcus*. Ces bactéries sont chimio-lithotrophes et tirent leur énergie de l'oxydation de l'azote inorganique. Ce processus, appelé nitrification oxyde l'ammoniac/ammonium ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$) en nitrites (NO_2^-) puis en nitrates (NO_3^-) (Figure 3) (Timmons et al., 2002).

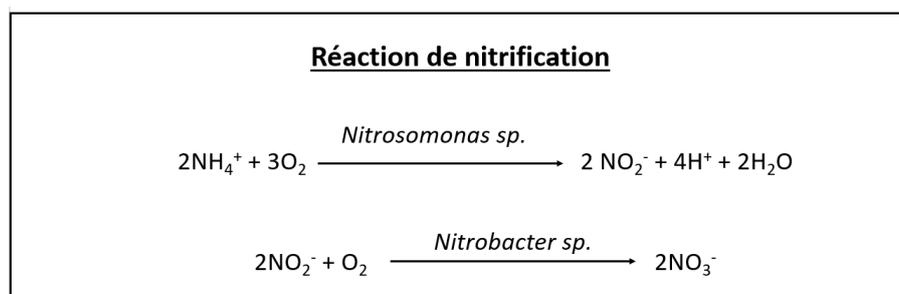


Figure 3. Réaction de nitrification

Grâce à l'action des bactéries, ce n'est pas l'ammoniac qui s'accumule dans les bassins d'élevage mais les nitrates. La tolérance aux nitrates varie selon les espèces et le stade de vie, ils sont cependant peu toxiques en comparaison de l'ammoniac et des nitrites. De plus, les nitrates sont la forme d'azote préférentiellement absorbée par les plantes pour supporter leur croissance. Ainsi les déchets produits par les poissons servent de fertilisants pour les plantes et en retour celles-ci purifient l'eau des déchets azotés toxiques pour les poissons.

2.2. Aquaculture recirculée

Un système aquaponique est un cas particulier de système d'aquaculture recirculé (RAS). Les RAS ont vu le jour dans les années 1950 afin d'optimiser l'utilisation des ressources en eau et mieux contenir l'effluent généré par l'aquaculture. Ce sont des systèmes de production aquacole intensifs qui font appel simultanément à deux systèmes de filtration principaux (mécanique et biologique), afin d'épurer l'eau d'élevage et permettre son recyclage.

La filtration mécanique se présente sous différentes formes (tambour filtrant, décanteur, mousses, ...) et permet d'éliminer les matières solides en suspension dans l'eau. Ces particules organiques proviennent principalement des fèces, de la nourriture non ingérée ou tout autre matière organique en suspension (flocs biologiques). Elles peuvent s'accumuler dans les systèmes, provoquant leur encrassement, et surtout favoriser le développement de bactéries hétérotrophes grâce à l'apport de carbone organique. Les bactéries nitrifiantes se répliquent 40 fois plus lentement que les bactéries hétérotrophes. Par conséquent, elles sont rapidement surpassées par ces dernières si du carbone organique est disponible (Espinal & Matuli, 2019).

La filtration biologique permet d'éviter l'accumulation d'ammoniac, excrété par les poissons suite au catabolisme des protéines. Des biofiltres servent de support aux communautés microbiennes de bactéries nitrifiantes (*Nitrosomonas*, *Nitrobacter*, ...) qui assurent l'oxydation de l'ammoniac (très toxiques) en nitrates (faiblement toxiques).

Un troisième système de filtration est souvent présent. Il assure la désinfection de l'eau soit par un système de filtration UV ou d'ozonation. Cette désinfection permet de lutter contre les pathogènes susceptibles d'infecter les poissons (Espinal & Matuli, 2019).

En plus des systèmes de filtration, les RAS doivent répondre aux besoins physiologiques des organismes (poissons, bactéries, ...) notamment en terme d'oxygénation. Ils sont donc également équipés de systèmes d'échanges gazeux, qui assurent un apport d'oxygène, mais aussi le dégazage du CO₂ excrété.

Les RAS sont donc des systèmes complexes où de nombreuses interactions biologiques, chimiques et physiques ont lieu. Certains paramètres doivent être surveillés régulièrement, car ils peuvent rapidement impacter la survie des poissons et changer en fonction de la quantité d'aliment apporté

dans le système. Généralement, les paramètres monitorés sont : l'oxygène dissout, l'ammoniac, les nitrites, les nitrates, les matières en suspension, le pH et l'alcalinité (Timmons et al., 2002; Espinal & Matuli, 2019).

2.3. Hydroponie

L'hydroponie peut être définie comme la culture de plantes hors sol. Un support mécanique inerte (sable, gravier, radeau, ...) est utilisé pour soutenir les plantes et les nutriments sont apportés sous forme de solution liquide (Jones, 2004).

L'hydroponie s'est initialement développée dans les régions arides afin de répondre à la problématique du manque d'eau. Elle est aussi vue dans les régions aux sols pauvres comme une solution permettant d'augmenter la productivité en apportant moins d'engrais (Joyce et al., 2019).

Il existe une grande variété de systèmes de production hydroponique (Tableau 1). En aquaponie, trois systèmes sont principalement utilisés : les systèmes avec substrat, la culture sur radeau (DWC = Deep Water Culture) et la technique sur film nutritif (NFT) (Figure 4) (Maucieri et al., 2018).

Tableau 1. Classification des systèmes hydroponiques (Maucieri et al., 2019).

Caractéristiques	Catégories	Exemples
Systèmes hors sol	Sans substrat	Technique sur film nutritif (NFT) Aéroponie Culture sur radeau (DWC)
	Avec substrat	Substrats organiques (tourbe, fibre de coco,...) Substrats inorganiques (laine de roche, vermiculite, argile,...)
Systèmes ouverts ou fermés	Ouvert	Les plantes sont continuellement alimentées par une solution nutritive fraîche
	Fermé (recirculé)	La solution nutritive est recirculée et les nutriments manquants sont supplémentés selon les besoins
Irrigation	Continue	NFT DWC
	Périodique	Irrigation au goutte à goutte, aéroponie

Les systèmes de culture avec substrat procurent un ancrage pour les racines des plantes. La microporosité et la capacité d'échange cationique du substrat choisi peut favoriser la nutrition des plantes. Les micro-organismes en profitent également pour s'implanter, ce qui permet dans certains cas de se passer de biofiltre si la surface disponible est suffisamment importante. Une large gamme de

substrats aux caractéristiques et coûts variables peuvent être utilisés (laine de roche, billes d'argiles, fibres de coco, tourbe, ...) (Maucieri et al., 2018, 2019).

La culture sur radeau fait appel à des supports flottants qui permettent à la plante de se développer avec les racines entièrement immergées dans 20-30 cm de solution nutritive. Ce système est particulièrement attractif, car il permet de minimiser les coûts et la gestion. Son principal désavantage est qu'il nécessite de contrôler la concentration en oxygène, qui ne doit pas descendre sous les 4 – 5 mg/L. Sous ce seuil, des carences en nutriments apparaissent, causées par une réduction des performances d'absorption des racines (Maucieri et al., 2019).

La technique sur film nutritif peut être considérée comme le système hydroponique classique. La solution nutritive circule dans des goulottes sous forme de fine couche de 1-2 cm. L'avantage est que les racines ne risquent jamais de manquer d'oxygène. Cependant, l'absence de substrat et le faible niveau d'eau rendent le système fragile face aux pannes de pompes, d'électricité et au colmatage du système. À cela s'ajoute les fluctuations de température dans la solution nutritive qui peuvent engendrer du stress pour les plantes et par conséquent des maladies (Maucieri et al., 2019).

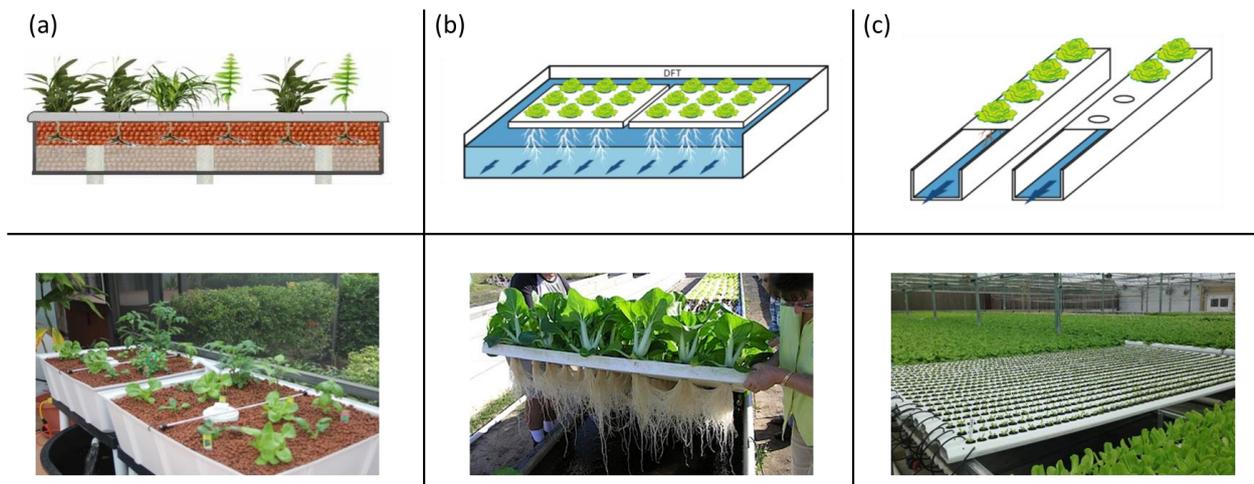


Figure 4. Illustration des systèmes de culture hydroponique (a) avec substrat, (b) sur radeau (DWC) et (c) sur film nutritif (NFT).

Les avantages de l'hydroponie comparée à la production conventionnelle sont multiples. Premièrement, l'hydroponie permet de produire des végétaux même là où le sol ne s'y prête pas. Par exemple en zone urbaine, aride ou sur des sols potentiellement contaminés. Les systèmes basés sur la recirculation permettent d'économiser l'eau et les nutriments. Enfin, le travail requis pour labourer, arroser et autres pratiques traditionnelles est absent ou nettement réduit. Enfin, le contrôle accru sur l'environnement permet une production plus homogène et une meilleure prévention vis-à-vis des maladies (Jones, 2004 ; Resh, 2013).

Cependant, la technique présente aussi des inconvénients. Premièrement, les coûts d'infrastructure sont élevés. À cela s'ajoute l'engagement de personnel qualifié car la nutrition des plantes est une

discipline complexe qu'il faut pouvoir maîtriser. Il faut également prendre en compte que les variétés de plantes adaptées aux conditions de croissance contrôlées nécessitent encore de la recherche et du développement. Enfin, le principe même de la recirculation d'eau peut poser problème. Le principal étant le risque de favoriser la propagation rapide d'un pathogène si ce dernier arrive à entrer dans le système (Jones, 2004 ; Resh, 20013).

2.4. Systèmes aquaponiques couplé vs découplé

Selon les connexions existantes entre les compartiments piscicole et horticole, il est possible de distinguer les systèmes aquaponiques couplés des systèmes aquaponiques découplés (Figure 5). La différence entre les deux réside dans le cheminement du flux d'eau et de nutriments. Dans les systèmes aquaponiques couplés, l'eau est continuellement recirculée entre le compartiment aquacole et horticole. Le système forme ainsi une boucle fermée. Au contraire, dans les systèmes aquaponiques découplés, l'eau s'écoule du compartiment aquacole vers le compartiment horticole à la demande, sans revenir ensuite vers les poissons (Monsees et al., 2017).

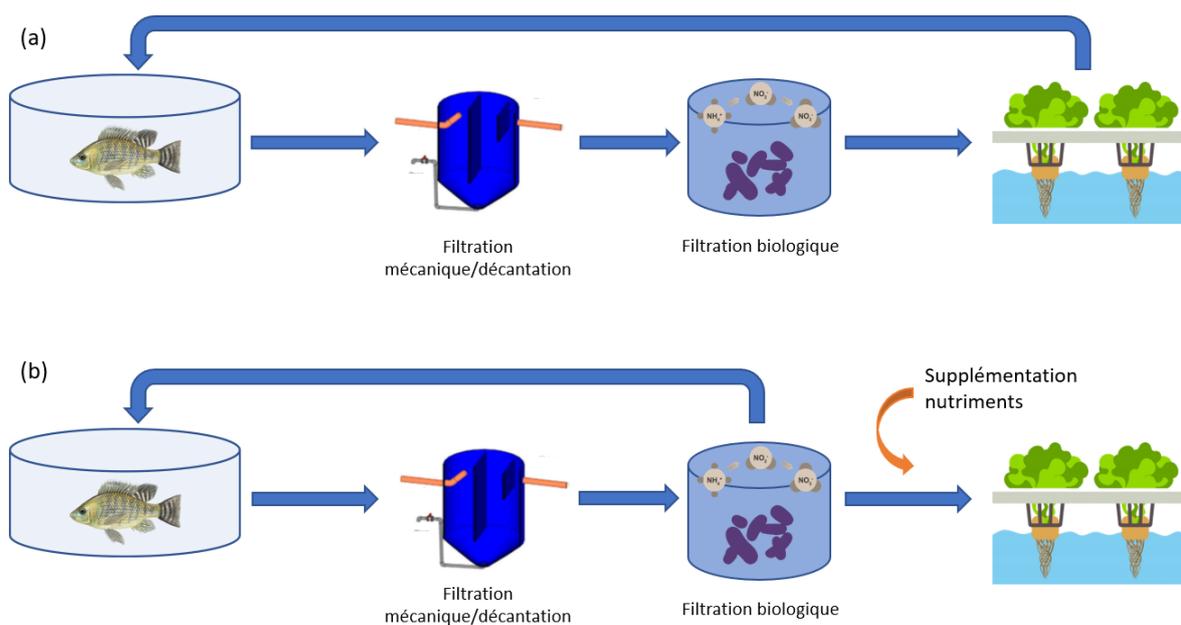


Figure 5. Représentation schématique d'un système aquaponique (a) couplé et (b) découplé. Les flèches bleues représentent la circulation d'eau entre les différents compartiments.

Le système aquaponique couplé est le plus courant, et se rencontre principalement chez les amateurs, dans les systèmes expérimentaux et unités commerciales de petites dimensions (Pattillo et al., 2022). Dans un système aquaponique couplé, l'eau est continuellement recirculée entre les compartiments aquacole et horticole. Il est donc essentiel que les plages de tolérance des besoins physiques et biologiques des espèces présentes dans le système aquaponique soient en adéquation, ce qui est parfois limitant dans les choix de production. Dans un système aquaponique couplé, le compromis est

la clef. Par exemple, pour fonctionner de manière optimale, les bactéries responsables de la nitrification ont besoin d'un pH ≥ 7 . D'un autre côté, les nutriments nécessaires à la production de plantes en hydroponie sont majoritairement disponibles à des pH de 5,5 – 6. Le pH visé en aquaponie couplée est donc généralement de 7, soit un compromis pour l'ensemble des espèces (Monsees et al., 2017). Malgré tout, Lennard & Ward (2019) ont démontré que la production de laitues et d'herbes aromatiques (aneth, coriandre, persil, ...) en système aquaponique couplé était égale voir meilleure que celle observée en système hydroponique, à pH plus faible. Ceci pourrait s'expliquer par la diversité des micro-organismes favorisée dans les systèmes aquaponiques. Ces micro-organismes formeraient des associations étroites avec les racines des plantes, ce qui permettrait à ces dernières d'absorber les nutriments même à des pH suboptimaux (Joyce et al., 2019).

Ce besoin de compromis dans les conditions d'élevage est à l'origine du développement des systèmes aquaponiques découplés. Dans les systèmes découplés, l'eau du système aquacole alimente le compartiment horticole à la demande, mais ne revient pas ensuite vers les poissons. Cela permet de gérer et d'optimiser les paramètres de l'eau pour chaque production séparément. Les besoins de chaque espèce peuvent être parfaitement respectés et un apport ciblé de nutriments pour les plantes peut être effectué sans impacter les poissons. Le système aquaponique découplé ne permet cependant pas de bénéficier de l'effet d'épuration des plantes au bénéfice des poissons (Goddek et al., 2019 ; Palm et al., 2019).

II. OBJECTIFS ET RÉALISATIONS

1. OBJECTIFS ET STRATÉGIE

Ce projet vise à développer un pilote de production aquaponique de taille moyenne et d'en faire le bilan (intrants vs extrants) énergétique, en ressources alimentaires (nutriments), et économique. Cette approche permettra de dresser un bilan financier complet et d'envisager la transposition de ce type d'unité dans différentes situations et conditions environnementales afin de développer une nouvelle activité de production. L'unité expérimentale sera implantée dans un hangar agricole, en milieu rural et la production écoulee au niveau de circuits courts de distribution.

Une attention particulière sera portée sur la problématique énergétique des systèmes de production hors-sol, en visant une réduction de la consommation (utilisation de systèmes d'éclairage à basse consommation, isolation, circuit recirculé peu énergivore). Cette unité présentera différents avantages et spécificités quant à son fonctionnement, sa situation et le public (producteurs et consommateurs) visé :

- Standardisation des conditions environnementales : l'affranchissement des conditions extérieures (lumineuses et thermiques) sera maximum afin de pouvoir dresser des bilans énergétiques et de production sur des cycles de production suffisamment longs, et tester différentes productions (plantes/poissons).
- Implantation dans un centre de formation agronomique : durant et après le projet, l'unité servira d'outil de recherche et de formation à l'aquaponie.
- Implantation en milieu rural : contrairement au développement général de l'aquaponie qui vise essentiellement la production urbaine, la localisation en milieu rural permettra d'élargir le public ciblé par ce nouveau mode de production.
- Sa taille permettra une gestion relativement simple qui pourrait être assurée par un producteur formé ou une petite communauté.
- Intégration de la production dans un circuit court de distribution.

Tant au niveau des plantes que des poissons, la production sera orientée vers des espèces, soit à haute productivité, soit à haute valeur ajoutée. Deux modèles de production utilisant deux espèces de poissons différentes seront testés.

Le premier modèle visera la production de tilapia, afin de valider le fonctionnement du système. Le tilapia, est l'espèce élevée dans plus de la moitié des productions aquaponiques (Love et al., 2014). C'est une espèce tropicale omnivore qui présente une productivité élevée. Une taille commerciale de 500 g peut être atteinte en 9 mois de grossissement. Sa grande tolérance aux conditions

environnementales variées (oxygène, température, salinité, ...) en fait un candidat propice à l'élevage en circuit recirculé.

De plus, un marché potentiel existe pour cette espèce puisque sa production a atteint 250 t/an en Belgique fin des années 1990 (FAO, 2020). Il n'est cependant plus produit actuellement.

Le principal inconvénient du tilapia pour ce type de production est sa température optimale de croissance élevée (27 °C) induisant un impact sur les dépenses de chauffage. La plupart des plantes préférant des températures de 20-25 °C (Goddek et al., 2015), la température d'élevage sera de 25 °C, ce qui limitera ces dépenses.

Le second modèle visera la production de sandre. Le choix d'une espèce indigène ne s'est pas porté sur la truite dont l'exigence thermique (< 21°C) rencontre peu celle des plantes et légumes visés en culture hydroponique (comme la laitue) et nécessite un refroidissement de l'eau en été. Plus thermophile, la température de croissance optimale du sandre se situe entre 22 et 25°C. Le sandre est un produit haut de gamme ciblé par un marché de niche. Il faut en moyenne 460 jours pour grossir un sandre de 1 g à une taille commercialisable de 1 kg (Dalsgaard et al., 2013).

Les besoins nutritionnels du sandre sont différents de ceux du tilapia. Cette espèce carnivore requiert une alimentation riche en protéines. Les aspects non seulement quantitatifs, mais également qualitatifs de l'aliment distribué aux poissons influenceront donc la balance en nutriments du système et la croissance des plantes. L'aliment distribué aux sandres contient un taux de protéines plus élevé que l'aliment destiné aux tilapias, induisant une excrétion azotée plus importante. Si l'élevage d'espèces carnivores présente un caractère moins durable que des espèces omni- voire herbivores, nous espérons voir cet aspect compensé à court ou moyen terme par le développement d'aliments substituant les farines d'insectes aux farines de poissons.

Les premiers essais de production maraîchères seront orientés vers les plantes les mieux adaptées et les plus faciles à cultiver en aquaponie, comme les plantes condimentaires (basilic, persil, coriandre, ...) et les laitues. Dans un second temps, la production se diversifiera vers d'autres produits à plus haute valeur ajoutée.

Pour chaque modèle de production (tilapia et sandre), un bilan global des intrants et de la production sera établi et les coûts de production du système évalués, permettant d'avoir une vue d'ensemble de son fonctionnement, facilitant son optimisation et permettant d'estimer sa viabilité économique et sa transposition en situation de production réelle. Ce projet permettra de créer les bases nécessaires au développement d'une nouvelle activité de production aquacole intégrée à caractère durable en Wallonie et ouvrira la voie à une diversification des modes de production et des espèces visées.

2. RÉALISATIONS

La première période du projet (02/2017 – 10/2017) a été principalement consacrée à la conception du système et ensuite à la construction de l'enceinte isolée accueillant l'unité et à la mise en place du circuit d'élevage et de culture proprement dit. En parallèle, une première simulation de l'impact environnemental de la construction du système a été menée par analyse du cycle de vie (ACV) sur base des données de conception.

Durant la seconde période (11/2017 – 05/2018), la mise en place de tous les équipements du système a été finalisée. Une nouvelle ACV a été menée avec les données brutes réelles issues de la construction du système. Une phase de vérification du fonctionnement hydraulique a été effectuée puis la production piscicole (tilapia) a été lancée en mars 2018. Les premiers poissons ont pu être commercialisés en juin 2018.

Durant la troisième période (06/2018 – 11/2018), une étude visant l'optimisation technique et énergétique du système de filtration mécanique a été réalisée. L'objectif était de comparer trois systèmes de filtration mécanique en évaluant leur efficacité et l'impact de leur fonctionnement sur la qualité de l'eau. Les 3 systèmes étaient : un décanteur de type « vortex » seul, le vortex comme pré-filtration en combinaison avec un tambour filtrant et le tambour filtrant seul. Le meilleur système de filtration mécanique dans les conditions de cette étude était le tambour filtrant seul, le vortex n'ayant apporté aucun avantage technique ou économique significatif.

Après cette étude qui nécessitait une stabilité (physico-chimique) dans le fonctionnement du système, la production horticole a démarré au mois de septembre 2018. Plusieurs variétés de salades et plantes aromatiques ont été testées et une sélection a ainsi pu être opérée. Début 2019, les plans de production établis étaient validés et la production associant tilapia, laitues et plantes en pots contrôlée et stabilisée. 17 m² de culture étaient dédiés à la culture de plantes en pots (roquette sauvage et plantes aromatiques : basilic, coriandre, persil) et 33 m² à la culture de laitues (pommée, batavia, feuille de chêne) sur radeaux.

Entre mai et août 2019, une analyse fonctionnelle avancée du système de production a été réalisée. Cette analyse concernait 1) la productivité, les flux de nutriments, d'eau et d'énergie au sein du système ; 2) l'étude des impacts environnementaux liés à la production par analyse du cycle de vie et 3) l'établissement du profil économique du système de production.

Durant la même période, un essai de production de sandre (2^e espèce visée dans ce projet) en aquaponie couplée a été mené dans un système expérimental de plus petite dimension situé à Tihange afin de préparer la phase de production de cette espèce dans l'unité aquaponique de Strée. Cette expérience a permis de comparer les performances de croissance et le bien-être des sandres en aquaponie par rapport à un élevage en système recirculé classique. Suite à cet essai probant, la production aquaponique de sandre a démarré à plus grande échelle à Strée en novembre 2019 et s'est prolongée jusque décembre 2022, partiellement grâce au soutien du projet PERCIPONIE (Interreg VA GR, n°073-4-08-191).

La production végétale est restée semblable (plantes en pots : roquette, basilic, persil, coriandre ; laitues : pommée, batavia) mais la surface totale de culture a été réduite (25 à 41 m²) pour trouver un équilibre avec la nouvelle production piscicole.

Une fois la production stabilisée, une évaluation de la productivité du « système sandre » a été réalisée sur une période expérimentale de 8 semaines (01-03/2020). Des données économiques ont également été récoltées afin d'évaluer la rentabilité du système et la comparer à celle du modèle tilapia.

Des circuits de distribution courts ont été identifiés localement pour les poissons et les légumes. Les poissons ont été vendus sur une base régulière entre juillet 2020 et décembre 2022.

Le projet, dont la période d'exécution initiale était prévue de février 2017 à janvier 2020, a bénéficié d'une prolongation de convention jusqu'août 2022. Les objectifs spécifiques de cette seconde phase de projet étaient :

- la récolte de données complémentaires sur la production de sandre et la recherche de piste de diversification horticole ;
- la construction d'un local d'abattage ;
- la mise en place d'une surface de culture dédiée à la valorisation des effluents ;
- la finalisation du bilan économique et la réalisation d'études de marché ciblant les produits aquaponiques ;
- le dimensionnement technique et économique d'une ferme commerciale (plan d'affaire).

Le local d'abattage a été finalisé en janvier 2021 et sa conformité validée par l'AFSCA en octobre 2021.

Entre janvier et juin 2021, les structures hydroponiques ont été modifiées pour réaliser des essais sur la valorisation des effluents et la diversification horticole. La production aquaponique couplée au système était alors entièrement dédiée à la culture de laitues, sur 4 étages, soit 33 m², ce qui assurait un bon équilibre avec la production piscicole. Le reste de la surface disponible a été modifiée pour accueillir 8 tables à marées (60 x 120 cm) permettant de réaliser des essais de diversification de manière découplée, c'est-à-dire que ces tables de culture sont alimentées par les effluents du système et permettent donc leur valorisation.

Les essais de culture sur table à marées se sont concentrés sur le mesclun, le chanvre, le gingembre et le curcuma, utilisant les effluents « liquides » (issus du trop-plein) du système.

Enfin, 2 appels à consultance externe ont été lancés en novembre 2021 afin de réaliser les études de marché visant les produits aquaponiques, et établir un plan d'affaire pour le développement d'une ferme aquaponique sur base des 2 modèles de production étudiés.

III. CONCEPTION, DIMENSIONNEMENT DU SYSTÈME

1. SITE

L'unité pilote de production aquaponique est installée au Centre des Technologies Agronomiques de Strée (CTA), centre de formation et de recherche appliquée, partenaire du projet (Figure 6a). Cette implantation permet d'une part, une mise en situation réelle dans le cadre d'une diversification de la production agricole en milieu rural et, d'autre part assure une proximité avec des acteurs du développement local dans le domaine maraîcher et la distribution alimentaire en circuits courts (GAL Pays des Condruses, asbl Devenirs).

Le bâtiment abritant le système pilote a été construit à l'intérieur d'un hangar en béton dédié à la formation technique et agronomique (Figure 6b). Le hangar est chauffé afin de maintenir une température minimale de 10 °C en hiver.

2. BÂTIMENT

A l'intérieur du hangar, un bâtiment de 100 m² (dimensions extérieures : 14,56 x 7,10 x 3,80 m, L x l x h, surface : 103 m² ; dimensions intérieures : 14,08 x 6,62 x 3,50 m, L x l x h, surface : 93 m²) a été construit afin d'héberger le système de production (Figure 6c). Cette enceinte assure une sécurité contre les incendies (REI60), les intrus et les pathogènes, et procure une isolation thermique permettant de contrôler plus facilement les conditions environnementales et de les maintenir constantes toute l'année, en limitant les dépenses énergétiques de chauffage et valorisant les calories produites au sein de l'unité, notamment par l'éclairage artificiel. Le bâtiment est construit en béton cellulaire (murs : blocs *Ytong* Low Energy C2/300, 24 x 60 x 25 cm, coefficient de conductivité thermique λ_{utile} (W/mK) = 0,08 ; toit : dalles *Hebel* AAC 2/350, épaisseur 30 cm, λ_{utile} (W/mK) = 0,09).

Le bâtiment est raccordé aux égouts, à l'électricité (3x400+N V, 63 A, diff. 300 mA) et à l'eau de ville. Le site se trouvant en zone de captage d'eau potable, l'alimentation en eau ne peut se faire par pompage d'eau souterraine, ce qui influe fortement les coûts liés à la consommation d'eau. Les prix moyens de l'eau et de l'électricité facturés au CTA durant la période du projet étaient respectivement de 3,20 €/m³ et 0,19 €/kWh.



Figure 6. Implantation de l'unité pilote aquaponique : (a) vue aérienne du CTA (en rouge : situation de l'unité pilote) ; (b) vue intérieure du hangar avant la construction ; (c) vue extérieure du bâtiment.

3. SYSTÈME DE PRODUCTION

3.1. Généralités

Le système de production aquaponique (volume total : $17,6 \text{ m}^3$) a été conçu et dimensionné afin d'optimiser l'utilisation de l'espace disponible dans le bâtiment (Figure 7). Le dimensionnement optimal garantissant un bon rapport poissons/plantes est basé sur le taux de nourrissage des poissons par rapport à la surface de plantation. Selon une règle de base empirique, ce taux est de $40\text{-}50 \text{ g aliment/m}^2/\text{jour}$ pour des plantes feuillues et de $50\text{-}80 \text{ g aliment/m}^2/\text{jour}$ pour des plantes fruitières (Somerville et al., 2014). Par ailleurs, il fallait que ce système soit adapté à différents modèles de production (tilapia et sandre) et donc différents taux de nourrissage et apports nutritionnels.

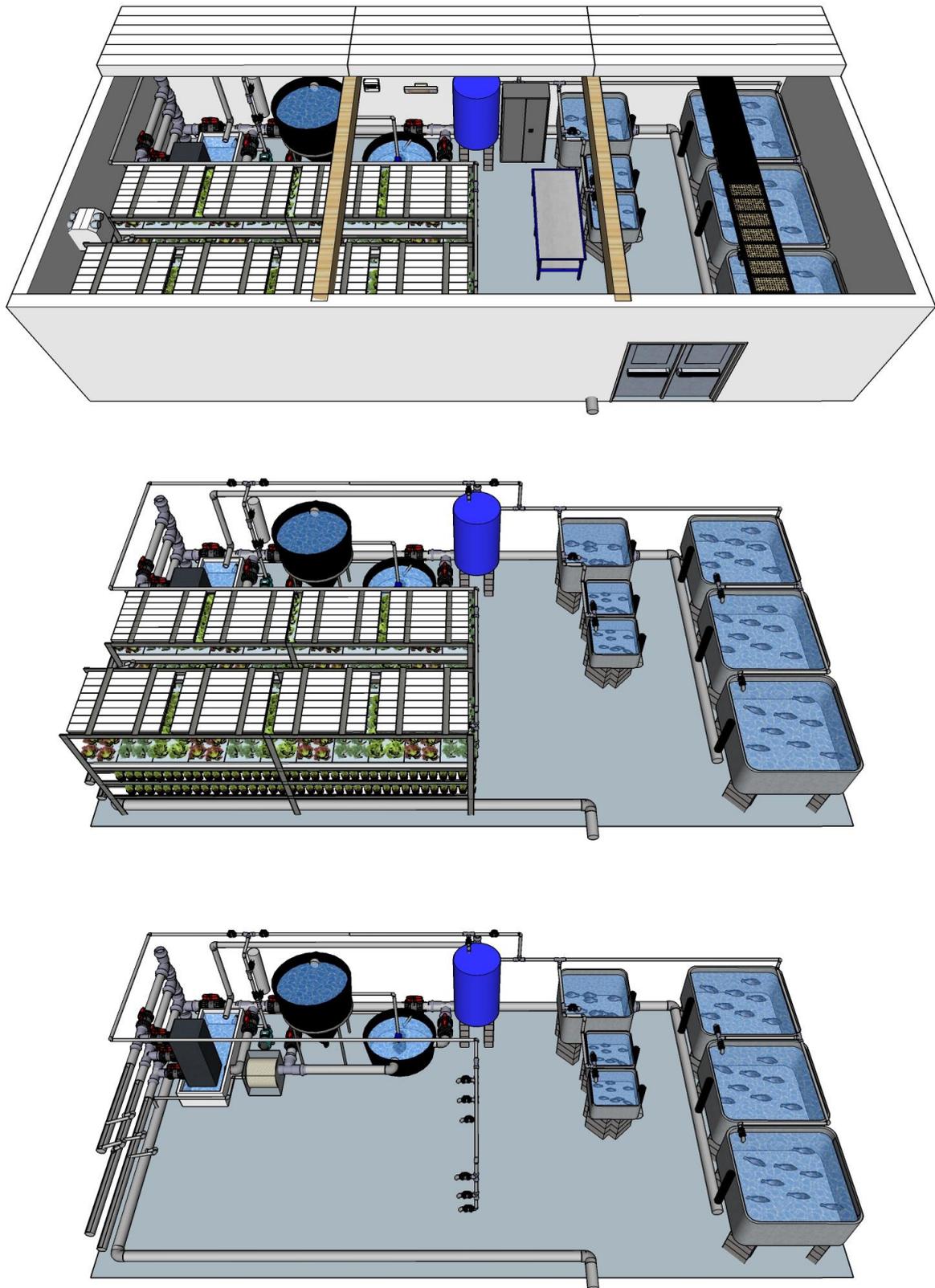


Figure 7. Conception du système aquaponique : vue d'ensemble en schémas 3D.

Le Tableau 2 reprend les principales caractéristiques techniques du système.

Tableau 2. Caractéristiques techniques du système.

Caractéristiques techniques	
Volume total (m ³)	17,6
Débit total (m ³ /h)	14,3
Puissance électrique maximale (kW)	16
Compartment aquacole	
Volume bassins (m ³)	7,6
Volume bac de charge (m ³)	0,5
Volume biofiltre (m ³)	1,5
Débit (m ³ /h)	12,7
Compartment hydroponique	
Volume (m ³)	8
Débit (m ³ /h)	1,6
Surface total de culture (m ²)	50
Surface radeaux (m ²)	33
Surface NFT (m ²)	17
Puissance électrique éclairage LED (kW)	7,2

3.2. Compartiment aquacole

Le circuit comprend 6 bassins d'élevage de poissons en polyester stratifié (3 bassins de 2 m³, 1 bassin de 1 m³ et 2 bassins de 0,3 m³) adaptés aux différentes phases de grossissement (Figure 8). Chaque bassin est équipé d'un nourrisseur automatique : nourrisseurs à trémie (Linn Profi 5 kg, 12V) pour les 4 plus grands bassins et nourrisseurs mécaniques à tapis (FIAP Profi 5 kg) pour les 2 bassins de 300 L. L'aliment est distribué chaque jour pendant 12h, durant la phase lumineuse.



Figure 8. Bassins d'élevage piscicole.

Un bassin (cuve IBC 1000 L) alimenté en eau claire a également été installé dans le local pour réaliser la phase d'affinage des poissons avant la vente. Celui-ci n'est pas connecté au réseau hydraulique du système d'élevage.

3.3. Compartiment hydroponique

Le compartiment hydroponique est composé de 2 étagères métalliques comportant 3 étages chacune (Figure 9a, 9b), pour une surface totale de 50 m² (8,3 m²/étage). Quatre étages (33 m²), dédiés à la culture de type DWC (Figure 9c) sur radeaux (plaques de polystyrène, épaisseur 3 cm), comporte chacun un bac de 2 m³ (hauteur d'eau 20-25 cm). Ces bacs ont été fabriqués sur mesure en panneaux multiplex bakélinés recouverts par un liner EPDM (qualité eau potable). Les 2 autres étages (17 m²) accueillent des plantes en pots sur un système NFT (Figure 9d). Ce système est en réalité intermédiaire entre le NFT et la table à marée. Il s'agit de goulottes (espacement 15,5 cm) réalisées grâce à des tôles de bardage et irriguées en fin filet de manière discontinue (2 arrosage de 30 min/j contrôlés par une électrovanne commandée par minuterie). Chaque étage est éclairé par des lumières LED blanches horticoles (Vegeled, 144 W/m², puissance totale : 7180 W, photopériode : 12 h) garantissant un flux lumineux minimal de 150 $\mu\text{mol/s/m}^2$ (8850 lux). La hauteur des étages est de 40 cm.

Les principaux avantages du système de production hydroponique DWC sont : le flux d'eau constant, l'entretien et la manipulation aisés, l'assimilation élevée des nutriments par les plantes, la stabilité physico-chimique favorisée par le volume d'eau important (Goddek et al., 2015; Somerville et al., 2014). Le système NFT avec irrigation intermittente est quant à lui mieux adapté aux plantes en pots afin de réduire l'humidité du substrat entre deux épisodes d'arrosage.



Figure 9. Cultures hydroponiques : (a) vue d'ensemble des étagères ; (b) à gauche, étages en DWC ; à droite, étages en NFT ; (c) détail des radeaux ; (d) détail des pots en NFT.

Durant la dernière année du projet, de nouvelles surfaces de culture ont été mises en place afin de réaliser des tests de diversification horticole et de valorisation des effluents aquaponiques. Les 2 étages (surface : 16,7 m²) dédiés initialement à la culture de plantes en pots en NFT, ont été transformés en une seule surface (8,3 m²) équipées de 8 tables à marées (60 x 120 cm) expérimentales (Figure 10). La hauteur maximale de culture est de 1,4 m et l'intensité lumineuse a été doublée par rapport à la structure initiale (288 W/m²). Cette surface est divisée en 4 compartiments comportant chacun 2 tables à marées. Chaque compartiment possède un éclairage réglable en hauteur et est alimenté par minuterie de manière indépendante afin de pouvoir ajuster les photopériodes en fonction des variétés testées. Les 8 tables sont totalement découplées du système aquaponique. Elles sont irriguées à partir de 8 réservoirs indépendants, permettant de tester différentes solutions nutritives (eau aquaponique, effluent contenant des matières solides, solution hydroponique standard, ...) et schémas d'irrigation.

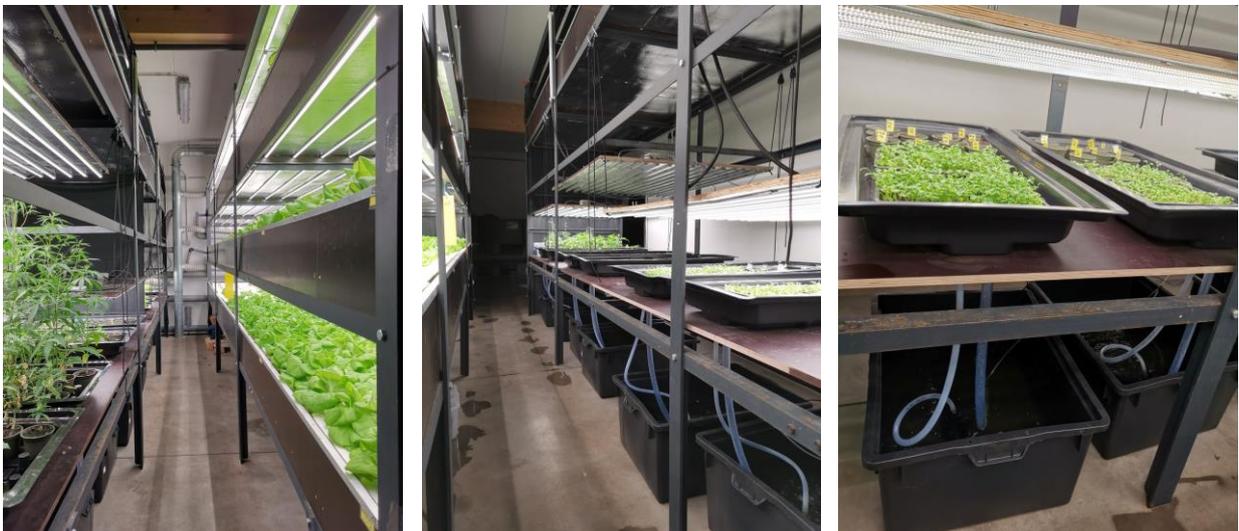


Figure 10. Vue d'ensemble des 2 étagères de culture hydroponique et détails de la nouvelle surface équipée de tables à marées.

3.4. Filtration – circulation d'eau

Le système de filtration comprend une filtration mécanique, une filtration biologique et une stérilisation UV (Figures 11 et 12). La filtration mécanique est assurée par un tambour filtrant (Figure 12a) possédant une maille de 60 µm (Ratz BaseDrum 30 ; 104 W) alimenté par une pompe de pression de 1000 W (DAB Jetinox 112). Afin de réduire la quantité d'eau consommée par le tambour filtrant pour le nettoyage de la maille et l'élimination des déchets solides, une boucle supplémentaire comportant une décantation (vortex, bassin cylindroconique en polyester stratifié, volume : 3 m³, diamètre : 1,6 m) a été installée en amont du tambour (en gris à la Figure 11, Figure 12b). Une étude comparative des systèmes de filtration mécanique : tambour/vortex/vortex+tambour réalisée durant la phase d'élevage du tilapia a montré l'inefficacité de ce système de décantation dans les conditions de l'étude et l'utilisation de ce système a été abandonnée par la suite.

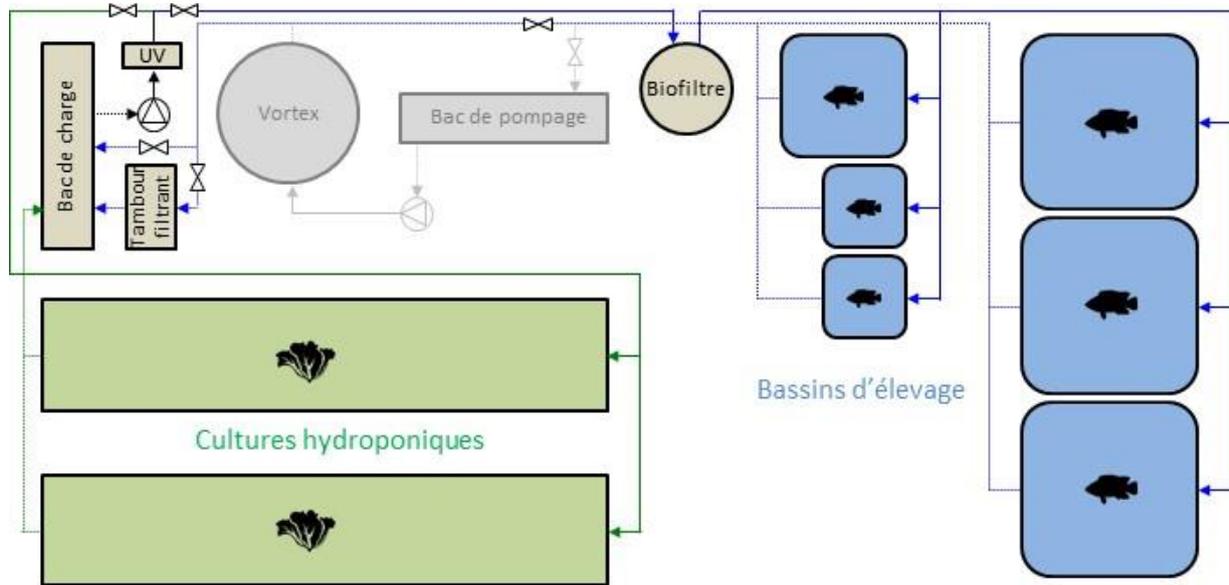


Figure 11. Schéma 2D du système pilote aquaponique illustrant la position des différents compartiments et la circulation d'eau. En gris : système de décantation optionnel mis en place pour des essais d'optimisation de la filtration mécanique. \times = vanne ; \triangle = pompe.

Après filtration mécanique, l'eau collectée des bassins d'élevage arrive dans le bac de charge. Ce bac récolte également l'eau provenant des cultures hydroponiques. Il comporte une résistance (thermoplongeur téflon) de 3000 W contrôlée par thermostat pour la régulation thermique, un bulleur et un apport d'eau neuve. L'apport d'eau neuve est contrôlé par un flotteur de manière automatique pour compenser les pertes, en parallèle une vanne permet également de le contrôler manuellement au besoin. La réserve d'eau neuve est située à l'extérieur du bâtiment, contenue dans 2 cuves IBC de 1000 L (Figure 12c). Cette réserve permet de combler les pertes subites du système et également de déchlorer (par aération) l'eau avant son ajout dans le système.

Du bac de charge, l'eau est ensuite pompée (pompe BlueEco 500 W) vers le stérilisateur UV (AS-UV Synergy 25, 95 W), puis dirigée vers 2 boucles : la boucle comprenant les cultures hydroponiques et la boucle comprenant le biofiltre et les bassins d'élevage. La stérilisation UV protège les plantes et les poissons contre une éventuelle dissémination de micro-organismes pathogènes d'un compartiment à un autre.

Le choix de la pompe de circulation s'est porté sur un modèle sans balai (moteur brushless) dont l'efficacité est supérieure à celle d'un moteur à courant continu classique. A performance équivalente (débit 18 m³/h à une hauteur de 8 m), la première présente une puissance de 0,5 kW, contre 1 kW pour la seconde. Ce choix permet une réduction de la consommation électrique globale du système de 6,9%, soit une économie de 4380 kWh/an (830 €/an). Considérant la différence de prix entre ces 2 pompes (1200 €) et le fait qu'une pompe de réserve est nécessaire, la différence de prix à l'achat (2400 €) est amortie en 2,9 ans.

Le débit total circulant dans le système est égal à 14,3 m³/h, dont 12,7 m³/h dans le compartiment piscicole (soit 1,7 renouvellement/h) et 1,6 m³/h dans le compartiment horticole (soit 0,2 renouvellement/h).

La filtration biologique (nitrification) est assurée par un filtre à lit fluidisé. Il s'agit d'une cuve (LDPE) de 1500 L (Figure 12d) contenant 500 L de media de filtration (HDPE, 10/12 mm, surface spécifique : 800 m²/m³, densité : 0,96) maintenus en suspension et brassés par le courant d'eau et un important bullage. Une aération importante assure également l'apport d'oxygène nécessaire aux bactéries pour les processus de respiration et nitrification.

Le circuit est dimensionné pour recevoir jusqu'à 4 kg/aliment/j. Pour chaque kg d'aliment distribué, environ 250 g de matières solides sont excrétés par les poissons et 30 g de NH₃/NH₄⁺. La nitrification de ces déchets azotés dissous produira environ 106 g de NO₃⁻, soit une augmentation de la concentration en NO₃⁻ dans le système de 6 mg/L.

Les bassins d'élevage sont alimentés en eau à partir du biofiltre par gravité. Cette conception et la disposition des différents compartiments permettent de faire circuler l'eau dans l'ensemble du système avec une seule pompe de circulation.



Figure 12. Illustration de différents équipements du système : (a) tambour filtrant, bac de charge et stérilisation UV ; (b) décanteur (vortex) ; (c) réserve d'eau d'appoint ; (d) biofiltre.

Le chauffage de l'eau étant un poste relativement important de consommation électrique, un essai a été réalisé afin de remplacer la résistance (3 kW) par une pompe à chaleur air-eau (Zodiac Z200 ; 1,2 kW) moins énergivore. Cependant, après quelques semaines de fonctionnement, un fouling bactérien important au niveau de l'échangeur thermique a entravé le bon fonctionnement de l'appareil et son

utilisation a été abandonnée. Une solution possible serait l'installation d'un circuit secondaire avec échangeur thermique eau-eau.

3.5. Aération – ventilation – sécurité

Une turbine soufflante (Esam TecnoJet 2V, 1,1 kW, Figure 13a) produit en continu de l'air sous pression distribué aux différents compartiments (bassins d'élevage, bacs de culture hydroponique DWC, bac de charge, biofiltre) grâce à un réseau de tuyaux et de bulleurs.

Un système de ventilation permet de maintenir le taux d'humidité relative entre 65 et 80% (Figure 13b). Il comprend un ventilateur d'extraction et un ventilateur de pulsion (Cairox TT MIX 250, 900 m³/h, 177 W) contrôlés par des variateurs de vitesse, assurant près de 3 renouvellements d'air/h et un échangeur de chaleur double flux (Vent-Axia HR500), limitant les pertes thermiques induites par l'introduction d'air venant de l'extérieur pour oxygéner les plantes et les poissons, et par l'expulsion d'air pulsé à l'extérieur pour éliminer l'humidité. L'extraction est réalisée au-dessus des plans d'eau et la pulsion à l'arrière des surfaces de culture. L'air aspiré à l'extérieur passe au travers d'un filtre afin d'éviter l'entrée d'insectes dans le bâtiment. Une gaine de pulsion supplémentaire couplée à une batterie de chauffe (CVA-MPI, 2 kW) permet le chauffage de l'air du local.



Figure 13. (a) Turbine d'aération ; (b) système de ventilation.

Un système d'alarme permet de détecter immédiatement les défaillances techniques pouvant menacer le bon fonctionnement du système et la survie des poissons : arrêt de la pompe de circulation, arrêt de la turbine d'aération, perte de courant générale. Il s'agit d'une centrale d'alarme (Bentel KYO 8-32) reliée à un transmetteur gsm et alimenté par une batterie (7 Ah) de secours. La boucle d'alarmes (normalement fermée) est reliée à un capteur de pression d'eau (Telemecanique, Nautilus Square D) à la sortie de la pompe de circulation et un capteur de pression d'air (Telemecanique) sur le circuit d'aération.

En cas de coupure de courant, un groupe électrogène (SDMO HX 4000, 4 kW, 230 V) permet de prendre en charge l'alimentation électrique des éléments vitaux du système (pompe de circulation, turbine).

3.6. Local d'abattage

L'atelier d'abattage a été aménagé dans un ancien laboratoire adjacent au pilote de production, mis à disposition par le CTA. Il s'agit d'un local fermé de 14 m², présentant un accès aisé et des parois lavables. Il a été équipé avec le mobilier et le matériel (évier 2 bacs + égouttoir, table – plan de travail inox, lave-main + distributeur savon – papier, étagères + poubelle, frigo, machine à glace, balances) nécessaires à l'abattage et la manipulation des poissons dans des conditions d'hygiène adéquates ainsi qu'au respect de la chaîne du froid (Figure 1).



Figure 14. Aperçu du local d'abattage.

4. COÛTS

L'ensemble des coûts relatifs à la construction et la mise en place du système sont repris dans le tableau 3. Ces coûts ne reprennent que le matériel, la main d'œuvre nécessaire à la construction ayant été fournie par le CERER, le CEFRA et le CTA.

Tableau 3. Coûts d'installation et des équipements du système aquaponique.

Matériel/équipement	Quantité/ dimension	Unité	Prix unitaire (€)	Prix total HTVA (€)
Bâtiment				
Bâtiment fermé (béton cellulaire) - norme REI 60	105	m ²	164	17200
Distribution électrique	105	m ²	41	4300
Système ventilation	300	m ³ bâtiment	19	5750
Sous-total				27250
RAS				
Bassins polyester/fibre de verre	7,6	m ³	789	6000
Filets nylon - protection bassins	6	pc	70	420
Nourrisseurs automatiques 12/24V (5kg)	6	pc	200	1200
Système hydraulique PVC	19	m ³ eau RAS	379	7200
Biofiltre lit fluidisé	1,5	m ³	413	620
Bassin décantation cylindroconique GRP	3	m ³	607	1820
Bac de charge rectangulaire GRP	0,5	m ³	2000	1000
Tambour filtrant 20 m ³ /h	20	m ³ /h	160	3200
UV 20 m ³ /h	20	m ³ /h	44	870
Cuve IBC 1 m ³	1	m ³	60	60
Chauffage eau: résistance 3 kW	10	m ³	32	320
Chauffage eau: PAC 1,2 kW	20	m ³	116	2320
Système alarme	1	pc	1000	1000
Pompe circulation 500 W x2	20	m ³ eau RAS	145	2900
Pompe de pression 1000 W (tambour) x2	20	m ³ eau RAS	33	650
Soufflante air 1100 W x2	20	m ³ eau RAS	75	1500
Diffuseurs air	20	m ³ eau RAS	30	600
Groupe électrogène 2 kW	20	m ³ eau RAS	40	800
Sous-total				32480
Hydroponie				
Etagères métalliques	50	m ² culture	28	1400
Bacs DWC (panneaux bakélistés + EPDM)	33	m ² culture	76	2500
Rafts polystyrène	33	m ² culture	7	240
Plaques métalliques (syst. irrigation plantes en pots)	17	m ² culture	15	250
Eclairage LED 7,2 kW	50	m ² culture	173	8650
Sous-total				13040
Local d'abattage				
Evier + robinet				800
Balances				1000
Frigo				290
Table - plan de travail				260
Petit matériel (étagères, bac transport, poubelle...)				1070
Plomberie				420
Electricité				400
Cuve transport 300 L				930
Sous-total				5170
TOTAL HTVA				77940

IV. PRODUCTION : MODÈLE TILAPIA

1. PLAN DE PRODUCTION

Le plan théorique établi pour la production expérimentale de tilapia repose sur la production simultanée de 6 cohortes de poissons, ce qui optimise l'utilisation du volume d'élevage, garantit une production continue de poissons à taille commerciale et permet de maintenir une biomasse relativement stable dans le système d'élevage. Par conséquent, la ration alimentaire distribuée quotidiennement varie peu, ce qui assure également un apport constant en nutriments pour la croissance végétale.

Les alevins entrent dans le système à partir d'un poids corporel de 5 g (Tableau 4). Afin de maintenir des conditions d'élevage optimales pour l'espèce, la densité maximale est fixée à 60 kg/m³, ce qui permet de maintenir une qualité d'eau adéquate, même en période de nourrissage et sans apport d'oxygène pur. La taille commerciale, qui peut varier en fonction des attentes des clients, est supérieure à 500 g. La dernière phase du grossissement étant réalisée en bassin de 2 m³, l'objectif est, pour chaque cohorte, d'amener 200 poissons à une taille supérieure à 500 g.

Tableau 4. Caractéristiques du plan de production théorique de tilapia décrivant la distribution des 6 cohortes dans les 6 bassins d'élevage.

TILAPIA	Bassin 1	Bassin 2	Bassin 3	Bassin 4	Bassin 5	Bassin 6	Total
Poids initial (g)	5	32	83	159	257	379	
Poids final (g)	32	83	159	257	379	524	
n jours	50	50	50	50	50	50	300
Taux de mortalité (%)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	5
n initial	210	208	207	205	203	202	
n final	208	207	205	203	202	200	
Volume (m ³)	0,3	0,3	1,0	2,0	2,0	2,0	7,6
Biomasse max (kg)	7	17	33	52	76	105	290
Densité max (kg/m ³)	22	57	33	26	38	52	57

Selon les courbes de croissance établies préalablement avec la souche du CEFRA, la durée de la période de grossissement pour amener un poisson de 5 à 525 g est de 300 jours (Figure 15). Puisqu'il est possible d'élever 6 cohortes simultanément, le turn-over de remplacement d'une cohorte est de 50 jours.

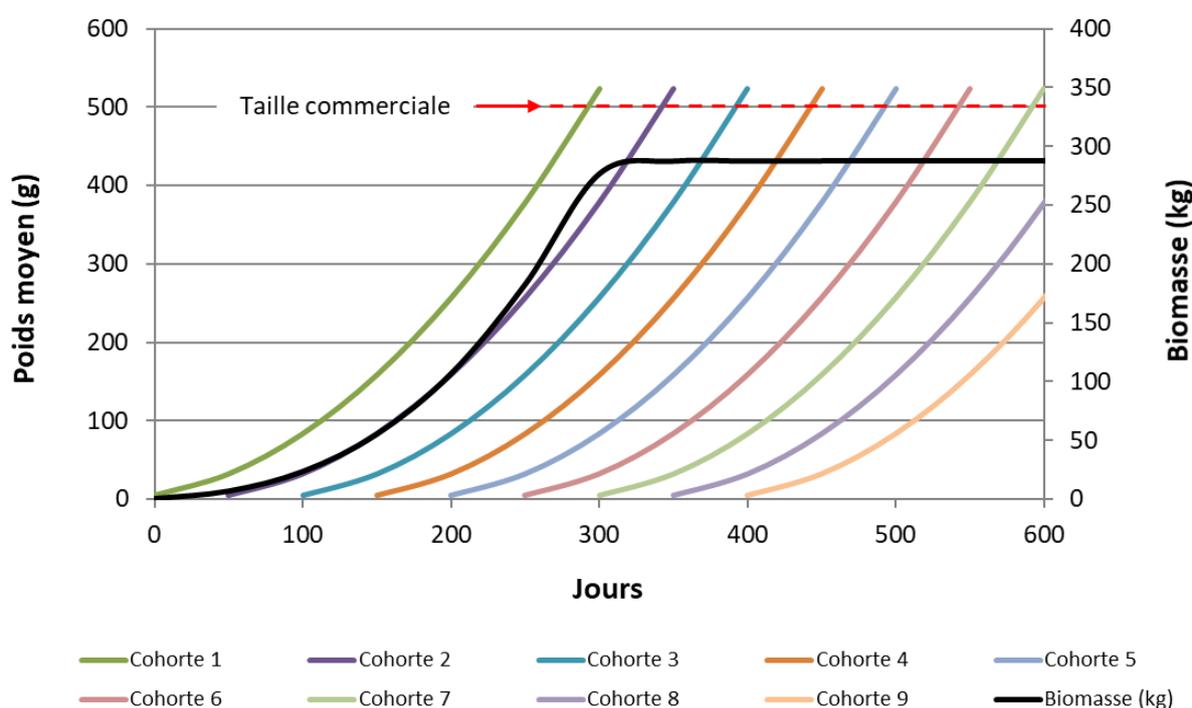


Figure 15. Courbes de croissance théoriques du tilapia illustrant la distribution des cohortes dans le temps et la biomasse totale dans le système aquaponique.

Considérant un taux de mortalité global de 5% sur l'ensemble de l'élevage (0,8% sur chacune des 6 phases), chaque cohorte introduite dans le système doit avoir un effectif théorique de 210 individus.

Selon ce plan, il est possible de produire annuellement 765 kg de tilapia à taille commerciale, soit une productivité journalière de 0,28 kg/m³/j (Tableau 5). Les besoins alimentaires pour cette production sont estimés, sur base d'un taux de conversion alimentaire¹ (FCR) global de 1,2 sur l'ensemble des phases d'élevage, à 918 kg/an, soit 2,5 kg/j.

Tableau 5. Productivité et besoins alimentaires théoriques de la production expérimentale de tilapia.

Volume (m ³)	7,6
Densité max (kg/m ³)	60
Production (kg/an)	765
Productivité (kg/m ³ /j)	0,28
Taux de conversion moy (FCR)	1,2
Aliment (kg/an)	918
Aliment (k/j)	2,5

¹ Le taux de conversion alimentaire mesure l'efficacité de conversion alimentaire.

$$\text{FCR (Feed Conversion Ratio)} = \frac{\text{Aliment distribué (kg)}}{\text{Biomasse finale} - \text{Biomasse initiale (kg)}}$$

La production végétale n'a pas été planifiée immédiatement aussi précisément que la production piscicole car elle dépend de nombreux facteurs et nécessitait des essais dans les conditions de culture propres au pilote aquaponique avant d'être plus clairement définie. Ces facteurs comprennent notamment : la variété de plante cultivée (besoins nutritionnels, cycles de production, ...), les conditions climatiques (température, ...), le type d'éclairage (naturel, artificiel), le taux de nutriments dans l'eau et donc indirectement le taux de protéines de l'aliment, la manière de gérer le renouvellement d'eau et les déchets solides dans le système, etc.

Etant donné les nombreuses variables pouvant influencer la balance entre la production piscicole et végétale, la question de la relation entre l'apport d'aliment et l'utilisation des nutriments par les plantes, et par conséquent du rapport de dimensionnement entre le compartiment piscicole et le compartiment hydroponique, n'est pas tranchée (Lennard & Goddek, 2019). Plusieurs règles et modèles ont été établis mais la plus utilisée reste celle de Rakocy (2006) qui préconise un taux d'alimentation (Feeding Rate Ratio) de 60 à 100 g/m² culture/j. Ce taux a été établi dans les conditions du système aquaponique UVI (University of Virgin Islands) en élevage de tilapia avec un aliment contenant 32% de protéines. Ce taux peut évidemment être différent selon les combinaisons plantes-poissons et les conditions de culture. Somerville et al. (2014) font une distinction entre les besoins nutritionnels des légumes-feuilles (moins exigeants) et de légumes-fruits (plus exigeants), rapportant des taux d'alimentation respectifs de 40-50 et 50-80 g/m²/j. La valorisation des nutriments présents dans les déchets solides en système découplé peut même abaisser ce taux jusqu'à 10-15 g/m²/j (Lennard & Goddek, 2019).

Le système pilote de Strée a été dimensionné, en partie à partir de ces éléments, et en partie grâce à des essais préliminaires réalisés sur un système expérimental de plus petites dimensions installé au CEFRA et basé sur la même technologie. Sur base de ces données, nous avons choisi d'installer une surface de culture de 50 m², correspondant à un taux d'alimentation de 50 g/m²/j pour une ration alimentaire moyenne de 2,5 kg d'aliment distribué par jour pour le tilapia. Cette surface de culture est divisée en une partie dédiée aux cultures sur radeaux (DWC, 33 m²) et une autre adaptée à la culture de plantes en pots (NFT, 17 m²). Pour chaque type de culture, différentes variétés ont été testées afin d'identifier les mieux adaptées aux conditions de culture propres au système pilote aquaponique (température, humidité, éclairage, ...).

Les plantes retenues pour la culture en pot sont le basilic grand vert, le persil géant d'Italie (plat), la coriandre et la roquette sauvage. Les semences « amateurs » ont été fournies par Ets Henrion (Huy, Belgique).

Trois variétés de laitue (*Lactuca sativa*) adaptées aux conditions de culture, et en particulier aux températures élevées, ont été choisies pour la culture sur radeaux : pommée (Flandria), feuille de chêne (Kitona) et batavia (Othilie). Les semences professionnelles de ces variétés sont fournies par Rijk Zwaan (Merksem, Belgique).

Selon les rendements rapportés en aquaponie et hydroponie pour les laitues et le basilic, soit environ 40-50 kg/m²/an et 20-30 kg/m²/an respectivement (Rakocy et al., 2006 ; Barbosa et al., 2015 ; Rana et

al., 2018; Ayipio et al., 2019), la production annuelle de laitues et plantes aromatiques attendue dans le pilote aquaponique peut être estimée à 1320-1650 kg et 340-510 kg respectivement, soit une production annuelle de 1660 à 2160 kg. Selon cette projection, la production d'1 kg de poissons soutiendrait une production végétale de 2 à 3 kg.

2. QUALITÉ DE L'EAU

2.1. Mesures

Après divers tests hydrauliques, le système a pu être complètement mis sous eau le 23/01/2018. Un peu plus d'un mois a ensuite été nécessaire pour ensemercer le biofiltre jusqu'à atteindre une activité nitrifiante suffisante au démarrage de la production (Figure 16). Le 05/03/2018, 25 tilapias ont été transférés afin de valider les bonnes conditions de transport et d'élevage dans le nouveau circuit. Ensuite, les autres lots de poissons ont été transférés et le 22/03/2018, la production de tilapia a débuté. La production est restée uniquement piscicole jusqu'octobre 2018. Fin octobre, les premières plantes étaient introduites sur les tables de culture et en novembre 2018, la production aquaponique a réellement démarré.

La gestion journalière de la qualité de l'eau est basée sur la mesure d'un certain nombre de paramètres : température, pH, conductivité, alcalinité, concentration en oxygène dissous (O_2), azote ammoniacal total (TAN, NH_4^+/NH_3), nitrites (NO_2^-), nitrates (NO_3^-) (Tableaux 6 et 7)

Tableau 6. Paramètres mesurés pour le contrôle de la qualité de l'eau : consignes, fréquences et méthodes de mesure.

Paramètre	Consigne	Fréquence mesure	Méthode de mesure
Température	25-27 °C	1x/j	Multimètre Hach HQ40D
pH	6,5-7	1x/j	Multimètre Hach HQ40D
Conductivité	1000 - 2000 $\mu S/cm$	1x/sem	Multimètre Hach HQ40D
Alcalinité	> 20 mg $CaCO_3/L$	1x/sem	Hach Digital titrator
O_2	> 6 ppm	1x/j	Multimètre Hach HQ40D
$NH_4^+ - NH_3$	Min < 2 ppm	3x/sem	Spectrophotomètre (Hach DR2010) - Méthode Nessler
NO_2^-	Min < 1 ppm	3x/sem	Spectrophotomètre (Hach DR2010) - Méthode diazotation
NO_3^-	150 – 500 ppm	3x/sem	Spectrophotomètre (Hach DR2010) – Méthode Réduction au cadmium (Hach NitraVer 5)

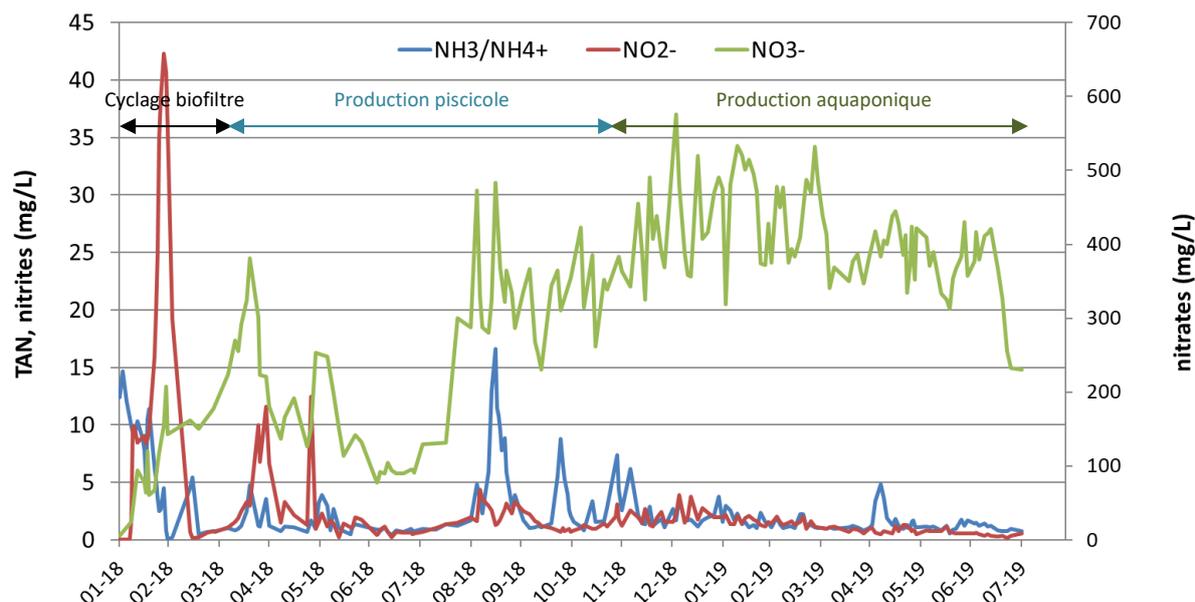


Figure 16. Evolution des concentrations en TAN ($\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$), nitrites (NO_2^-) et nitrates (NO_3^-) durant le démarrage du système et la phase de production de tilapia.

Tableau 7. Valeurs moyennes (\pm écarts-types) des paramètres physico-chimiques de l'eau durant la période de production de tilapia.

	Temp (°C)	pH	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Alcalinité (mg CaCO_3/L)	O_2 (mg/L)	$\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ (mg/L)	NO_2^- (mg/L)	NO_3^- (mg/L)
Production piscicole 22/03/18 - 31/10/18	24,5 \pm 0,6	7,3 \pm 0,6	793 \pm 110	40 \pm 26	7,5 \pm 0,5	1,8 \pm 1,2	1,3 \pm 0,7	403 \pm 65
Production aquaponique 01/11/18-26/08/19	24,2 \pm 1,2	6,8 \pm 0,4	996 \pm 107	40 \pm 25	7,5 \pm 0,5	1,7 \pm 1,2	1,3 \pm 0,7	403 \pm 65

Afin de vérifier la qualité nutritionnelle de l'eau pour la croissance végétale et l'absence de certains micro-polluants, des dosages complets des macro-, micro-nutriments et certains éléments traces sont réalisés ponctuellement : azote total (N), phosphore total (P), carbone (C), potassium (K), calcium (Ca), magnésium (Mg), soufre (S), fer (Fe), manganèse (Mn), bore (B), cuivre (Cu), zinc (Zn), molybdène (Mo), sélénium (Se), nickel (Ni), sodium (Na), aluminium (Al), chrome (Cr), cobalt (Co), mercure (Hg), arsenic (As), plomb (Pb), cadmium (Cd) (Tableau 8). Ces analyses sont réalisées par le Bureau Environnement et Analyses de Gembloux (BEAGx). La minéralisation des échantillons se fait à l'eau régale (mélange d'acide chlorhydrique et d'acide nitrique). Puis l'analyse des éléments est réalisée en majorité par spectrophotométrie d'absorption atomique (utilisation de flamme, four, génération d'hydrures, vapeur froide) selon les éléments. Seuls trois éléments sont analysés par des techniques différentes : le phosphore, il s'agit d'une spectrophotométrie d'absorption moléculaire avec utilisation de

phosphomolybdate ($H_3PMo_{12}O_{40}$) ; la mesure du soufre est réalisée par néphélométrie au sulfate de baryum ($BaSO_4$) ; enfin, l'azote organique et ammoniacal est mesuré par la méthode Kjeldahl.

Tableau 8. Concentrations moyennes en nutriments, oligo-éléments et micropolluants dans l'eau du système aquaponique et dans l'eau de renouvellement (eau de distribution) durant la période de production de tilapia (n = nombre d'échantillons analysés).

	Unité	n	Eau aquaponie	n	Eau renouvellement
N_{tot}	mg/L	5	116,0	3	6,0
C	mg/L	5	9,6		
P-P₂O₅	mg/L	5	3,0	3	< 0,04
Ca-CaO	mg/L	5	98,1	3	89,0
Mg-MgO	mg/L	5	29,9	3	23,0
K-K₂O	mg/L	5	33,3	3	1,9
S-SO₄	mg/L	5	27,8	3	14,7
Na-Na₂O	mg/L	2	20,4	3	9,1
Fe	µg/L	2	265	3	< 4
Mn	µg/L	2	45	3	1,5
Zn	µg/L	2	491	3	347
Al	mg/L	2	2,5	1	< 4
Mo	µg/L	1	15,1	3	0,7
Se	µg/L	2	0,1	1	< 4
Cu	µg/L	2	24,7	3	6,8
Ni	µg/L	2	76,6	1	< 4
Co	µg/L	2	1,0		
Cr	µg/L	2	1,8	1	< 0,4
As	µg/L	2	0,0	1	< 0,4
Cd	µg/L	2	0,1	1	< 0,4
Hg	µg/L	2	0,1	1	< 0,4
Pb	µg/L	2	5,6	1	< 0,4

2.2. Contrôle

2.2.1. pH

Le contrôle du pH est un aspect très important de la gestion physico-chimique d'un système aquaponique couplé. En effet, le processus de nitrification réalisé par les colonies bactériennes du biofiltre induit une acidification de l'eau (par relargage de protons lors de la réaction d'oxydation de l'ammoniac et des nitrites), accompagnée d'une diminution de l'alcalinité et donc du pouvoir tampon

de l'eau. Il est par conséquent nécessaire de contrôler le pH pour le maintenir dans une gamme de valeurs compatibles avec les organismes présents dans le système. Alors que le pH optimal pour les poissons et bactéries nitrifiantes est compris entre 7 et 8, l'efficacité d'absorption des nutriments par les plantes et donc leur croissance sont maximales à pH 5,5-6,0 (Wilson Lennard & Goddek, 2019). En aquaponie couplée, la valeur de pH choisie est donc un compromis entre les valeurs optimales pour chaque type d'organismes présents et doit être contrôlée de manière précise.

L'apport de pouvoir tampon dans le système, et donc la régulation du pH sont réalisés, d'une part grâce à l'apport d'eau neuve dans le système (si celle-ci présente une dureté suffisante), d'autre part par l'ajout de substances tampons qui apporte de l'alcalinité (carbonates et bicarbonates). Durant la période de production expérimentale de tilapia, l'apport d'eau neuve moyen était de 2,1 %/j du volume total du circuit (soit 185 L/kg aliment distribué). Cet apport reste limité car il est important de trouver un équilibre et de ne pas lessiver les nitrates indispensables aux plantes.

L'apport de pouvoir tampon s'est réalisé par l'ajout journalier (50 g) de dolomie micronisée ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) et de bicarbonate de potassium (KHCO_3). En plus de leur action régulatrice du pH, ces substances apportent un complément de nutriments essentiels pour les plantes (et non toxiques pour les poissons). L'ajout de KHCO_3 est assuré en continu sous forme de solution saturée, par une pompe péristaltique contrôlée par une sonde pH (Milwaukee MC122). En moyenne, l'apport annuel de dolomie dans le circuit était de 15,5 kg, et celui de bicarbonate de potassium de 33,8 kg, soit 2,4 et 5,3 $\text{g}/\text{m}^3/\text{j}$ respectivement.

2.2.2. Oligo-éléments

Certains micro-nutriments et oligo-éléments essentiels à la croissance des plantes ne peuvent être obtenus, tout du moins en suffisance, par les eaux issues du compartiment aquacole. Des analyses ont permis d'identifier ces éléments potentiellement manquants (Fe, Mn, Mo, Cu, Ni, B) et de les apporter sous forme de solution distribuée (en continu par une pompe péristaltique) directement dans le compartiment hydroponique (Tableau 9).

Tableau 9. Apports journaliers en micro-nutriments et oligo-éléments dans le compartiment hydroponique.

Eléments	Apports ($\text{mg}/\text{m}^3/\text{j}$)
Fe	28,2
Mn	17,7
Mo	0,36
Cu	0,36
Ni	0,90
B	0,13

3. PRODUCTION PISCICOLE

3.1. Démarrage

Afin de suivre au mieux le plan de production établi et de démarrer la production piscicole avec des groupes de poissons de tailles échelonnées, 6 cohortes de tilapia ont été préalablement produites au CEFRA. Cette production a démarré en 2017, durant la construction du système pilote.

Les poissons produits sont issus de croisements mâle YY x femelle XX et sont donc 100 % mâles (XY). La croissance des mâles étant largement supérieure à celle des femelles, il est essentiel de travailler avec des groupes monosexes afin d'optimiser la production.

Entre le 16 et le 21/03/2018, les 6 cohortes de tilapia (poids moyens compris entre 20 et 455 g ; Tableau 10) produites à Tihange ont été transférées à Strée (biomasse totale = 259 kg). Entre mars et octobre 2018, les structures hydroponiques n'étaient pas encore fonctionnelles et la production était uniquement piscicole. La production aquaponique a duré 10 mois, de novembre 2018 à août 2019.

Tableau 10. Caractéristiques des cohortes de tilapia lors de la mise en charge en mars 2018.

Bassin	Volume (m ³)	N	Poids moyen (g)	Biomasse (kg)	Densité (kg/m ³)
1	2	188	455	85,5	42,8
2	2	217	334	72,5	36,2
3	2	203	233	47,3	23,6
4	1	229	140	32,1	32,1
5	0,3	209	83	17,3	57,8
6	0,3	220	20	4,4	14,7

3.2. Croissance

Au total, 10 cohortes de tilapia ont été introduites dans le système, soit 1960 individus. Les poissons étaient nourris avec un aliment commercial formulé pour le tilapia (Alltech Coppens, PRE-GROWER-EF 2mm, PEARL EF 3-4,5 mm, Tableau 11).

Le taux de croissance spécifique² était compris entre 0,38 et 0,89 %/j suivant les cohortes, avec une moyenne de 0,55 %/j (Tableau 12). Les courbes de croissance sont reprises à la Figure 17.

² SGR (Specific Growth Rate, %/j) = $100 \times \frac{\ln(\text{Poids moyen final}) - \ln(\text{Poids moyen initial})}{n \text{ jours}}$

Tableau 11. Composition des aliments tilapia.

		PRE-GROWER- EF 2 mm	PEARL EF 3-4,5 mm
%	Protéines brutes	50	37
	Matières grasses	15	10
	Cellulose brute	1	2,1
	Cendres brutes	8,9	6,8
	Calcium	1,9	1,2
	phosphore	1,29	1,1
	Sodium	0,4	0,2
mg/kg	Cuivre	5,5	5
	Iode	5,5	5
	Fer	66	60
	Manganèse	22	20
	Sélénium	/	0,1
	Zinc	66	60

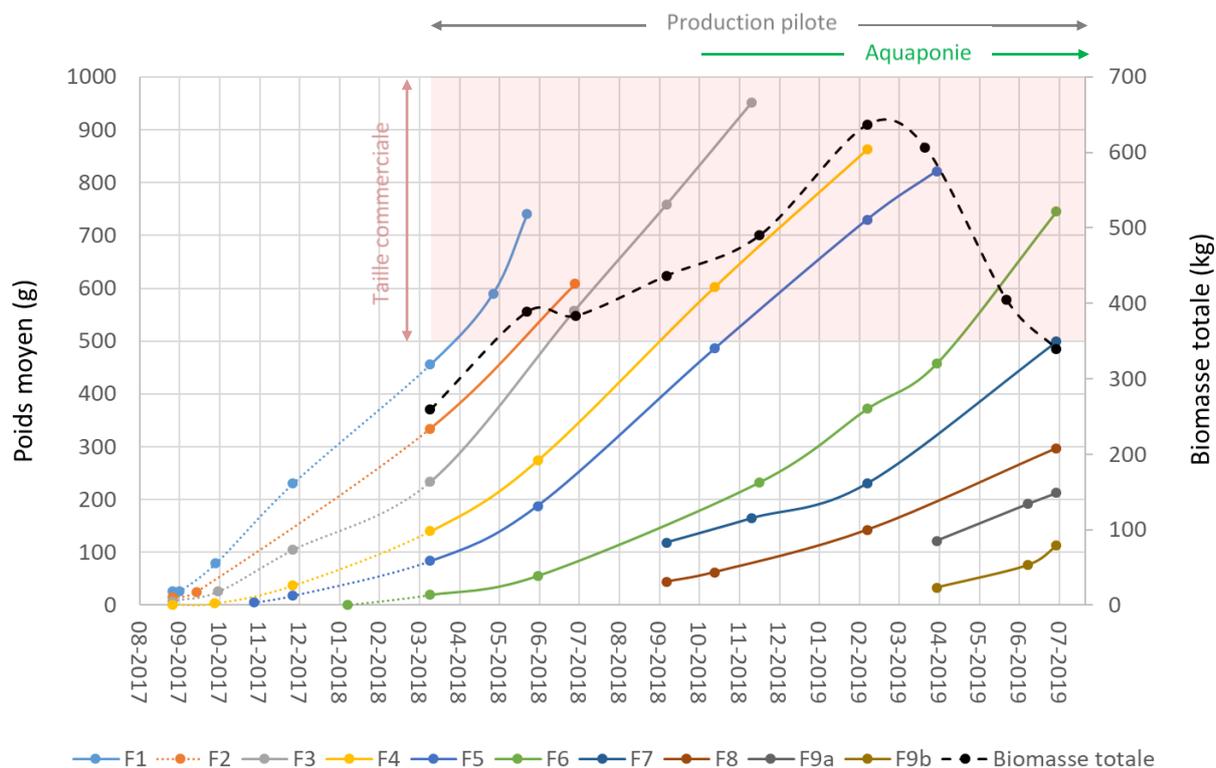


Figure 17. Evolution de la biomasse totale et des poids moyens des 10 cohortes de tilapia (F1 à F9b) en production dans le système aquaponique entre mars 2018 et juillet 2019.

Les taux de croissance relativement faibles observés s'expliquent par un rationnement réduit durant toute la période de production. La croissance a été volontairement ralentie car les circuits de distribution des produits n'étaient pas en place au début du projet et il était nécessaire de gérer la production afin de ne pas dépasser les capacités techniques du système (densité de poissons et capacités de filtration biologique). La biomasse totale a en effet dépassé les 600 kg, avant la mise en place de ventes régulières de poissons, ce qui représente plus du double de la valeur prévue dans le plan théorique (290 kg).

3.3. Survie

Excepté dans le lot F4 qui a subi une mortalité de 8%, la survie a été très élevée durant toute la période de production, avec une mortalité globale de 1,2% (Tableau 12, Figure 18).



Figure 18. Evolution de la mortalité (journalière et cumulée) durant la production aquaponique de tilapia.

Aucune pathologie ou parasitose n'a été observée durant toute la phase de production.

3.4. Production

La Figure 19 représente l'évolution de la ration alimentaire distribuée, de la biomasse totale et de l'effectif total de tilapia dans le système aquaponique. Au total, 1237 kg d'aliment ont été distribués pour une production de 860 kg de tilapia, soit une productivité de 658 kg/an et 0,24 kg/m³/j avec une quantité annuelle d'aliment de 946 kg. Le taux de conversion moyen était de 1,42, ce qui traduit des performances moyennes liées au ralentissement volontaire de la croissance par la réduction de la ration.

Tableau 12. Taux de croissance spécifique (SGR), de conversion alimentaire (FCR) et de survie des tilapias en production aquaponique.

Cohorte	SGR (%/j)	FCR	Mortalité (%)
F1	0,66	1,34	0,0
F2	0,54	1,45	0,0
F3	0,38	1,60	0,5
F4	0,44	1,95	7,9
F5	0,51	1,66	1,4
F6	0,69	1,30	0,0
F7	0,42	1,36	0,0
F8	0,55	1,41	0,0
F9a	0,40	1,98	0,7
F9b	0,89	1,16	0,7
Total	0,55	1,42	1,2

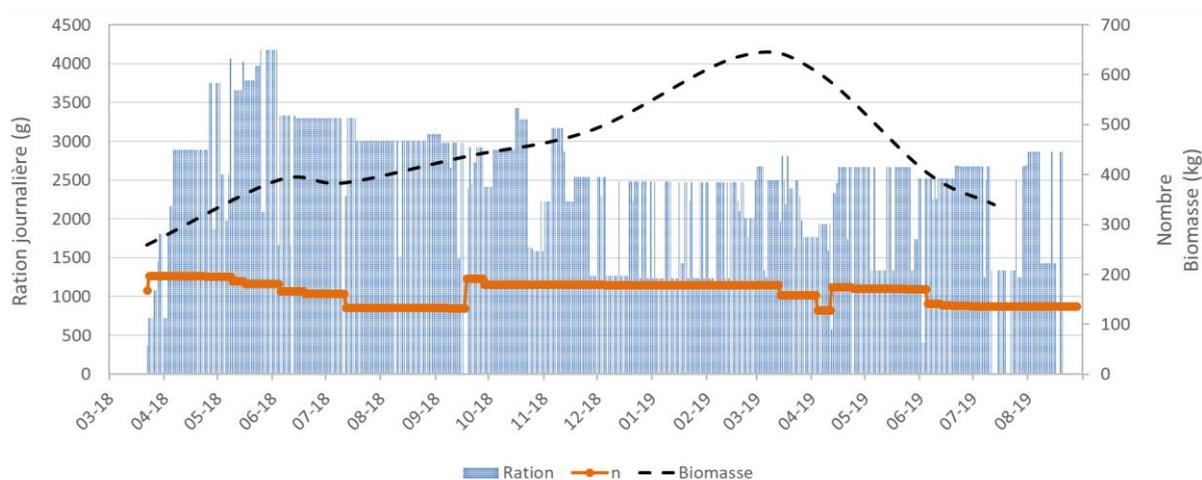


Figure 19. Evolution de la ration alimentaire distribuée, de la biomasse totale et de l'effectif total de tilapia dans le système aquaponique.

3.5. Plan ajusté

Sur base des résultats de la production expérimentale, nous pouvons adapter le modèle de croissance (voir §IV.1) et déduire une durée moyenne de grossissement de 390 j (au lieu de 300 j dans le plan théorique) pour atteindre un poids de 524 g (Figure 20). A noter qu'il existe une demande commerciale pour les poissons de cette taille (300-500 g) mais qu'il est également intéressant de pouvoir produire des poissons de plus grande taille pour pouvoir cibler une gamme 600-800 g (voir rapport annexe : étude de marché poissons). Les poissons issus de la production pilote et vendus en circuit court avaient un poids moyen de 500 à 950 g (voir §IV.3.2).

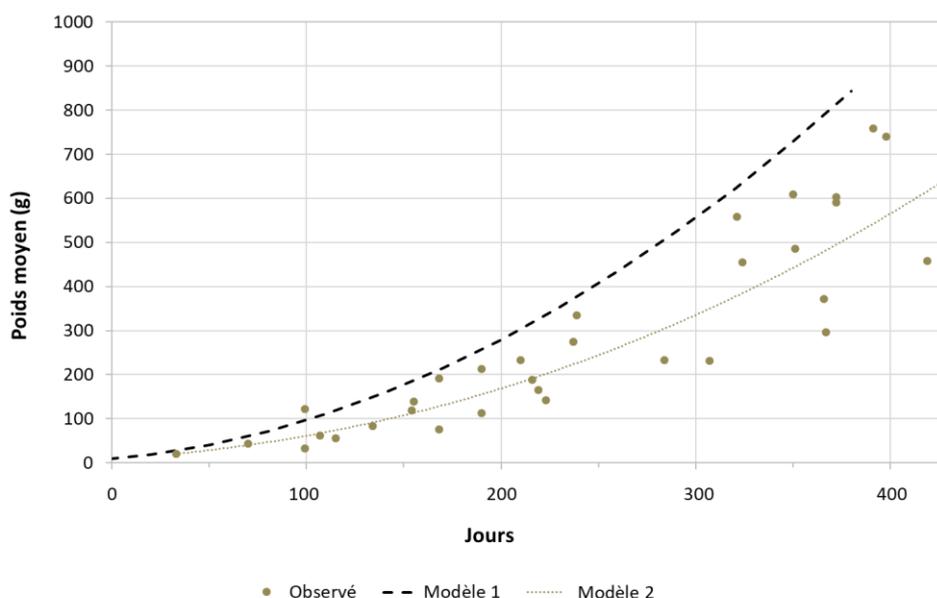


Figure 20. Comparaison du modèle de croissance théorique (Modèle 1) avec les données de croissance observées, et proposition d'un nouveau modèle basé sur ces observations (Modèle 2).

Si le nouveau modèle de croissance reflète les données réelles obtenues, des performances plus élevées correspondant au modèle théorique proposé sont tout à fait atteignables en améliorant la gestion des stocks en place et l'écoulement des poissons à taille commerciale (sécurisation de la distribution). Le système ayant montré ses capacités de fonctionnement à plus haute densité, il est également envisageable d'augmenter les performances de production par une augmentation de la densité d'élevage (100 kg/m^3). Sur base de ces résultats, un nouveau plan de production est proposé, permettant d'atteindre un poids final de 600 g en 390 j, avec une productivité de $140 \text{ kg/m}^3/\text{an}$ ($0,38 \text{ kg/m}^3/\text{j}$), soit une production annuelle de 1065 kg avec une distribution d'aliment de 1278 kg (Tableau 13).

Tableau 13. Productivité et besoins alimentaires de la production de tilapia : valeurs observées et plan de production ajusté.

Production tilapia	Observé	Plan ajusté
Remplacement cohortes (jours)	67	65
Taille commerciale visée	524	600
Densité max (kg/m^3)	89	100
Production (kg/an)	658	1065
Productivité ($\text{kg/m}^3/\text{j}$)	0,24	0,38
Taux de conversion alimentaire moy	1,4	1,2
Aliment (kg/an)	946	1278
Mortalité (%)	1	5

4. PRODUCTION MARAÎCHÈRE

4.1. Laitues

Quatre bacs de culture sur radeaux sont dédiés à la culture de laitues (surface : $4 \times 8,3 = 33 \text{ m}^2$) (Figure 21). Trois variétés professionnelles de laitue adaptées aux hautes températures (Rijk Zwaan, thermo easy) ont été sélectionnées pour la production expérimentale : pommée (Flandria), Batavia (Olmctie), feuille de chêne (Kitonia) (Figure 22).



Figure 21. Répartition des cultures sur les étagères hydroponiques. 1 et 2 : NFT - plantes en pots (basilic, persil, coriandre, roquette) ; 3 et 4 : DWC – laitue pommée ; 5 : DWC – laitue batavia ; 6 : laitue feuille de chêne.



Figure 22. Illustration des variétés de laitues produites en aquaponie : pommée (a), batavia (b), feuille de chêne (c).

Les semis sont réalisés dans des cubes de laine de roche hydroponique (Grodan, 36x36x40 mm) en dehors des tables de culture, sous lumière tamisée, et arrosés avec de l'eau de distribution. Après la germination (3-4 jours), les jeunes plantules sont exposées à la lumière puis transplantées sur les tables de culture du système aquaponique à 7 jours (Figure 23).



Figure 23. Laitue âgée d'une semaine transplantée sur les radeaux de culture.

La densité de laitues sur les radeaux de culture est de 16,5 plantes/m². La culture est échelonnée et, chaque semaine, en moyenne 92 laitues sont récoltées et remplacées par des jeunes plantules.

Durant la période de production végétale associée au tilapia (10/11/2018 au 15/07/2019), la température et le taux d'hygrométrie moyens de l'air dans le local de culture étaient respectivement de 23,3 ± 1,9 °C et 69,4 ± 3,6 %. La qualité physico-chimique et les concentrations en nutriments de l'eau sont reprises au §IV.2.1. Aucune carence ni aucune pathologie n'ont été observées durant cette période de production. La seule perturbation nutritionnelle rencontrée était une légère nécrose marginale (tip burn) due à un problème de pompage de calcium lorsque le pH était trop élevé (>7) durant une période prolongée.

Le temps de croissance sur les tables de culture est de 5 semaines pour les laitues feuille de chêne et 6 semaines pour les batavia et pommée, pour atteindre une laitue commercialisable d'un poids moyen total (partie comestible) de 262 ± 56 g, 299 ± 70 g et 225 ± 62 g respectivement. Avec une production annuelle de 4784 laitues, la biomasse comestible totale produite s'élève à 1252 kg/an, soit une productivité de 37,6 kg/m²/an (Tableau 14). La biomasse non comestible (racines) représente 3% de la biomasse totale.

Tableau 14. Paramètres de production végétale (laitues et plantes en pots) associée à la production de tilapia.

Espèces cultivées	Laitues				Basilic	Roquette	Persil	Coriandre	Total pots
	Pommée	Batavia	FdC	Total laitues	Grand vert	Sauvage	Géant d'Italie		
Variétés									
Surface allouée (m ²)	16,7	8,3	8,3	33,3	8,3	2,8	2,8	2,8	16,7
Densité (unité/m ²)	16,5	16,5	16,5		35	35	35	35	
Roulement (semaines)	6	6	5		4	5	5	5	
Unités produites/an	2392	1196	1196	4784	3744	1248	1248	1248	7488
Poids moyen (comestible, g)	262 ± 56	299 ± 70	225 ± 62		49 ± 18	32 ± 14	27 ± 5	44 ± 10	
Biomasse comestible produite/an (kg)	626	358	269	1252	183	40	34	55	312
Biomasse totale produite/an (kg)	644	369	278	1291	208	42	39	62	350
Productivité (comestible, kg/m ² /an)	37,5	42,9	32,2	37,6	24,9	15,0	13,9	22,3	18,7

4.2. Plantes en pots

Deux étages de culture NFT sont dédiés à la culture de plantes aromatiques en pots (surface : 16,7 m²) (Figure 21). Quatre variétés de semences « amateurs » (Ets. Henrion, Huy) ont été sélectionnées pour la production expérimentale : basilic grand vert, roquette sauvage, persil géant d'Italie et coriandre (Figure 24).



Figure 24. Illustration des variétés plantes aromatiques produites en aquaponie : basilic grand vert (a), roquette sauvage (b), persil géant d'Italie (c), coriandre (d).

Les semis sont réalisés en pots de diamètre 10,5 cm (Desch D-Grade, biosourcé, compostable, volume : 0,47 L) avec un substrat d'empotage professionnel (DCM terreau d'empotage n°2 + lave). Une fois les semis réalisés, les pots sont placés sur les tables de culture à la densité de 35 pots/m² et arrosés en subirrigation 2x/jour durant 30 min. La culture est échelonnée (Figure 25) et, chaque semaine, 144 pots sont récoltés et remplacés par des nouveaux semis (n = 72 basilics, 24 roquettes, 24 persils, 24 coriandres).



Figure 25. Production échelonnée de basilic.

Le temps de croissance sur les tables de culture est de 4 semaines pour le basilic et 5 semaines pour les autres variétés. La biomasse comestible par pot est en moyenne de 49 ± 18 g pour le basilic, 32 ± 14 g pour la roquette, 27 ± 5 g pour le persil et 44 ± 10 g pour la coriandre. Avec une production annuelle de 7488 pots, la biomasse totale produite s'élève à 350 kg/an, dont 89% de biomasse comestible, soit une productivité globale de $18,7 \text{ kg/m}^2/\text{an}$ (Tableau 14). Aucune carence ni aucune pathologie n'ont été observées durant cette période de production.

V. PRODUCTION : MODÈLE SANDRE

1. ETUDE PRÉLIMINAIRE

L'élevage du sandre présente certaines difficultés zootechniques, liées à sa biologie et son niveau de domestication, qui le rendent plus compliqué que l'élevage du tilapia. Le sandre est une espèce très sensible au stress qui peut être induit par différents facteurs environnementaux rencontrés dans les conditions artificielles d'un élevage intensif en RAS (Tableau 15), en particulier la lumière (intensité, couleur, photopériode), le bruit (vibrations), l'alimentation artificielle (type d'aliment : coulant/flottant, appétence, fréquence de distribution, ...) et la qualité de l'eau.

Tableau 15. Paramètres physico-chimiques et biologiques pouvant affecter le bien-être des sandres en élevage : valeurs recommandées (Luchiari et al., 2006, 2009 ; Dalsgaard et al., 2013 ; Baekelandt et al., 2018, 2019 ; Steinberg et al., 2018a, 2018b) .

Paramètres	Valeurs recommandées
Température (°C)	22 - 25
pH	6,5 – 7,5
O ₂ (mg/L)	6 - 8
CO ₂ (mg/L)	< 30
TAN (mg/L)	< 10
N-NO ₂ ⁻ (mg/L)	< 1,5
N-NO ₃ ⁻ (mg/L)	< 240
Intensité lumineuse (lx)	< 10
Densité (kg/m ³)	15 - 60

La qualité d'eau en aquaponie couplée diffère de celle rencontrée en RAS classique en raison de la présence de plantes, du taux de renouvellement d'eau fraîche 5 à 10 x inférieur et de l'apport de certains éléments nécessaires à la croissance des plantes et au contrôle du pH. Ces différences se traduisent notamment par un pH plus bas, une concentration élevée en nutriments (N, K, P, Fe, ...) et la présence de composés allélochimiques produits par les plantes qui peuvent avoir des effets positifs ou négatifs sur le bien-être des poissons en général (niveau de stress, croissance, ...) (Senff et al., 2022).

Afin de valider les conditions d'élevage et garantir le bien-être des sandres élevés en aquaponie couplée, un essai préliminaire de production a été réalisé dans un circuit aquaponique expérimental situé à Tihange. Les performances de croissance et le bien-être de juvéniles de sandre ont été évalués et comparés dans un système aquaponique couplé (AP) et un système recirculé classique (RAS).

Le système AP présentait un volume total d'1,8 m³, comportant 600 L de volume d'élevage (2 bassins de 300 L), un décanteur, un filtre biologique à lit fluidisé et 3 m² de culture de laitues sur radeaux (volume : 822 L) équipés d'un éclairage LED (Figure 26). Le système RAS ne comportait pas de culture

hydroponique mais était comparable techniquement au système AP (volume total, volume d'élevage, tailles des bassins, filtration, débit). La photopériode était de 12/12 dans les deux circuits et l'intensité lumineuse < 10 lx à la surface des bassins d'élevage.

L'expérience a duré 3 mois. Lors de la mise en charge, le poids moyen des sandres était de 168 ± 21 g. Le stock de départ était constitué de 36 poissons par bassin, pour une biomasse de 6 kg (densité : 20 kg/m³). Les poissons étaient nourris à satiété (taux de rationnement de 1,1 à 1,5%) avec un aliment flottant pour sandre (Skretting Europa 15 ; 56% protéines/16% lipides ; Tableau 23). Trois variétés de laitue ont été utilisées (en proportions égales) dans la culture hydroponique du système AP : pommée, batavia et feuille-de-chêne. La densité était de 16 plants/m² et la durée de croissance sur les radeaux avant récolte de 6 semaines. La culture était échelonnée et, chaque semaine, 6 plantes étaient récoltées.



Figure 26. Système expérimental utilisé pour l'étude préliminaire d'élevage aquaponique de sandre.

Le taux de renouvellement d'eau fraîche était de 2 % du volume total/jour en système AP et 6%/j en RAS. La qualité d'eau a été caractérisée au travers de différents paramètres physico-chimiques dont les valeurs moyennes sont reprises au Tableau 16.

Tableau 16. Valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques durant l'essai d'élevage de sandres en système recirculé (RAS) et en système aquaponique couplé (AP) (EC : électroconductivité, MES : matières en suspension).

Paramètres	RAS	AP
Température (°C)	25,3 ± 1,4	25,1 ± 1,5
pH	8,1 ± 0,2	6,9 ± 0,4
O ₂ (mg/L)	7,2 ± 0,3	7,4 ± 0,4
EC (µS/cm)	839 ± 47	1178 ± 61
MES (mg/L)	3,5 ± 0,9	2,2 ± 0,6
Alcalinité (mg CaCO ₃ /L)	136,9 ± 67	22 ± 12
TAN (mg/L)	0,8 ± 0,3	1,7 ± 0,5
NO ₂ ⁻ (mg/L)	0,9 ± 0,4	0,9 ± 0,3
NO ₃ ⁻ (mg/L)	137 ± 58	385 ± 59
N _{kjel} (mg/L)	4	25
P (mg/L)	1,0	19,1
Ca (mg/L)	127,2	163,2
Mg (mg/L)	12,8	15,1
K (mg/L)	7,4	27,4
Fe (mg/L)	0,3	0,8

Différents paramètres de production et de stress ont été mesurés afin d'évaluer les performances de croissance et le bien-être des sandres.

Malgré des conditions physico-chimiques bien tranchées entre les deux systèmes (notamment le pH, la conductivité, l'alcalinité, les taux de matières azotées, de phosphore, de calcium et de potassium), le taux de croissance spécifique des sandres était élevé (AP : 0,93 %/j ; RAS : 0,97 %/j) et semblable dans les deux systèmes. En 3 mois, le poids moyen est passé de 168 ± 21 g à 396 ± 88 g en AP et 413 ± 87 g en RAS (Figure 27). Le taux de mortalité était faible (2,8 %) et identique dans tous les bassins.

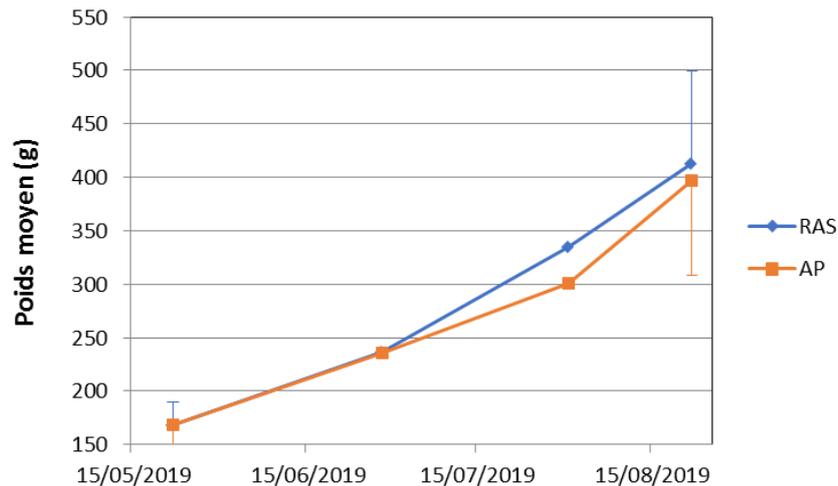


Figure 27. Courbes de croissance (poids moyen \pm écart-type) des sandres élevés en circuit recirculé (RAS) et en aquaponie (AP).

Les taux de conversion alimentaire étaient proche de 1 (AP : 1,06 ; RAS : 1,03) et comparables dans les deux circuits, ce qui traduit les bonnes performances des deux types d'élevage. Dans le système AP, la production végétale était de 1,4 kg/m²/mois.

Outre les performances zootechniques, le bien-être des sandres a été évalué par la mesure des taux de glucose et cortisol sanguin, qui sont liés au niveau de stress chez les poissons. Le taux de base de ces paramètres a été évalué avant l'induction d'un stress aigu, sur 6 individus de chaque bassin, et 30 min après l'application de l'agent stresser (pêche et confinement) pour mesurer la réponse au stress.

Aucune différence significative dans les taux de base de cortisol et de glycémie n'a été observée entre les poissons des 2 circuits. Par contre, l'exposition à un agent stresser a entraîné un pic de glucose significativement plus élevé chez les poissons élevés en aquaponie. Cette différence seule ne permet pas de conclure quant à une meilleure ou moins bonne adaptation des poissons aux conditions d'élevage, ou quant à une différence de bien-être entre les poissons issus des deux systèmes.

Les bonnes performances de croissance et de survie observées dans les deux systèmes, ainsi que l'absence de différence dans les valeurs de base des paramètres de bien-être laissent supposer que, dans les conditions de notre expérience (en particulier la gamme de poids évaluée : 160-410 g), les conditions physico-chimiques du système aquaponique couplé sont tout à fait adéquates pour l'élevage du sandre.

2. PLAN DE PRODUCTION

Comme pour le tilapia, le plan théorique établi pour la production expérimentale de sandre repose sur la production simultanée de 6 cohortes, afin d’optimiser le fonctionnement du système. Ce type de production échelonnée peut être plus difficile à mettre en place pour une espèce itéropare synchrone³ comme le sandre, que pour une espèce itéropare asynchrone⁴ comme le tilapia. En effet, certains producteurs et fournisseurs d’alevins ne font qu’une seule reproduction par an, ce qui limite les possibilités d’approvisionnement. D’autres maîtrisent les reproductions décalées par rapport au cycle saisonnier, et peuvent proposer de 2 à 5 cohortes par an. Il est donc important de tenir compte de ce paramètre (fréquence de reproduction) afin de sécuriser l’approvisionnement en alevins et le plan de production établi.

Les alevins entrent dans le système à partir d’un poids corporel de 30 g (Tableau 17). Afin de maintenir des conditions d’élevage optimales pour l’espèce, la densité maximale est fixée à 50 kg/m³, ce qui permet de maintenir une qualité d’eau adéquate, même en période de nourrissage et sans apport d’oxygène pur. La taille commerciale, déterminée sur base de la demande du marché (voir §VII.1.1) est de 1000-1200 g. La dernière phase du grossissement étant réalisée en bassin de 2 m³, l’objectif est, pour chaque cohorte, d’amener 80 poissons à un poids de 1200 g.

Tableau 17. Caractéristiques du plan de production théorique de sandre décrivant la distribution des 6 cohortes dans les 6 bassins d’élevage.

SANDRE	Bassin 1	Bassin 2	Bassin 3	Bassin 4	Bassin 5	Bassin 6	Total
Poids initial (g)	30	74	179	346	573	862	
Poids final (g)	74	179	346	573	862	1213	
n jours	78	78	78	78	78	78	470
Taux de mortalité (%)	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	10
n initial	88	87	85	84	83	81	
n final	87	85	84	83	81	80	
Volume (m ³)	0,3	0,3	1,0	2,0	2,0	2,0	7,6
Biomasse max (kg)	6	15	29	47	70	97	265
Densité max (kg/m ³)	21	51	29	24	35	49	51

Les informations concernant la croissance du sandre sont parcellaires et dépendent fortement de la souche, des systèmes et des conditions d’élevage. Sur base de certaines informations disponibles auprès des producteurs et de notre expérience, nous avons établi une courbe de croissance théorique qui prévoit le grossissement d’un juvénile de 30 g à un poisson d’une taille commercialisable de 1200 g en 470 jours (Figure 28). Avec 6 cohortes en production, le turn-over de remplacement d’une cohorte est estimé à 78 jours.

³ Qui se reproduit une fois par an.

⁴ Qui se reproduit plusieurs fois par an.

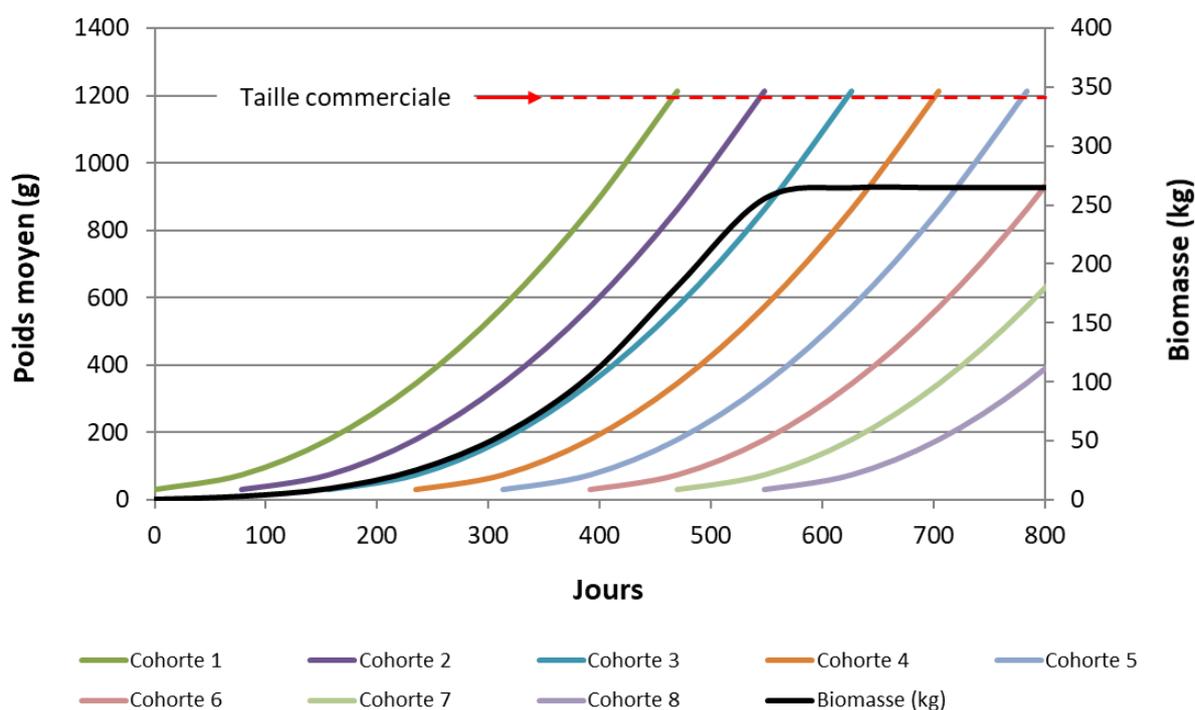


Figure 28. Courbes de croissance théoriques du tilapia illustrant la distribution des cohortes dans le temps et la biomasse totale dans le système aquaponique.

Le sandre est une espèce qui présente un taux de mortalité élevé pouvant varier de 8 à 30 % durant les stades larvaire et juvénile (Baekelandt et al., 2018). Sur base d'échanges avec des producteurs de sandre, le plan de production a été conçu en intégrant un taux de mortalité global de 10 % (1,7% sur chacune des 6 phases). Chaque cohorte introduite dans le système doit donc avoir un effectif théorique de 88 individus.

Selon ce plan, il est possible de produire annuellement 452 kg de sandre à taille commerciale, soit une productivité journalière de 0,16 kg/m³/j (Tableau 18). Les besoins alimentaires pour cette production sont estimés, sur base d'un FCR global de 1,3 sur l'ensemble des phases d'élevage, à 587 kg/an, soit 1,6 kg/j.

Tableau 18. Productivité et besoins alimentaires théoriques de la production expérimentale de sandre.

Volume (m ³)	7,6
Densité max (kg/m ³)	51
Production (kg/an)	452
Productivité (kg/m ³ /j)	0,16
Taux de conversion moy (FCR)	1,3
Aliment (kg/an)	575
Aliment (k/j)	1,6

Sur base des résultats obtenus avec le tilapia, il est possible d'estimer la surface végétale nécessaire à associer à l'élevage du sandre et sa productivité. Cette estimation tient compte de la ration distribuée et de l'apport total d'N, directement lié au taux de protéines présentes dans l'aliment (tilapia : ration moy = 2,6 kg/j, taux protéines aliment = 37 % ; sandre : ration moy = 1,6 kg/j, taux protéines aliment = 56 %).

Les mêmes variétés de laitues et de plantes aromatiques ont été choisies pour la production maraîchère : pommée (Flandria), batavia (Olmétie), feuille de chêne (Kitonia), basilic grand vert, roquette sauvage, persil géant d'Italie et coriandre. La surface dédiée aux plantes en pots est restée identique (17 m²) mais la surface dédiée aux laitues a été réduite à 25 m² (3 bacs de culture sur radeaux au lieu de 4 pour le tilapia) (Tableau 19).

Tableau 19. Caractéristiques du plan de production maraîchère (laitues et plantes en pots) théorique associé à la production de sandre.

Espèces cultivées	Laitues				Basilic	Roquette	Persil	Coriandre	Total pots
	Pommée	Batavia	FdC	Total laitues					
Variétés					Grand vert	Sauvage	Géant d'Italie		
Surface allouée (m ²)	8,3	8,3	8,3	25,0	8,3	2,8	2,8	2,8	16,7
Densité (unité/m ²)	16,5	16,5	16,5		35	35	35	35	
Unités produites/an	1196	1196	1196	3588	3744	1248	1248	1248	6240
Biomasse totale produite/an (kg)	322	369	278	969	208	42	39	62	350

Sur base des rendements moyens obtenus avec le modèle tilapia (laitues : 37,6 kg/m²/an ; plantes en pots : 18,7 kg/m³/an), la production associée au sandre est estimée à 969 kg laitues/an et 350 kg plantes aromatiques/an, soit une production totale de 1319 kg/an (contre une production réelle de 1641 kg/an avec le tilapia). Etant donné la température d'élevage légèrement différente entre le tilapia (25°C) et le sandre (23°C), la production pourrait être inférieure aux 1319 kg prévus.

Selon cette projection, la production d'1 kg de poissons soutiendrait une production végétale de 2,9 kg.

3. QUALITÉ DE L'EAU

Après la phase de production de tilapia (09/2019), le système aquaponique a été désinfecté (H_2O_2 , 1000 ppm) avant le démarrage de la production de sandre.

Un nouveau cyclage du biofiltre (Figure 29) a été nécessaire pour stabiliser le processus de nitrification et permettre le démarrage de la production aquaponique en novembre 2019.

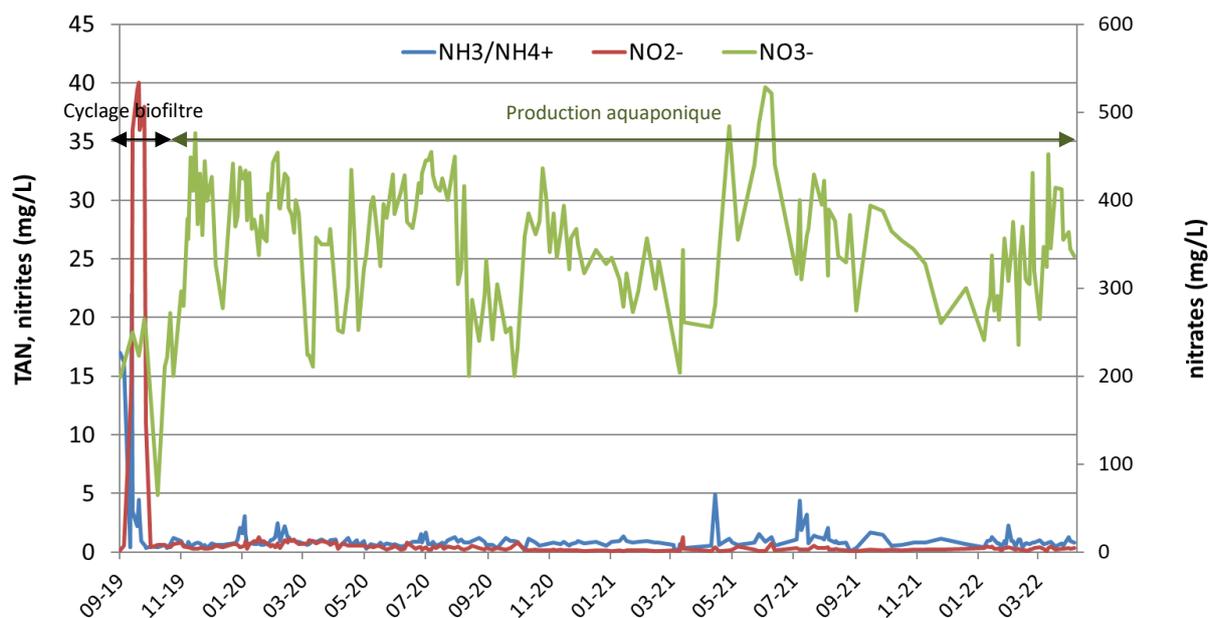


Figure 29. Evolution des concentrations en TAN (NH_4^+/NH_3), nitrites (NO_2^-) et nitrates (NO_3^-) durant le démarrage du système et la phase de production de sandre.

La gestion de la qualité de l'eau (mesure des paramètres physico-chimiques, concentrations en nutriments et éléments traces, contrôle du pH, apports en oligo-éléments) est basée sur la même méthodologie que celle décrite pour la phase de production du tilapia (voir §IV.2). Seule la valeur cible de température était différente (23-24 °C) afin de s'adapter à l'optimum thermique de l'espèce (Dalsgaard et al., 2013 ; Baekelandt et al., 2018). Les mesures de qualité d'eau réalisées durant la phase de production de sandre sont synthétisées aux Tableaux 20 et 21.

Tableau 20. Valeurs moyennes (\pm écarts-types) des paramètres physico-chimiques de l'eau durant la période production de sandre.

	Temp (°C)	pH	Conductivité ($\mu S/cm$)	Alcalinité (mg $CaCO_3/L$)	O_2 (mg/L)	NH_3/NH_4^+ (mg/L)	NO_2^- (mg/L)	NO_3^- (mg/L)
Production aquaponique 07/11/19-27/04/22	23,8 \pm 3,1	6,9 \pm 0,3	1103 \pm 155	28 \pm 19	8,2 \pm 0,8	0,9 \pm 0,6	0,4 \pm 0,3	355 \pm 66

Tableau 21. Concentrations moyennes en nutriments, oligo-éléments et micropolluants dans l'eau du système aquaponique et dans l'eau de renouvellement (eau de distribution) durant la période de production de sandre (n = nombre d'échantillons analysés).

	Unité	n	Eau aquaponie	n	Eau renouvellement
N-NO₃⁻	mg/L	12	98,3	3	6,0
P-P₂O₅	mg/L	14	4,7	3	< 0,04
Ca-CaO	mg/L	14	106,2	3	89,0
Mg-MgO	mg/L	14	28,3	3	23,0
K-K₂O	mg/L	14	65,6	3	1,9
S-SO₄	mg/L	15	22,1	3	14,7
Na-Na₂O	mg/L	14	24,8	3	9,1
Fe	µg/L	14	151	3	< 4
Mn	µg/L	14	20	3	1,5
Zn	µg/L	14	360	3	347
Al	mg/L	3	4,2	1	< 4
Mo	µg/L	14	18	3	0,7
Se	µg/L	2	1,0	1	< 4
Cu	µg/L	13	23,1	3	6,8
Ni	µg/L	6	20,4	1	<4
Co	µg/L	2	0,2	/	/
Cr	µg/L	3	0,8	1	< 0,4
As	µg/L	3	2,9	1	< 0,4
Cd	µg/L	3	0,0	1	< 0,4
Hg	µg/L	2	0,7	1	< 0,4
Pb	µg/L	2	1	1	< 0,4

Durant la période de production expérimentale de sandre, l'apport d'eau neuve moyen était de 2,0 %/j du volume total du circuit (soit 301 L/kg aliment distribué).

L'apport de pouvoir tampon pour contrôler le pH et l'alcalinité était en moyenne de 10,6 kg de dolomie (CaMg(CO₃)₂) et 28,8 kg de bicarbonate de potassium (KHCO₃) par an, soit 1,9 et 5,1 g/m³/j respectivement.

4. PRODUCTION PISCICOLE

4.1. Démarrage

Entre le 25/10 et le 7/11/19, les 6 premières cohortes de sandres (S1 – S6) ont été transférées dans le système aquaponique : n total = 445 ; biomasse totale = 118,7 kg ; densité moyenne = 15,6 kg/m³ (Tableau 22). Ces poissons provenaient de 3 origines différentes (2 centres de recherche et 1 producteur professionnel).

Tableau 22. Caractéristiques des cohortes de sandres lors de la mise en charge en novembre 2019.

Bassin	N	Poids moyen	Biomasse (kg)	Densité (kg/m ³)
1	75	490	36,8	18,4
2	75	358	26,8	13,4
3	75	267	20,1	10,0
4	73	245	17,9	17,9
5	71	175	12,4	41,4
6	76	62	4,7	15,7

4.2. Croissance

Au total, 13 cohortes de sandres ont été introduites dans le système, soit 1432 individus. Les poissons étaient nourris avec de l'aliment Skretting Europa 15 F (2-3-5-7 mm). A partir de décembre 2021, les poissons ont été nourris avec les aliments de la gamme Percid (Percid Starter 2-3, Percid Grower 5, Percid Finisher 7) développée par le Gouessant (Tableau 23). Ce changement a été opéré pour des raisons d'approvisionnement et de prix.

Le taux de croissance spécifique était compris entre 0,25 et 0,77 %/j suivant les cohortes, avec une moyenne de 0,48 %/j (Tableau 24). Les courbes de croissance sont reprises à la Figure 30.

Tableau 23. Composition des aliments sandre.

		Skretting Europa 15 F	Gouessant Percid		
			Starter 2-3	Grower 5	Finisher 7
%	Protéines brutes	56	55	52	50
	Matières grasses	16	12	15	17
	Cellulose brute	1,5	0,9	1,5	1,8
	Cendres brutes	9	10,5	7,8	7,5
	Phosphore	1,5	1,5	1,2	1,1
MJ/kg	Energie digestible	19	20,4	21,4	21,9

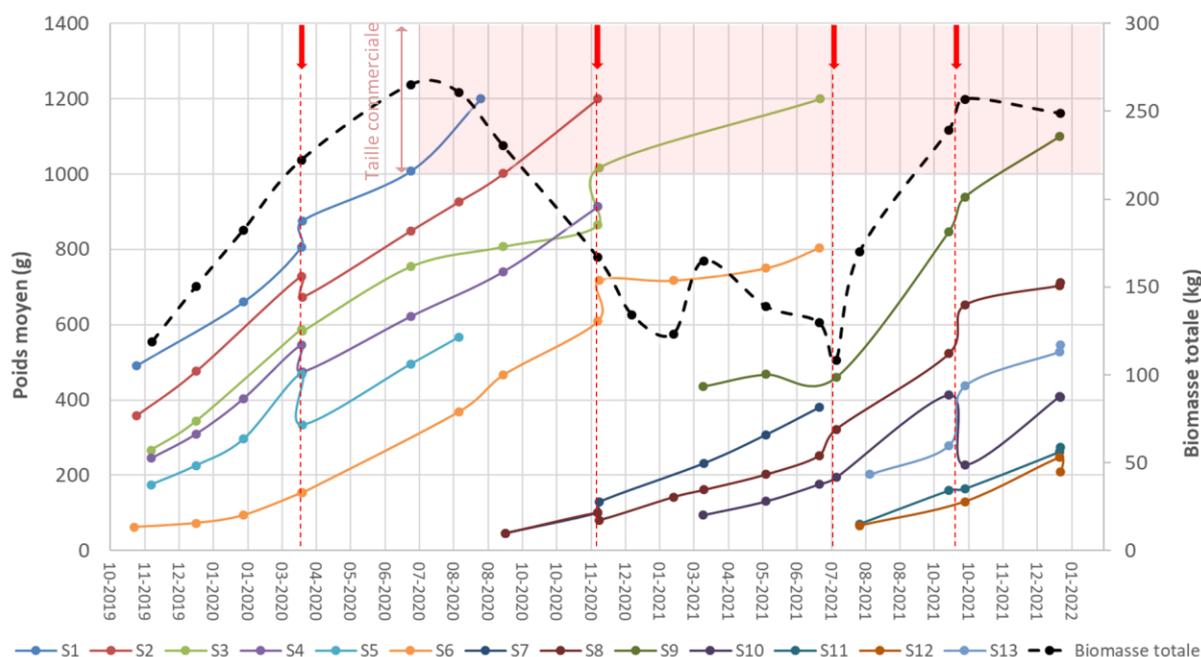


Figure 30. Evolution de la biomasse totale et des poids moyens des 13 cohortes de sandres (S1 à S13) en production dans le système aquaponique entre novembre 2019 et janvier 2022. Les flèches rouges indiquent les événements de tri.

Comme en attestent les données de croissance et de survie (voir § V.4.3.), les performances zootechniques sont très variables d'une cohorte à l'autre. Ceci se marque également par une hétérogénéité de croissance au sein des cohortes, qui nécessite de trier les poissons à intervalles réguliers pour maintenir une certaine homogénéité de taille dans chaque bassin.

La biomasse totale au sein du système était de 119 kg au début de la production. S'ensuit une phase de grossissement de 8 mois qui a permis d'amener la biomasse globale du système à un maximum de 265 kg en juin 2020, ce qui représente une densité moyenne de 35 kg/m³. A partir de juillet 2020, la biomasse diminue jusqu'à atteindre un minimum de 108 kg en juillet 2021. Ceci est lié à la commercialisation des sandres ayant atteint la taille commerciale (1 – 1,2 kg), qui a débuté en juillet 2020. Le volume de ventes à cette époque a dépassé la productivité du système ce qui a réduit la biomasse. L'introduction de nouvelles cohortes et une meilleure gestion des ventes a permis de retrouver une biomasse de 257 kg en octobre 2021.

4.3. Survie

Le taux de mortalité global sur l'ensemble de la période expérimentale de production du sandre s'est élevé à 35 %. Celui-ci est resté acceptable (14 %/an) jusqu'au début de l'année 2021 et a ensuite augmenté (41 %/an) à partir d'avril 2021.

Plusieurs raisons peuvent être évoquées pour expliquer certains événements aigus de mortalité et un phénomène plus chronique observé en 2021.

Une réduction de la prise alimentaire et de la croissance a été observée début 2021, due à une infestation parasitaire (trichodines). Cette parasitose a « explosé » en mars, provoquant des mortalités relativement importantes (en moyenne 7 % ; jusqu'à 23 % chez les plus grands individus). Ce parasite a pu être éradiqué du système grâce à deux traitements au formaldéhyde (25 ppm ; durant la période de traitement, la boucle hydroponique était découplée du système pour éviter toute contamination des végétaux par le formaldéhyde). Un autre pic de mortalité (8 %) est survenu au mois de juin en raison d'une augmentation de la température (28,2°C), non létale directement pour les poissons mais les rendant fragiles lors de manipulations.

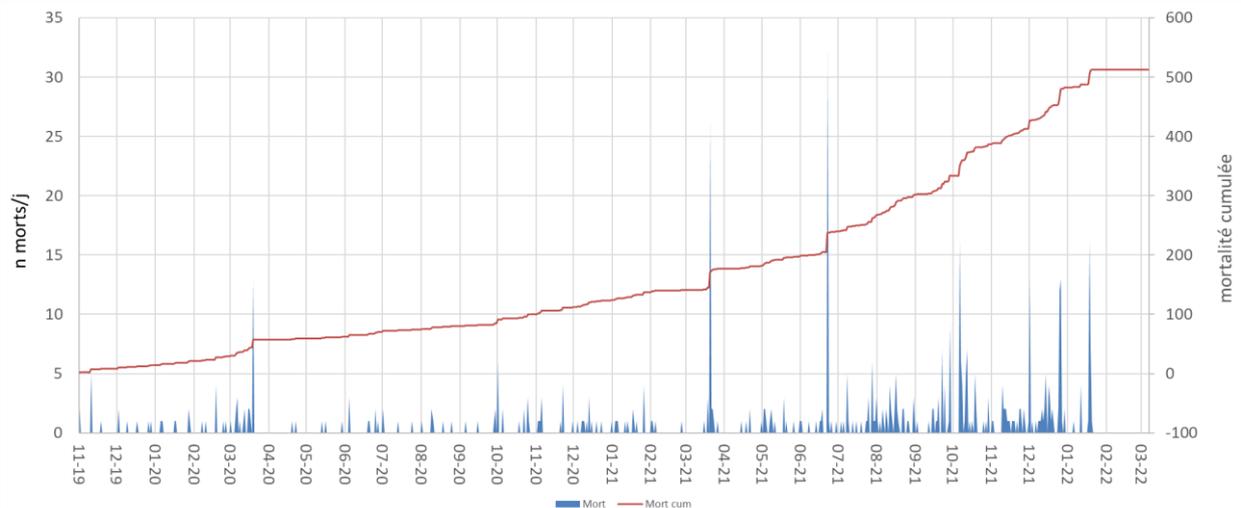


Figure 31. Evolution de la mortalité (journalière et cumulée) durant la production aquaponique de sandre.

Par ailleurs, suite à des mortalités chroniques observées fin 2022, une analyse vétérinaire a révélé la présence de la bactérie *Aeromonas veronii*, pathogène pour les poissons d'eau douce (Li et al., 2020).

Il semblerait que des taux de mortalité élevés, de même que des taux de croissance faibles soient associés à certaines cohortes et pourraient donc s'expliquer par l'origine et la qualité des poissons introduits dans le système. Les lots S1-2-3-4-13 proviennent du fournisseur A, le lot S5 du fournisseur B, et les lots S6-7-8-9-10-11-12 du fournisseur C. Ces derniers, qui constituaient l'effectif majoritaire des poissons en grossissement depuis mi-2021, présentaient globalement des performances de croissance et de survie bien inférieures à celles des lots élevés durant la première phase de production (provenant essentiellement du fournisseur A).

Cela souligne l'importance d'un approvisionnement en alevins de qualité. Tout d'abord, la qualité des poissons et leurs performances de croissance dépendent fortement de la souche et de son niveau de domestication, et par conséquent du fournisseur. En particulier, certains lots de poissons sont beaucoup plus sensibles au stress que d'autres. Ensuite, les producteurs d'alevins trient régulièrement les poissons du même âge pour obtenir trois classes de taille (et donc de qualité) : les têtes-de-lot, les poissons dans la moyenne, et les queues-de-lot. Il faut donc s'assurer, que les poissons fournis pour le

grossissement ne font pas parties de ces queues-de-lot, ce qui a probablement été le cas pour plusieurs cohortes introduites dans le système pilote aquaponique.

En effet, si on exclut les cohortes S6 à S11, le taux de mortalité moyen est de 17%.

4.4. Production

La Figure 32 représente l'évolution de la ration alimentaire distribuée, de la biomasse totale et de l'effectif total de sandres dans le système aquaponique. Entre le 25/10/2019 et le 21/01/2022 (820 jours), 804,5 kg d'aliment ont été distribués (en moyenne 981 g/j) pour une production de 515 kg de sandre, soit une productivité de 229 kg/an et 0,08 kg/m³/j avec une quantité annuelle d'aliment de 358 kg. Le taux de conversion moyen était de 1,56. Ces résultats ne tiennent compte que de la biomasse commercialisable et représentent la productivité économique du système. En prenant en compte la mortalité (205 kg de biomasse non commercialisée) au cours de la période, la productivité biologique du système peut être évaluée à 321 kg/an, soit 0,12 kg/m³/j, avec un taux de conversion alimentaire de 1,12.

Tableau 24. Taux de croissance spécifique (SGR), de conversion alimentaire (FCR) et de survie des sandres en production aquaponique.

Cohorte	SGR (%/j)	FCR	Mortalité (%)
S1	0,29	1,8	28
S2	0,30	0,9	12
S3	0,25	1,3	23
S4	0,33	1,7	8
S5	0,43	1,3	28
S6	0,62	3,0	100
S7	0,76	1,9	28
S8	0,56	1,5	88
S9	0,29	4,0	38
S10	0,46	0,7	94
S11	0,77	1,7	26
S12	0,64	1,0	13
S13	0,59	1,8	8
Total	0,48	1,56	35

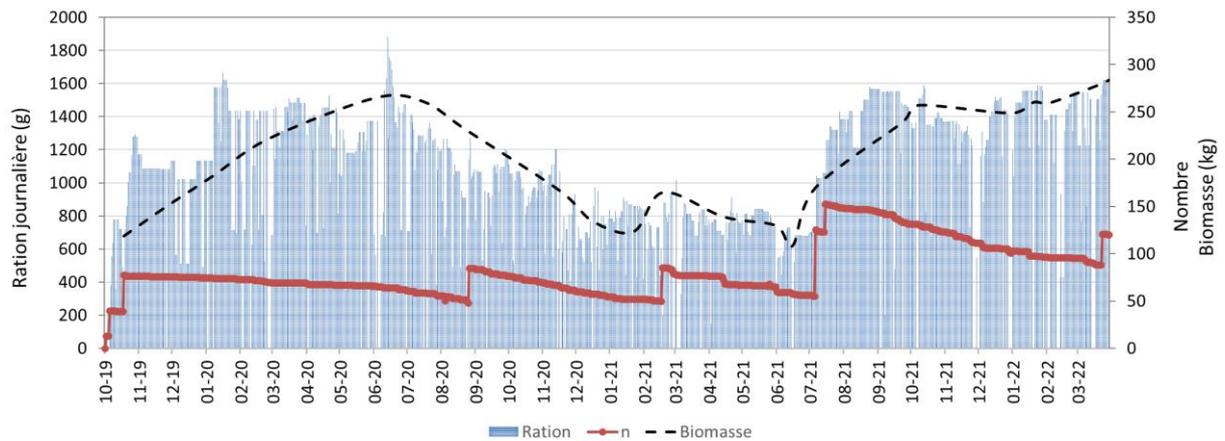


Figure 32. Evolution de la ration alimentaire distribuée, de la biomasse totale et de l'effectif total de sandres dans le système aquaponique.

4.5. Plan ajusté

Sur base des résultats de la production expérimentale, nous pouvons adapter le modèle de croissance (voir §V.2) et déduire une durée moyenne de grossissement de 712 j (au lieu de 470 j dans le plan théorique) pour atteindre un poids de 1200 g (Figure 33).

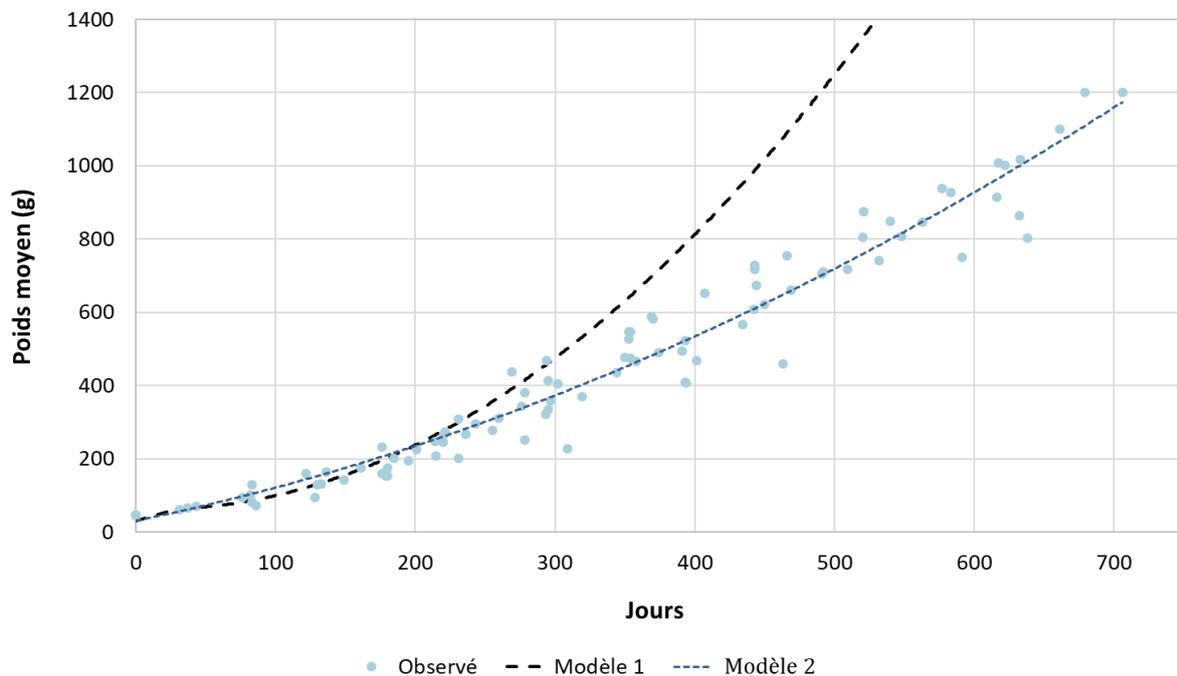


Figure 33. Comparaison du modèle de croissance théorique (Modèle 1) avec les données de croissance observées, et proposition d'un nouveau modèle basé sur ces observations (Modèle 2).

Afin de définir un nouveau plan de production, le modèle théorique initial (modèle 1) et les données de croissance observées (modèle 2) ont été comparées avec des courbes de croissance obtenues dans une autre production expérimentale de sandres en RAS durant 2 années (Figure 34). Durant ces 2 saisons, le gestionnaire de production a trié les poissons et divisé chaque cohorte en 6 lots selon les performances individuelles de croissance (queue-de-lot - ; queue-de-lot ; lot moyen - ; lot moyen + ; tête-de-lot ; tête-de-lot +).

Cette comparaison met en évidence que les performances de croissance observées dans le système aquaponique correspondent à celles attendues pour des queues-de-lot, et que la vitesse de croissance prédite par le modèle théorique est tout à fait atteignable en sécurisant son approvisionnement en alevins avec une bonne souche et en sélectionnant les poissons présentant des performances moyennes à élevées pour le grossissement.

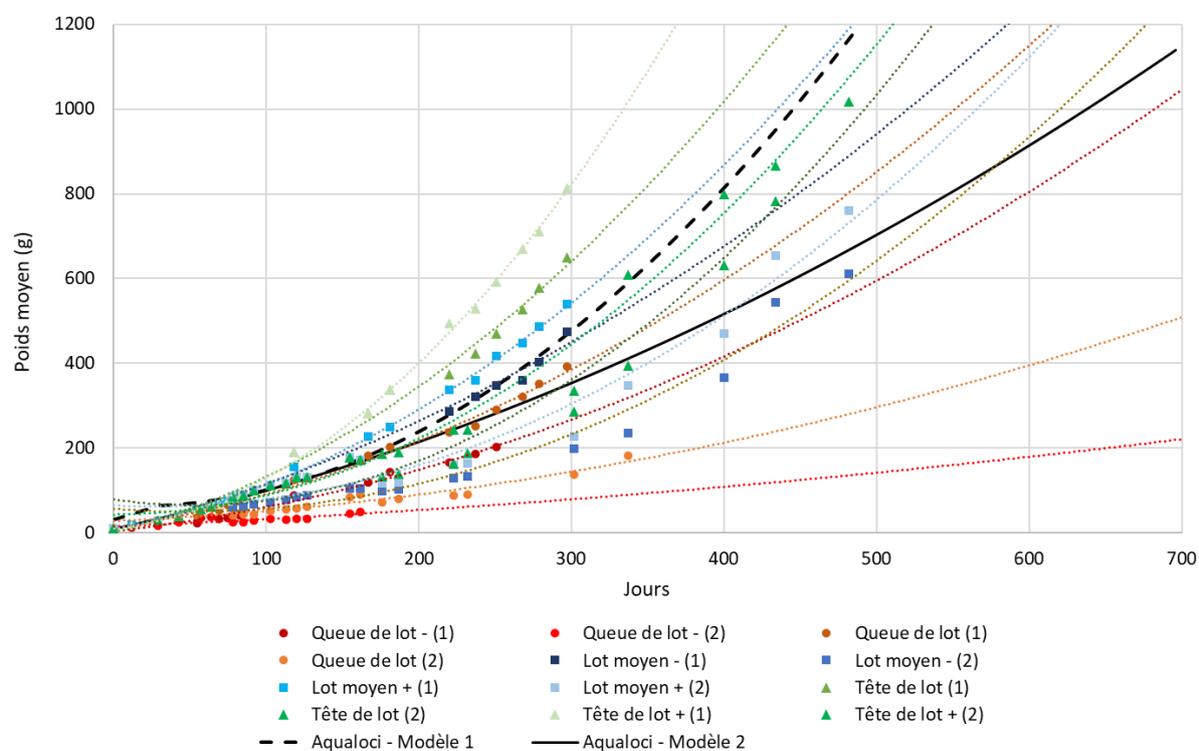


Figure 34. Comparaison du modèle théorique de croissance établi (Aqualoci – Modèle 1), de la courbe moyenne observée dans le pilote aquaponique de Strée (Aqualoci – Modèle 2) et des données observées sur 2 saisons de production dans une autre production expérimentale en RAS. Les 2 cohortes produites ont été divisées en 6 lots chacune selon les performances individuelles de poissons.

Sur base des données collectées relatives aux groupes de poissons présentant des performances moyennes, il est raisonnable de baser le nouveau plan de production sur un temps de croissance (de 30 à 1200 g) de 600 j et un taux de mortalité global de 20 % (Tableau 25). Avec une augmentation du volume d'élevage de 10 %, il est également envisageable de renforcer les effectifs pour atteindre une

production annuelle de 461 kg, soit une productivité de 56 kg/m³/an (0,15 kg/m³/j). Avec un taux de conversion économique de 1,3 (taux de conversion biologique de 1,15), la quantité d'aliment distribuée serait de 593 kg (Tableau 26).

Tableau 25. Caractéristiques du plan de production ajusté de sandre décrivant la distribution des 6 cohortes dans les 6 bassins d'élevage.

SANDRE	Bassin 1	Bassin 2	Bassin 3	Bassin 4	Bassin 5	Bassin 6	Total
Poids initial (g)	30	105	229	400	619	887	
Poids final (g)	105	229	400	619	887	1202	
n jours	100	100	100	100	100	100	600
Taux de mortalité (%)	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	20
n initial	128	124	120	116	112	109	
n final	124	120	116	112	109	105	
Volume (m ³)	0,3	1,0	1,0	2,0	2,0	2,0	8,3
Biomasse max (kg)	13	27	46	69	96	126	379
Densité max (kg/m ³)	43	27	46	35	48	63	63

Tableau 26. Productivité et besoins alimentaires de la production de sandre : valeurs observées et plan de production ajusté.

Production sandre	Observé	Plan ajusté
Remplacement cohortes (jours)	119	100
Taille commerciale visée	1200	1200
Densité max (kg/m ³)	51	63
Production (kg/an)	229	461
Productivité (kg/m ³ /j)	0,08	0,15
Taux de conversion alimentaire moy	1,56	1,29
Aliment (kg/an)	358	593
Mortalité (%)	35	20

5. PRODUCTION MARAÎCHÈRE

5.1. Laitues

La surface de culture sur radeaux a été réduite de 25 % par rapport à la période associée à la culture du tilapia, passant de 33 m² (4 étages) à 25 m² (3 étages). Les variétés de laitues produites sont les mêmes que celles utilisées avec le tilapia (cf. § IV.4.1), pommée, batavia et feuille-de-chêne. La gestion

de la production (semis, densité, roulement) est également semblable. La culture est échelonnée et, chaque semaine, en moyenne 69 laitues sont récoltées et remplacées par des jeunes plantules.

Durant la période de production végétale associée au sandre (07/11/19 au 27/04/22), la température et le taux d'hygrométrie de l'air dans le local de culture étaient respectivement de $23,4 \pm 2,0$ °C et $65,5 \pm 6,1$ %. La qualité physico-chimique et les concentrations en nutriments de l'eau sont reprises au §V.3. Aucune carence ni aucune pathologie n'ont été observées durant cette période de production.

Le temps de croissance sur les tables de culture est de 6 semaines pour atteindre une laitue commercialisable d'un poids moyen total (partie comestible) de 299 ± 47 g, 341 ± 87 g et 243 ± 55 g respectivement. Avec une production annuelle de 3588 laitues, la biomasse totale produite s'élève à 1056 kg/an, soit une productivité de 42,2 kg/m²/an (Tableau 27).

Tableau 27. Paramètres de production végétale (laitues et plantes en pots) associée à la production de sandre.

Espèces cultivées	Laitues				Basilic	Roquette	Persil	Coriandre	Total pots
	Pommée	Batavia	FdC	Total laitues	Grand vert	Sauvage	Géant d'Italie		
Variétés									
Surface allouée (m ²)	8,3	8,3	8,3	25	8,3	4,2	2,1	2,1	16,7
Densité (unité/m ²)	16,5	16,5	16,5		31	31	31	31	
Roulement (semaines)	6	6	6		4	5	5	5	
Unités produites/an	1196	1196	1196	3588	3328	1664	832	832	6656
Poids moyen (comestible, g)	243 ± 55	341 ± 87	299 ± 47		31 ± 11	45 ± 5	45 ± 14	51 ± 8	
Biomasse comestible produite/an (kg)	290	408	358	1056	103	75	38	42	256
Productivité (comestible, kg/m ² /an)	34,9	49,0	43,0	42,2	12,4	17,9	17,9	20,3	15,4

5.2. Plantes en pots

Deux étages de culture NFT sont dédiés à la culture de plantes aromatiques en pots (surface : 16,7 m²) (Figure 21). Les variétés sont identiques à celles utilisées durant la période de production du tilapia : basilic grand vert, roquette sauvage, persil géant d'Italie et coriandre. La conduite de la culture (roulement, semis, irrigation) est identique à celle décrite au §IV.4.2 excepté la densité qui a été diminuée à 31 pots/m² afin d'espacer un peu plus les plants et obtenir des produits de meilleure qualité.

La culture est échelonnée et chaque semaine, 128 pots sont récoltés et remplacés par des nouveaux semis (n = 64 basilics, 32 roquettes, 16 persils, 16 coriandres).

Le temps de croissance sur les tables de culture est de 4 semaines pour le basilic et 5 semaines pour les autres variétés. La biomasse comestible par pot est en moyenne de 31 ± 11 g pour le basilic, 45 ± 5 g pour la roquette, 45 ± 14 g pour le persil et 51 ± 8 g pour la coriandre. Avec une production annuelle de 6656 pots, la biomasse totale produite s'élève à 256 kg/an, soit une productivité globale de 15,4 kg/m²/an (Tableau 27). Aucune carence ni aucune pathologie n'ont été observées durant cette période de production.

5.3. Diversification horticole

Durant la dernière année du projet, la surface de culture (NFT) dédiée aux plantes en pots a été remplacée par 8 tables à marées expérimentales, découplées du système aquaponique, visant à tester de nouvelles variétés de plantes. Ces essais visaient d'une part, à valoriser les effluents du système, qui étaient récupérés pour alimenter les tables à marées, d'autre part à explorer des pistes de production végétale à plus haute valeur ajoutée, qui pourraient justifier l'utilisation d'une structure de production indoor, en conditions environnementales contrôlées.

Le choix s'est porté sur des plantes comestibles très productives (mesclun), ou sans production locale et exclusivement importée (gingembre, curcuma), ainsi que sur le chanvre pour la valorisation de sa fleur dans le domaine médical/parapharmaceutique ou récréatif (voir rapport annexe : Etude de marché légumes) (Figure 35).

Les semences de mesclun provenaient de chez Ets Henrion (Huy, Belgique), celles de chanvre (variété Finola) de chez Nordic Joint (Estonie), et les rhizomes de gingembre et curcuma d'un magasin Bio de proximité. Les cultures de chanvre et de mesclun ont été réalisées dans du terreau (DCM terreau d'empotage n°2 + lave) et le gingembre et curcuma sur billes d'argile (DCM Hydro-granules 8-16). Les cultures étaient irriguées par intermittence (3 x/j durant 5-10 min).

Dans ces conditions de culture, les cycles de production du mesclun sont assez courts (18 jours) et la productivité est plus de 2 fois supérieure à celle de la laitue, atteignant 91 kg/m²/an. Le cycle de production du gingembre et du curcuma sont beaucoup plus longs (environ 9 mois). Dans nos conditions de culture, les rhizomes ont été récoltés après 1 an, avec une productivité de 6,4 et 6,7 kg/m²/an respectivement pour le gingembre et le curcuma. Ces données de rendement sont indicatives puisque l'essai a été réalisé sur un seul cycle, ne permettant pas une optimisation des conditions de culture. De même pour le chanvre, qui a été cultivé durant 2 cycles (durée moyenne : 82 jours), avec un rendement de 3,28 kg/m²/an de fleurs fraîches (1,38 kg/m²/an de fleurs sèches).



Figure 35. Cultures de gingembre (a), curcuma (b,c), chanvre (d) et mesclun (e) sur tables à marées alimentées par les effluents du système aquaponique.

VI. ANALYSE FONCTIONNELLE

1. BILAN DE MASSES

L'objectif de cette étude est de caractériser les flux et la répartition des nutriments dans les différents compartiments physiques et biologiques du système, ce qui permettra de juger de son efficacité en termes d'utilisation des nutriments. Ces résultats seront ensuite mis en relation avec l'utilisation de l'eau, de l'énergie et la productivité ce qui permettra de comparer l'impact environnemental des deux modèles de production (tilapia vs sandre) grâce à une analyse de cycle de vie.

L'apport de nutriments dans le système se fait principalement par l'eau de renouvellement et l'aliment distribué aux poissons. Une partie de ces nutriments est assimilée par la biomasse (poissons et plantes), le reste se trouve sous forme dissoute dans l'eau ou piégée dans les matières solides en suspension. L'export hors du système se fait par la biomasse produite (plantes et poissons) et les effluents qui se divise en effluent liquide (eau du système évacué par un trop plein) et boues issues de la filtration mécanique (Figure 36).

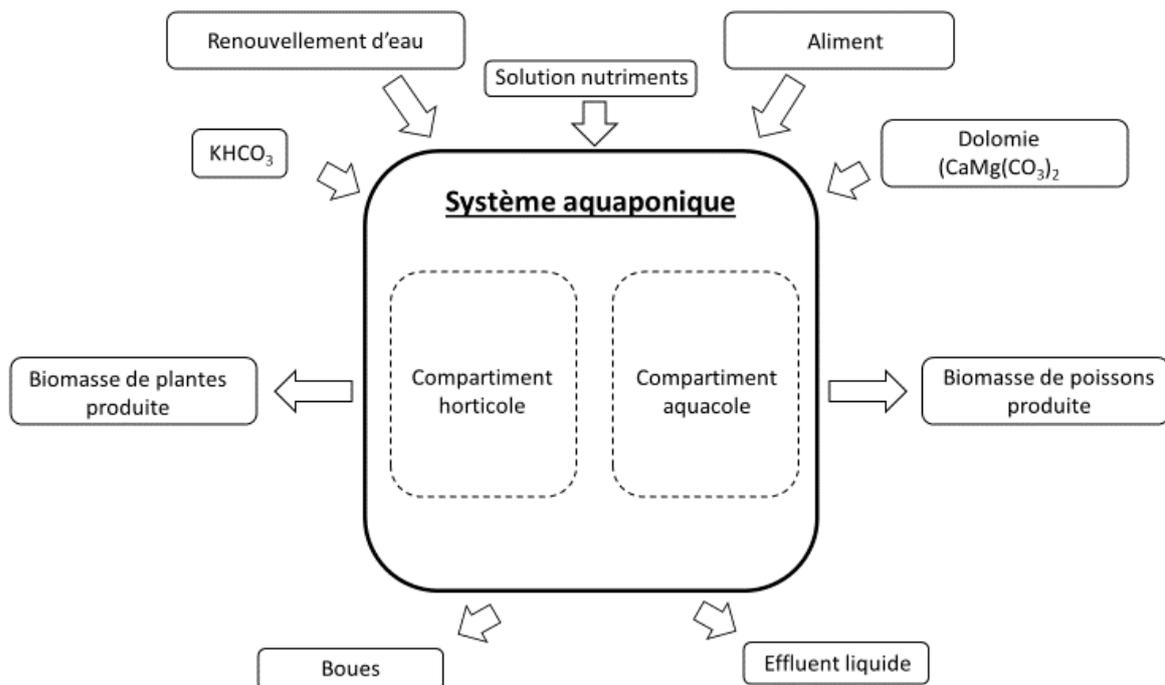


Figure 36. Sources d'imports et d'exports des nutriments prises en compte dans le bilan de masses du système de production aquaponique de Strée.

1.1. Élevage du tilapia

Durant la phase de production de tilapia, des échantillonnages ont été réalisés dans l'eau, l'aliment, les boues, l'effluent liquide, les poissons et les plantes afin de mesurer les concentrations en nutriments essentiels au fonctionnement du système. Les éléments majeurs : N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, nécessaires à la croissance des plantes ont été analysés.

Le Tableau 28 présente la distribution (en pourcents par rapport aux intrants) des nutriments recherchés au sein des différents compartiments du système aquaponique lors de la production de tilapia. La Figure 37 permet de visualiser la contribution de chaque catégorie d'intrant à l'apport des éléments recherchés dans cette étude.

Tableau 28. Allocation des éléments majeurs au sein des compartiments du système aquaponique lors de la production de tilapia. Les résultats sont exprimés en pourcentages par rapport au total des intrants.

TILAPIA	Intrants %					Extrants %				Bilan
	Renouvellement (eau de ville)	Aliment	Solution de nutriments	KHCO ₃	Dolomie	Poissons	Plantes	Eau (effluent)	Boue	
N	1,7	98,3				25,3	6,9	32,3	8,6	27,0
P	0,1	99,9				66,7	5,8	6,5	22,7	-1,6
K	1,4	30,9		67,7		7,0	28,8	26,2	0,6	37,3
Ca	45,5	32,7			21,8	29,7	5,4	46,2	17,9	0,8
Mg	46,1	22,2			31,6	3,3	7,6	63,8	20,9	4,4
S	40,4	59,6				12,9	9,4	91,5	14,5	-28,3
Fe	0,0	88,4	11,6			4,4	1,3	2,2	43,9	48,2

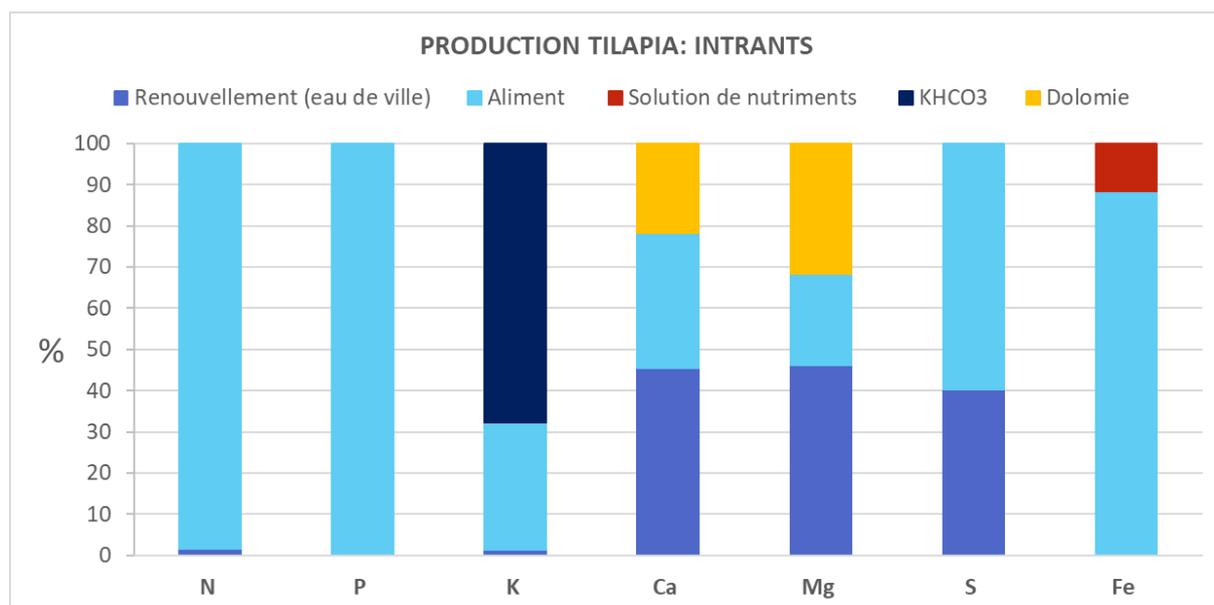


Figure 37. Origine et proportion des apports de nutriments au sein du système aquaponique lors de la production de tilapia.

L'aliment représente l'apport majeur d'azote (98 %), de phosphore (100 %) et de fer (88 %). Le fer est également apporté au système aquaponique via la solution de nutriments (12 %).

Le potassium est majoritairement (68 %) apporté par le bicarbonate de potassium (KHCO_3), le reste étant essentiellement apporté par l'aliment 31 %. Le KHCO_3 est apporté quotidiennement dans le système aquaponique afin de maintenir l'alcalinité de l'eau et par conséquent stabiliser le pH. De plus, le potassium étant généralement un élément limitant dans les effluents des RAS par rapport aux besoins des plantes, il nécessite un apport complémentaire pour optimiser la production aquaponique (Rakocy et al., 2006 ; Lunda et al., 2019).

Concernant le calcium et le magnésium, ces deux éléments présentent un profil similaire. Ils entrent dans le système, en ordre d'importance, par le renouvellement d'eau (Ca : 45,5 % ; Mg : 46 %), l'aliment (Ca : 33 % ; Mg : 22 %) et la dolomie (Ca : 22 % ; Mg : 32 %). La supplémentation en dolomie, utilisée pour tamponner le pH, permet d'apporter un supplément de Mg et de Ca aux plantes qui les consomment en grande quantité afin d'assurer leur croissance (Jones, 2004).

Le soufre quant à lui entre dans le système majoritairement par l'aliment (60 %) et par le renouvellement d'eau (40%).

Une fois dans le système, les nutriments se distribuent dans différents compartiments et sont ensuite exportés par plusieurs voies : valorisation en biomasse produite, effluent liquide (eau) et solide (boue) (Figure 38).

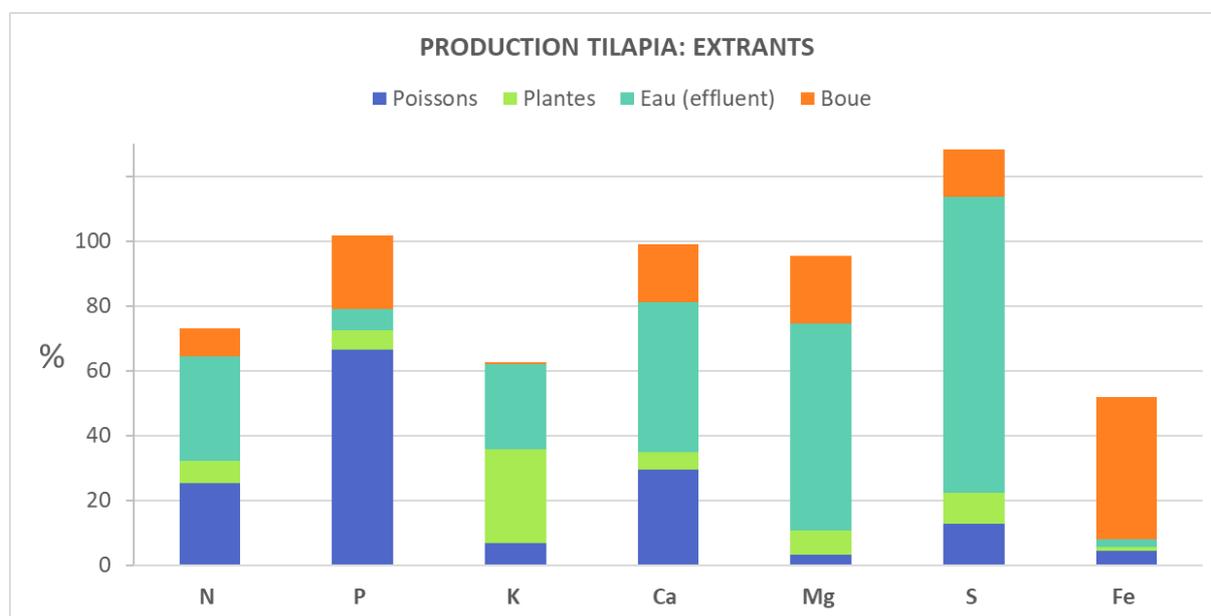


Figure 38. Proportion des nutriments au sein des catégories d'export lors de la production de tilapia.

32,2 % de l'azote introduit dans le système sont valorisés sous forme de biomasse et 40,9 % sont éliminés sous forme d'effluent : 32,3 % dans l'effluent liquide et 8,6 % dans les boues. La perte d'azote par les effluents est donc relativement importante, en comparaison à d'autres études qui rapportent des valeurs autour de 22 % (Jaeger et al., 2019; Yang & Kim, 2020).

Cette différence peut être liée à la conception même du système et son mode de gestion. Les principaux facteurs influençant la quantité d'azote exportée par l'effluent sont le rapport entre le volume de production piscicole et horticole (donc la taille du compartiment hydroponique) et le taux de renouvellement d'eau du système qui affecte directement l'accumulation des nutriments dans l'eau du système et son effluent (Endut et al., 2014 ; Jaeger et al., 2019). Parallèlement au processus de nitrification prenant place dans le biofiltre, un phénomène de dénitrification (se produisant en conditions anoxiques) peut se produire dans les RAS, avec plus ou moins d'importance selon les systèmes et peut également influencer la teneur en azote de l'effluent. Enfin, le choix des plantes a un impact significatif sur l'absorption de l'azote. Dans une production aquaponique associant le tilapia et différentes variétés de plantes, Yang & Kim (2020) mis en évidence que les tomates étaient plus efficaces pour absorber l'azote que les laitues et le basilic.

Ces mêmes auteurs ont mesuré une distribution semblable de l'azote (21-24 % dans les poissons, 9-17 % dans les plantes) à celle observée au sein de notre production expérimentale : 25,3 % de l'azote est stocké dans les poissons et 6,9 % dans les plantes.

Enfin, 27 % de l'azote est non comptabilisé dans notre bilan ce qui est similaire aux 25 % rapportés dans la littérature (Endut et al., 2014 ; Jaeger et al., 2019). Cette perte d'azote dans le bilan peut être due à un phénomène de dénitrification conduisant l'émission de N_2 gazeux, et également à l'assimilation et au piégeage de l'azote par les micro-organismes présents dans la colonne d'eau et le biofilm au sein du système (Endut et al., 2014 ; Strauch et al., 2018 ; Jaeger et al., 2019) .

Concernant le phosphore, 72,5 % de l'apport au système, sous forme d'aliment, est valorisé dans la production de biomasse, dont 66,7 % dans les poissons et 5,8 % dans les plantes. Ces résultats se situent dans les gammes très variables de valeurs rapportées dans d'autres études, allant de 20 à 65 % pour les poissons et de 0,4 à 30 % pour les plantes (Cerozi & Fitzsimmons, 2017 ; Strauch et al., 2018; Jaeger et al., 2019 ; Yang & Kim, 2020).

La part de phosphore perdue sous forme d'effluent atteint 29,2 % de l'intrant : 6,5 % dans l'effluent liquide et 22,7 % dans les boues. Le phosphore est en effet principalement piégé dans des particules organiques solides éliminées par la filtration mécanique.

Notons pour les autres éléments que 64,2 % du Ca et 84,7 % du Mg quittent le système par l'effluent. Quant au potassium, sa distribution est la suivante : 37,3 % sont non comptabilisés, 28,8 % sont retrouvés dans les plantes et 26,2 % dans l'effluent liquide. Sa présence significative dans les plantes était attendue au vu de son importance pour leur croissance. Des plantes carencées en potassium ont une turgescence réduite, se flétrissent vite et présente une croissance ralentie (Jones, 2004). Le potassium étant très soluble, on s'attend également à le trouver de façon significative dans l'effluent liquide. Cependant, c'est la fraction non comptabilisée qui est la plus importante. Une explication potentielle serait son accumulation dans les micro-organismes, cette accumulation peut être très importante. Par exemple, la bactérie *E. coli* est capable de concentrer 50x le potassium dans son cytoplasme comparé au milieu extérieur. Il paraît donc envisageable qu'un tel phénomène ait lieu dans les systèmes aquaponiques où les micro-organismes sont très abondants (Strauch et al., 2018).

Le bilan de masse du soufre présente un déséquilibre de 28,3 % en excès. L'analyse des extrants montre que 22,3 % du soufre se trouve dans la biomasse (plantes + poissons), 91,5% dans l'effluent liquide et 14,5% dans les boues. La plus grande fraction du soufre se trouve donc dans l'effluent liquide. L'excès relevé dans le bilan de masses s'explique probablement par le fait que la majorité du soufre se trouve dans l'eau et que l'estimation des volumes d'effluents liquides produits est soumis à une marge d'erreur.

Dans le cadre de la production de tilapia, le fer est majoritairement apporté par l'aliment 88,4 % et par la solution de nutriment 11,6 %. Il sort majoritairement du système par les boues 43,9 %, seule une petite fraction (1,8 %) est retrouvée dans la biomasse (plantes + poissons) et 2,2 % se retrouvent dans l'effluent liquide. La part du fer non comptabilisée dans les extrants est importante (48,2 %) et n'est actuellement pas expliquée. Le fer étant un composé peu soluble, son accumulation dans les boues (sous forme de précipité) n'est pas surprenante ; 54-67 % de l'intrant en fer est relevé dans les boues par Strauch et al. (2019). Pour pallier à ce phénomène il est apporté dans la solution de nutriments sous forme chélatée afin de faciliter son absorption par les plantes, même si le pH du système aquaponique (6,5) n'est pas optimal. Le fer étant préférentiellement absorbé par les plantes à des pH <6. Son accumulation dans les boues peut être due au fait que la majorité du fer est apporté par l'aliment sous forme non soluble et reste piégé dans les fèces, constituant principale des boues. L'UV présent dans le système peut également être responsable de la dégradation des chélates ce qui accentue encore le phénomène.

1.2. Élevage du sandre

Lors de la production de sandre, des échantillonnages ont été réalisés dans l'eau, l'aliment, les boues, l'effluent liquide, les poissons et les plantes afin de mesurer les concentrations des nutriments essentiels au fonctionnement du système. Les éléments majeurs : N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, nécessaires à la croissance des plantes ont été analysés.

Le Tableau 29 présente la distribution (en pourcents par rapport aux intrants) des nutriments recherchés au sein des différents compartiments du système aquaponique lors de la production de sandre. La Figure 39 permet de visualiser la contribution de chaque catégorie d'intrant à l'apport des éléments recherchés dans cette étude.

L'aliment représente l'apport majeur d'azote (98 %) et de phosphore (100 %). A la différence de l'aliment tilapia, le fer est apporté en moindre mesure par l'aliment sandre (47,5 %) au système aquaponique. Par conséquent, il est apporté en plus grande proportion par la solution de nutriments, cet apport est de 52,5 %.

Tableau 29. Allocation des éléments majeurs au sein des compartiments du système aquaponique lors de la production de sandre. Les résultats sont exprimés en pourcentages par rapport au total des intrants.

SANDRE	Intrants %					Extrants %				Bilan
	Renouvellement (eau de ville)	Aliment	Solution de nutriments	KHCO ₃	Dolomie	Poissons	Plantes	Eau (effluent)	Boue	
N	2,3	97,7				33,4	14,0	33,6	3,5	15,5
P	0,1	99,9				66,2	7,0	7,7	4,7	14,5
K	1,5	16,7		81,8			26,6	37,2	0,2	36,0
Ca	53,9	34,2			11,9	20,0	5,1	58,7	3,6	12,5
Mg	53,2	16,1			30,7	3,8	5,1	66,8	4,9	19,4
S	55,3	44,7				12,6	3,9	79,5	22,2	-18,2
Fe	0,0	47,5	52,5			1,9	3,0	3,6	10,2	81,4

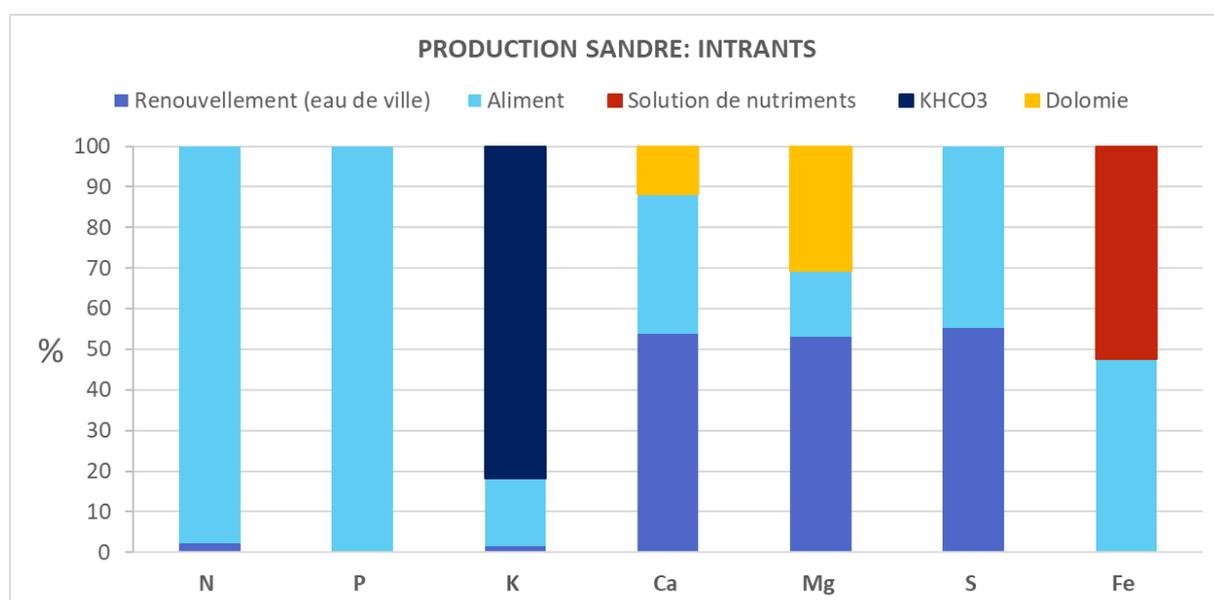


Figure 39. Origine et proportion des apports de nutriments au sein du système aquaponique lors de la production de tilapia.

Le potassium est majoritairement (82 %) apporté par le bicarbonate de potassium (KHCO₃), le reste étant essentiellement apporté par l'aliment (17 %). Comme dans la production expérimentale de tilapia, le KHCO₃ est apporté en continu dans le système aquaponique afin de maintenir le taux d'alcalinité et par conséquent stabiliser le pH.

Les apports de calcium proviennent, par ordre d'importance, du renouvellement d'eau (54 %), de l'aliment (34 %) et de l'ajout de dolomie (12 %). Le magnésium quant à lui entre dans le système par l'eau de renouvellement (53 %), l'ajout de dolomie (31 %) et l'aliment (16 %). L'apport de soufre dans le système aquaponique est ici majoritairement dû au renouvellement d'eau (55 %) et ensuite à l'aliment (45 %).

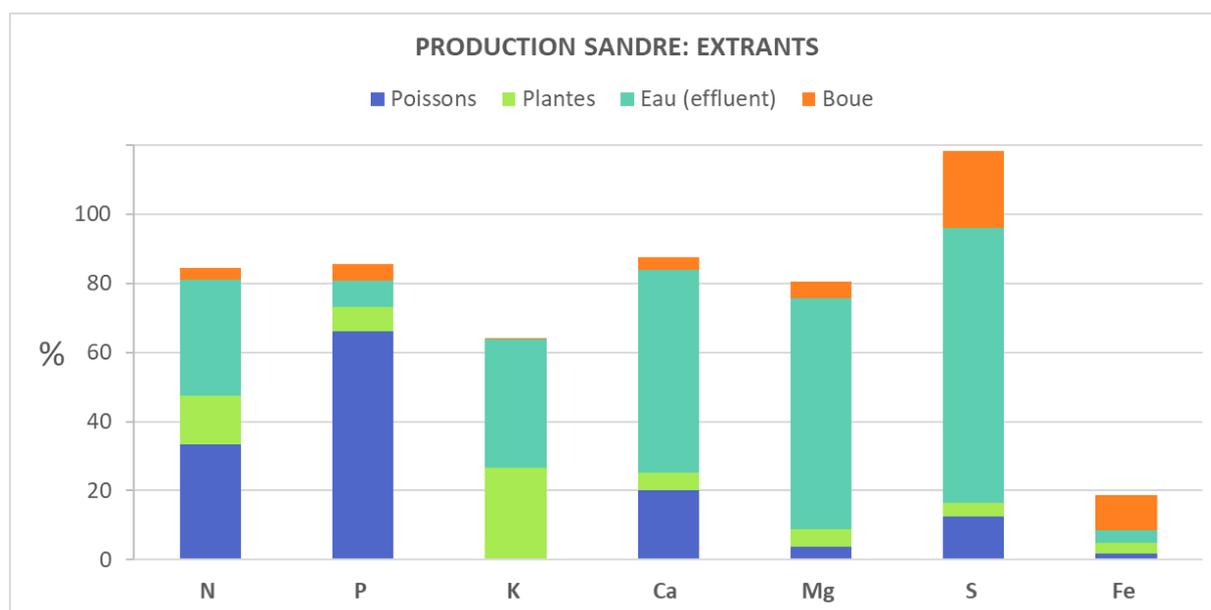


Figure 40. Proportion des nutriments au sein des catégories d'export lors de la production de sandre.

Le profil de distribution de l'azote au sein du système aquaponique durant la phase de production du sandre est assez semblable à celui observé pour la production de tilapia. La part retrouvée dans la biomasse valorisable est cependant supérieure, atteignant 47,4 %, dont 33,4 % dans les poissons et 14,0 % dans les plantes.

La part d'azote perdue sous forme d'effluent s'élève à 37,1 % : 33,6 % sous forme d'effluent liquide et 3,5 % sous forme de boues. La part non comptabilisée (15,5 %) dans le bilan, peut-être perdue par dénitrification est inférieure à celle rapportée pour le tilapia.

La distribution des extrants de phosphore lors de l'élevage de sandre est la suivante : 73,2 % du phosphore est stocké dans la biomasse produite (66,2 % dans les poissons et 7 % dans les plantes) et 12,3 % de l'intrant en phosphore quitte le système par les effluents (7,7 % par l'effluent liquide et 4,7 % par les boues). La quantité de phosphore perdue par l'eau (effluent liquide) est semblable à celle observée dans la production de tilapia. Par contre, on retrouve moins de phosphore dans les boues et la part non comptabilisée s'élève à 14,5 %, ce qui suggère que le contenu en phosphore évacué par les particules solides contenues dans les boues ait pu être sous-estimé. D'autres auteurs ont réalisé des observations similaires, avec une part allant de 6,6 % à 25 % de phosphore non comptabilisé lors de bilan de masses au sein de systèmes aquaponiques (Jaeger et al., 2019 ; Yang & Kim, 2020).

Le calcium et le magnésium sortent du système majoritairement par l'effluent (Ca : 62,3 % ; Mg : 71,6 %). Seulement 25,2 % du Ca et 9 % du Mg apportés sont stockés dans la biomasse (plantes et poissons). Le bilan indique un déficit de 12,5 % de Ca et 19,4 % de Mg non mesurés. Ces composés étant en grande partie présents sous forme soluble dans l'effluent, le déficit observé peut s'expliquer par une imprécision des mesures ayant servi à l'extrapolation des volumes d'effluents produits.

La distribution du potassium dans les extrants du système se répartit comme suit : 26,6 % dans les plantes, 37,2 % dans l'effluent, 0,2 % dans les boues et 36 % non comptabilisés. Il est important de

noter que le potassium n'a pas été mesuré dans les poissons, on s'attend donc à ce que la fraction non comptabilisée soit plus faible car une partie du potassium se trouve en réalité dans les poissons. C'est le cas dans notre bilan de masse effectué sur le tilapia où 7 % des intrants en K se trouvent dans les poissons. Étant donné la grande solubilité du K, il est normal de trouver une proportion importante dans l'effluent et très peu dans les matières solides collectées dans les boues (Strauch et al., 2018).

Le bilan de masse du soufre présente un déséquilibre de 18,2 % en excès. Le soufre dans notre système est apporté à 55,3 % par l'eau du renouvellement et à 44,3 % par l'aliment. L'analyse des extraits montre que 16,5 % du soufre se trouve dans la biomasse (plantes et poissons), 79,5 % dans l'effluent liquide et 22,2 % dans les boues. La plus grande fraction du soufre se trouve donc dans l'effluent liquide.

Dans le cadre de la production de sandre, le fer est majoritairement apporté par la solution de nutriments (52,5 %) et ensuite par l'aliment 47,5 %. Il sort majoritairement du système par les boues (10,2 %), une petite fraction (4,9 %) est stockée dans la biomasse (plantes + poissons), 3,6 % se retrouvent dans l'effluent liquide et 81,4 % sont non comptabilisés. Le fer étant un composé peu soluble, son accumulation dans les boues n'est pas surprenante. C'est d'ailleurs également le cas dans l'étude de Strauch et al. (2018) où 54-67 % du fer est retrouvé dans les boues, ainsi que dans notre propre bilan sur le tilapia.

1.3. Conclusion

L'azote et le phosphore font partie des principaux fertilisants chimiques utilisés en agriculture et leur production consomme énormément d'énergie. De plus, le phosphore est extrait de roches phosphatées dont les gisements s'épuisent (Izydorczyk et al., 2022). Ce sont donc les principaux nutriments que l'on cherche à recycler dans les systèmes aquaponiques, afin d'optimiser l'utilisation des ressources et réduire le phénomène d'eutrophisation engendré dans les milieux aquatiques recevant les effluents des RAS chargés en azote et en phosphore.

Si l'on compare l'utilisation de l'azote entre la production de tilapia et de sandre on constate que 32 % de l'azote était stocké dans la biomasse (plantes + poissons) pour la première et 47 % pour la seconde. De plus, l'effluent était moins chargé en azote et la fraction non comptabilisée plus faible lors de la production de sandre. L'utilisation de l'azote au sein du système aquaponique était donc meilleure lors de la production de sandre, principalement en raison du rapport relativement plus élevé de production horticole par rapport à la production piscicole. Ce rapport était de 5,7 pour la production de sandre contre 2,4 pour la production de tilapia. Ce rapport plus élevé pour la production de sandre est possible, d'une part en raison du contenu plus élevé en protéines, et par conséquent en azote, de l'aliment ; d'autre part, il reflète une meilleure valorisation des nutriments contenus dans le système par une surface de production maraîchère relative plus élevée.

Il reste cependant de la marge pour l'optimisation. En effet, 34 % de l'azote est perdu par l'effluent liquide, ce qui représente encore une part importante à valoriser. Plusieurs pistes sont envisageables pour réduire cette quantité d'azote perdue : augmenter la surface de production horticole, cultiver d'autres espèces de plantes plus consommatrices d'azote ou encore diminuer le taux d'alimentation (Endut et al., 2014; Yang & Kim, 2020). A cela s'ajoute la perte de 15,5 % d'azote non comptabilisée dans le bilan, probablement majoritairement perdu sous forme de N_2 gazeux dans des processus de dénitrification. Même si une conception adéquate du système de production, visant notamment l'optimisation des flux hydrauliques, permet de réduire ou d'éviter les zones anoxiques favorisant la dénitrification, des communautés de bactéries dénitrifiantes cohabitent avec les bactéries nitrifiantes dans les RAS et contribuent à réduire la charge en azote des systèmes (Yang & Kim, 2020 ; Preena et al., 2021).

Cependant, si l'azote et d'autres macronutriments tels que le potassium, le calcium, le magnésium et le soufre sont présents en proportion importante (entre 26 et 92 %) dans l'effluent liquide, et donc potentiellement valorisable par la production végétale, le phosphore pourrait être limitant pour augmenter cette production. Notons que le potassium, qui peut être limitant pour la production végétale dans les systèmes aquaponiques (John et al., 2022), est dans notre cas disponible en raison de l'ajout de $KHCO_3$ utilisé pour le contrôle du pH.

La valorisation du phosphore, apporté par l'aliment, est très similaire dans les deux productions, avec environ 73 % retenus dans la biomasse produite, principalement piscicole. La part éliminée par l'effluent liquide dans l'environnement n'est que de 6 à 8 %. Les concentrations moyenne en P mesurées dans l'eau du système aquaponique sont d'environ 3 mg/L, ce qui pourrait en effet limiter le potentiel d'augmentation de la production végétale (Resh, 2013). Notons également que le P excrété par les poissons est principalement piégé dans les matières solides (fèces) et les rejets en P du système se font principalement par les boues issues de la filtration mécanique. Une autre piste pour réduire ces rejets serait de valoriser les boues, soit par digestion (anaérobie ou aérobie) et minéralisation en vue de les réutiliser dans le système (Goddek et al., 2016), soit par export et valorisation dans une autre production (p.ex. : épandage sur culture en pleine terre).

Concernant le potassium, le calcium et le magnésium, on observe des proportions dans les compartiments de sortie similaires entre les deux productions. Pour chacun de ces éléments, la fraction perdue par l'effluent est importante : > 25 % pour le potassium, > 60 % pour le calcium et > 70 % pour le magnésium. Il semble donc tout à fait envisageable de réduire les apports de dolomie et de bicarbonate de potassium si des apports réduits permettent tout de même de maintenir l'alcalinité au sein du système.

2. BILAN ÉNERGÉTIQUE ET HYDRIQUE

En parallèle du bilan de masses, une quantification précise de l'utilisation de l'eau et de la consommation énergétique dans le cadre des deux productions (tilapia et sandre) a été réalisée. Les données de consommation ont été enregistrées du 30/10/18 au 14/07/19 pour le tilapia et du 24/01/20 au 26/01/22 pour le sandre. Chaque semaine les compteurs d'eau et d'électricité ont été relevés lors de l'entretien hebdomadaire de l'unité de production.

2.1. Bilan énergétique

Concernant l'électricité, l'unité de production possède un compteur d'électricité général. D'autres compteurs sont également présents pour les postes de consommation clés, à savoir : les LEDs du compartiment horticole, la résistance qui permet de chauffer l'eau du système, la pompe de circulation et le tambour filtrant. La ventilation, le filtre UV ainsi que la turbine (aération) tournent en permanence à puissance nominale, ce qui permet de calculer leur consommation. Enfin, un poste « autres consommations » a été défini, il reprend toutes les consommations mineures tels que le plafonnier et les nourrisseurs. Le Tableau 30 détaille les consommations électriques par poste dans le cadre des deux productions.

Tableau 30. Consommations électriques (kWh) des différents postes au sein du pilote aquaponique lors de la production de tilapia et de sandre.

Poste	Tilapia			Sandre		
	kWh/j	kWh/an	%	kWh/j	kWh/an	%
Consommation générale	172,4	62939	100%	136,5	49808	100%
LEDs	75,8	27670	47%	46,7	17029	34%
Turbine	26,4	9636	17%	26,4	9636	19%
Autres consommations	23,7	8631	15%	23,3	8505	17%
Résistance	18,7	6819	12%	12,0	4361	9%
Pompe de circulation	15,7	5725	10%	16,4	5984	12%
Ventilation	8,5	3103	5%	8,5	3103	6%
Filtre UV	2,3	833	1%	2,3	833	2%
Tambour	1,4	523	1%	1,0	357	1%

La consommation électrique est importante, notamment en raison de la nature indoor du pilote et l'utilisation d'éclairage artificiel pour la production horticole. Durant la période de production de tilapia, la consommation électrique annuelle s'élevait à 62939 kWh, dont presque la moitié (47 %) dédiée à l'éclairage. Cette consommation était un peu plus faible (49808 kWh) lors de la production de sandre. L'ordre des postes de consommation (Tableau 30, %) est le même pour les deux productions

(tilapia vs sandre) à l'exception du chauffage (résistance) qui représentait une part plus faible lors de la production de sandre.

La différence de consommation électrique annuelle entre les deux productions, soit 13131 kWh, s'explique principalement par deux facteurs. Premièrement, la taille du compartiment horticole lors de la production de sandre a été réduite par rapport à la production de tilapia. Par conséquent, sur quatre étages de production de laitues éclairés lors de l'élevage du tilapia seuls trois l'étaient lors de l'élevage du sandre. Lors de la production de tilapia, la consommation électrique des LEDs s'élevait à 27670 kWh/an alors qu'elle était de 17029 kWh/an lors de la production de sandre ce qui représente une économie de 10642 kWh/an, soit plus de la moitié (81%) des économies réalisées en une année.

Le deuxième poste qui a permis de réaliser des économies conséquentes sur la dépense énergétique lors de la production de sandre est la résistance. Ceci s'explique par la différence de température d'élevage entre le tilapia (24-25°C) et le sandre (23-24°C). La consommation électrique pour le chauffage de l'eau lors de la production de tilapia était de 6819 kWh/an alors qu'elle était de 4361 kWh/an pour le sandre. Cela représente une économie de 2457 kWh/an en faveur de la production de sandre, soit 18 % des économies énergétiques réalisées en une année.

Les autres postes de consommation sont très semblables entre les deux modèles de production.

2.2. Bilan hydrique

La consommation hydrique se divise en deux postes principaux dans l'unité de production aquaponique, quantifiée par des compteurs séparés. Le tambour filtrant qui utilise de l'eau pour effectuer le rinçage de ses mailles et le renouvellement qui est un apport d'eau fraîche dans le système. Le rinçage (backwash) du tambour filtrant est réalisé avec de l'eau de distribution et non avec de l'eau du système aquaponique. Le renouvellement d'eau dans le système est environ de 2 % du volume total par jour, alors que la consommation d'eau par le tambour représente 7 à 8 %. L'utilisation de l'eau du système pour le rinçage induirait donc un renouvellement plus important et un lessivage des nutriments du système nécessaire à la production horticole. Afin d'optimiser la gestion des nutriments et le fonctionnement du système aquaponique, nous avons donc préféré utiliser de l'eau « propre » pour le rinçage du tambour et chercher des pistes pour la collecte et la valorisation de cet effluent hors du système (p.ex. : fertirrigation).

Durant la période d'élevage du tilapia, la consommation hydrique totale était de 625 m³/an, la consommation du tambour était de 490 m³/an (78 %) et le renouvellement s'élevait à 135 m³/an (22 %) (Tableau 31). Cela représente un apport d'eau fraîche de 371 L/jour, soit un taux de renouvellement de 2,1 % du volume total du pilote. Cet apport d'eau fraîche peut également être exprimé en fonction de la quantité d'aliment distribué, dans le cas du tilapia il était de 185 L/kg d'aliment.

Tableau 31. Consommations hydriques mesurées au cours des périodes de production du tilapia et du sandre.

Poste	Tilapia (m ³)			Sandre (m ³)		
	m ³ /j	m ³ /an	%	m ³ /j	m ³ /an	%
Renouvellement	0,37	135,3	22%	0,30	111,1	22%
Tambour	1,34	489,6	78%	1,10	402,7	78%
Total	1,71	625,0	100%	1,41	513,8	100%

Durant la période d'élevage du sandre, la consommation hydrique totale était de 514 m³/an, la consommation du tambour était de 403 m³ (78 %) et le renouvellement s'élevait à 111 m³/an (22 %). Cela représente un apport d'eau fraîche de 304 L/jour, soit un taux de renouvellement de 2,0 % du volume total du pilote, ou 301 L/kg d'aliment.

La production de tilapia consomme donc plus d'eau. Ceci s'explique par une production plus importante de tilapia (658 kg/an) que de sandre (229 kg/an). Par conséquent une quantité d'aliment plus grande était distribuée lors de la production de tilapia. Pour conserver la qualité d'eau, le tambour filtrant fonctionnait plus afin d'éliminer les déchets. Ceci est visible au niveau des consommations journalières hydriques et électriques du tambour plus élevées lors de la production de tilapia : 1,34 m³/jour et 1,43 kWh/jour pour le tilapia contre 1,10 m³/jour et 0,98 kWh/jour pour le sandre. Le renouvellement était lui aussi plus important lors de la production de tilapia afin de conserver une qualité d'eau appropriée.

3. IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

3.1. Analyse de cycle de vie

Les impacts environnementaux de la production aquaponique de tilapia et de sandre ont été évalués par analyse de cycle de vie (ACV), réalisée en collaboration avec l'Université Ca'Foscari et Bluefarm srl (Venise, Italie). L'ACV est un outil puissant pour évaluer la durabilité environnementale d'une production car elle fournit une quantification complète des impacts environnementaux directs et indirects (Forchino et al., 2017).

L'ACV peut être définie comme la compilation et l'évaluation des intrants, des extrants et de l'impact environnemental potentiel d'un système de production au cours de son cycle de vie. Selon la norme ISO 14040, elle se divise en quatre étapes (Figure 41).

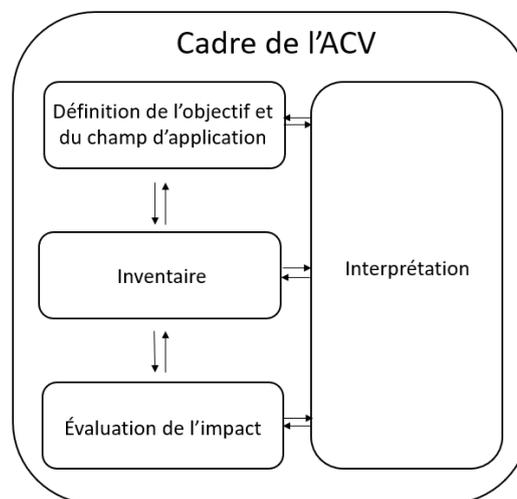


Figure 41. Étapes d'une ACV (ISO 14040).

Une première ACV a été réalisée au démarrage du projet, sur base de données théoriques et des plans de production établis, afin d'évaluer et d'optimiser la conception du système et son fonctionnement en production de tilapia. Les résultats de cette étude préliminaire font l'objet d'une publication (Andrea Alberto Forchino et al., 2018) et ne sont pas repris dans ce rapport.

Les résultats présentés dans cette partie couvrent l'évaluation environnementale de la production aquaponique de tilapia et de sandre, basée sur les données réelles de production récoltées durant les deux phases expérimentales. L'ACV réalisée sur le modèle tilapia a été menée dans le cadre du projet Aqualoci. Celle réalisée sur le sandre a été menée dans le cadre du projet Interreg GR V A (N° 073-4-08-191) « PERCIPONIE : Développement de la perciculture en aquaponie (2020-2022 ; <http://perciponie.eu/>) ». Les résultats globaux sont présentés dans ce rapport afin de permettre la comparaison des deux modèles de production.

Les ACV ont été réalisées grâce au logiciel SimaPro® version 9.3.0.3.

3.1.1. Objectif, unité fonctionnelle et champ d'application

La première étape de l'ACV consiste à définir l'objectif et les limites de l'étude. Dans notre cas, l'objectif est de comparer la même unité de production aquaponique mais sous deux scénarios d'élevage piscicole différents : la production de tilapia et la production de sandre. L'unité fonctionnelle est la référence qui permet de quantifier la performance d'un système productif. On y relie les intrants et les extrants et elle permet la comparaison entre différents systèmes. Dans le cadre de cette étude, la production végétale étant supérieure à la production piscicole en termes de biomasse, l'unité fonctionnelle a été définie comme étant la production d'1 kg de végétaux, et les poissons considérés comme un co-produit. L'allocation (répartition de la biomasse produite) a été calculée sur base d'un ratio entre la quantité totale produite de poissons et de végétaux. Dans le scénario tilapia, l'allocation était de 75% pour les végétaux et 25% pour les poissons, cela signifie que pour 1 kg de végétaux produits nous avons une co-production de 333 g de tilapia. Dans le scénario sandre, l'allocation était de 85% pour les végétaux et 15% pour les poissons ce qui signifie que pour 1 kg de végétaux produits nous avons une co-production de 176 g de sandre.

Le champ d'application de l'ACV pour les deux scénarios est l'unité de production aquaponique de Strée. Elle a été modélisée en utilisant une approche « du berceau à la porte » ; c'est-à-dire que les données ont été collectées depuis la conception et la construction de l'unité de production jusqu'à la production de végétaux et de poissons commercialisables. Par contre, les activités post-récolte (emballage, distribution des produits, etc ...) n'ont pas été prises en considération. Les processus pris en compte dans les limites du système sont illustrés à la Figure 42, à savoir les matières premières (aliment, équipement, consommables, ...), les consommations (hydriques et électriques) et le transport. Les extrants sont représentés par les émissions de phosphore et d'azote au travers de l'élimination des matières solides en suspension et des déchets de production.

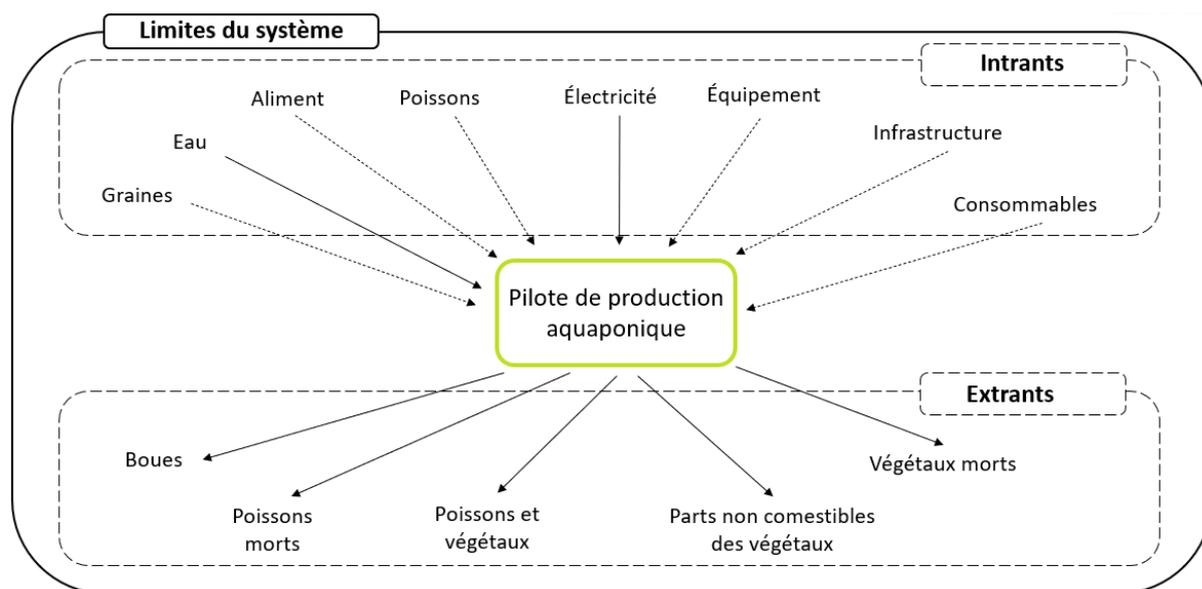


Figure 42. Limites du système définies pour les deux scénarios de production (tilapia et sandre) dans l'unité de production aquaponique de Strée. Les flèches en pointillés représentent le transport.

Tous ces processus qui caractérisent l'unité de production aquaponique ont ensuite été agrégés en six macro-catégories :

- infrastructure (bâtiment)
- transport
- consommation hydrique
- consommation énergétique
- production (ex : aliment, boues)
- système aquaponique (structures et équipement constituant le système aquaponique).

3.1.2. Inventaire du cycle de vie

Cette étape, critique pour l'ACV, correspond à la collecte des données. Plus les données brutes sont exhaustives, plus l'analyse est fiable. Dans le cas de cette étude, les données ont été collectées dès la construction du système et tout au long du fonctionnement des deux périodes de production expérimentale. Les données collectées couvrent la période du 30/10/18 – 14/07/2019 pour la production de tilapia et du 24/01/21 – 20/01/22 pour la production de sandre. Ces plages de données ont été choisies car elles sont représentatives du fonctionnement stable de l'unité de production aquaponique, elles ont permis d'évaluer la production et la consommation de l'unité de production sur une année complète dans le cadre des deux scénarios.

3.1.3. Évaluation de l'impact du cycle de vie

La troisième étape de l'ACV consiste à transformer les données brutes récoltées en indicateurs environnementaux. La méthode de référence CML-IA Version 3.01/Monde 2000 a été utilisée pour évaluer les catégories d'impact suivantes (Pré, 2014) :

- *Déplétion des ressources abiotiques.*
L'indicateur de cette catégorie d'impact est lié à l'extraction de minéraux et de combustibles fossiles en raison des intrants dans le système. Cette catégorie d'impact concerne la protection du bien-être et de la santé humaine ainsi que la santé des écosystèmes. Sa portée géographique est à l'échelle mondiale.
- *Potentiel de réchauffement climatique à l'horizon de 100 ans.*
Le changement climatique est lié aux émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Il peut avoir des effets néfastes sur la santé des écosystèmes et des humains. Sa portée géographique est à l'échelle mondiale.
- *Acidification.*
Le potentiel d'acidification des émissions dans l'air décrit le devenir et le dépôt des substances acidifiantes. Ces substances ont des effets divers sur les sols, les eaux souterraines et de surface

et par conséquent sur les écosystèmes et les organismes qu'ils abritent. Sa portée géographique varie de locale à continentale.

- *Eutrophisation.*

L'eutrophisation comprend tous les impacts dus à des niveaux excessifs de nutriments dans l'environnement. Elle est liée aux émissions de nutriments dans l'air, l'eau et le sol. Sa portée géographique varie de locale à continentale.

Deux autres indicateurs ont également été utilisés (Boulay et al., 2011) :

- *La demande d'exergie cumulée (CExD).*

L'exergie est une façon d'exprimer la qualité de l'énergie plutôt que son contenu énergétique, elle mesure le « travail » utile que peut fournir un certain vecteur énergétique. Ici elle est utilisée comme mesure de la perte potentielle de ressources énergétiques utiles. L'indicateur CExD décrit l'exergie totale prélevée dans la nature pour fournir un produit, en additionnant l'exergie de toutes les ressources nécessaires.

- *L'indice de stress hydrique.*

Cet indice décrit l'impact de la consommation d'eau dans le cycle de vie des produits ou des processus. Il peut servir de contrôle simple pour évaluer l'utilisation de l'eau en tenant compte de sa disponibilité et des prélèvements.

3.1.4. Interprétation et analyse des résultats

C'est l'étape finale où les résultats obtenus doivent être interprétés et discutés. Il est intéressant de noter que l'ACV n'est pas une analyse à sens unique, lors de chaque étape il est possible de revenir en arrière, d'apporter des modifications ou de tester différents scénarios ce qui permet de mieux comprendre l'objet de l'étude.

3.2. Résultats de l'ACV

Les résultats de l'ACV pour les productions de tilapia et de sandre figurent aux Tableaux 32 et 33, et la contribution des principaux processus est illustrée aux Figures 43 et 44. La comparaison entre les deux ACV réalisées montre des profils de contribution des processus majoritairement similaires entre les deux modèles de production (tilapia vs sandre).

La consommation énergétique représente la contribution majeure pour les catégories d'impact déplétion abiotique, réchauffement global et acidification dans les deux modèles de production. La consommation énergétique lors de l'élevage de tilapia contribue à hauteur de 83,8 % à la déplétion abiotique, 77,7 % au réchauffement global et 60,1 % à l'acidification. Ce qui est très similaire à l'élevage du sandre où la contribution de la consommation énergétique contribue à 75,6 % à la déplétion abiotique, 73,4 % au réchauffement global et 64 % à l'acidification.

La catégorie d'impact stress hydrique montre également un profil similaire entre les deux productions. La contribution majeure dans les deux cas est liée à la consommation d'eau de ville pour remplir le système et rincer la maille du tambour filtrant.

La différence principale observée entre les deux productions se trouve au niveau de la catégorie d'impact eutrophisation. Dans les deux cas, la consommation énergétique et la production sont les processus qui contribuent majoritairement à l'eutrophisation. Cependant, lors de la production de sandre c'est la consommation énergétique, qui s'élève à 65 %, qui représente la contribution la plus importante. Le processus de production quant à lui ne contribue qu'à 18 % à l'eutrophisation. Lors de la production de tilapia, l'inverse est observé. La contribution du processus de production s'élève à 55 % et représente la contribution la plus importante à l'eutrophisation, alors que la contribution de la consommation énergétique est plus faible (41 %). Cela paraît logique sachant que la production de tilapia s'élève à 553 kg/an contre 211 kg/an pour le sandre (données de production utilisées pour l'ACV) et que nous avons mis en évidence lors du bilan de masses une meilleure utilisation de l'azote et du phosphore lors de la production de sandre. Cependant, en terme de valeur absolue, les impacts liés à l'eutrophisation semblent assez limités (0,017 kg PO₄³⁻ pour le sandre et 0,022 kg PO₄³⁻ pour le tilapia).

Tableau 32. Résultats de l'ACV concernant la production de tilapia dans le pilote aquaponique de Strée.

Production tilapia								
Catégorie d'impact	Unité	Total	Infrastructure	Transport	Consommation hydrique	Consommation énergétique	Production	Système aquaponique
Déplétion abiotique	MJ	103,444	3,798	1,732	1,397	86,668	7,002	2,847
Réchauffement global	kg CO ₂ eq	8,403	0,428	0,121	0,130	6,533	0,970	0,222
Acidification	kg SO ₂ eq	0,032	0,002	0,000	0,001	0,019	0,008	0,001
Eutrophisation	kg PO ₄ ⁻⁻⁻	0,022	0,001	0,000	0,000	0,009	0,012	0,000
Stress hydrique	m ³	0,206	0,001	0,000	0,147	0,049	0,007	0,002

Tableau 33. Résultats de l'ACV concernant la production de sandre dans le pilote aquaponique de Strée.

Production sandre								
Catégorie d'impact	Unité	Total	Infrastructure	Transport	Consommation hydrique	Consommation énergétique	Production	Système aquaponique
Déplétion abiotique	MJ	136,708	5,722	17,461	1,689	103,343	4,203	4,290
Réchauffement global	kg CO ₂ eq	10,612	0,645	1,221	0,157	7,789	0,467	0,334
Acidification	kg SO ₂ eq	0,036	0,004	0,005	0,001	0,023	0,002	0,001
Eutrophisation	kg PO ₄ ⁻⁻⁻	0,017	0,001	0,001	0,000	0,011	0,003	0,000
Stress hydrique	m ³	0,243	0,002	0,001	0,178	0,058	0,002	0,003

Aussi, la comparaison des valeurs absolues totales pour les différentes catégories d'impacts met en évidence des impacts environnementaux plus faibles pour la production aquaponique de tilapia que pour la production aquaponique de sandre, en particulier concernant la déplétion abiotique et le potentiel de réchauffement climatique. Ce constat tient principalement à la plus grande productivité

du modèle tilapia qui permet une meilleure valorisation des ressources utilisées, en particulier l'énergie.

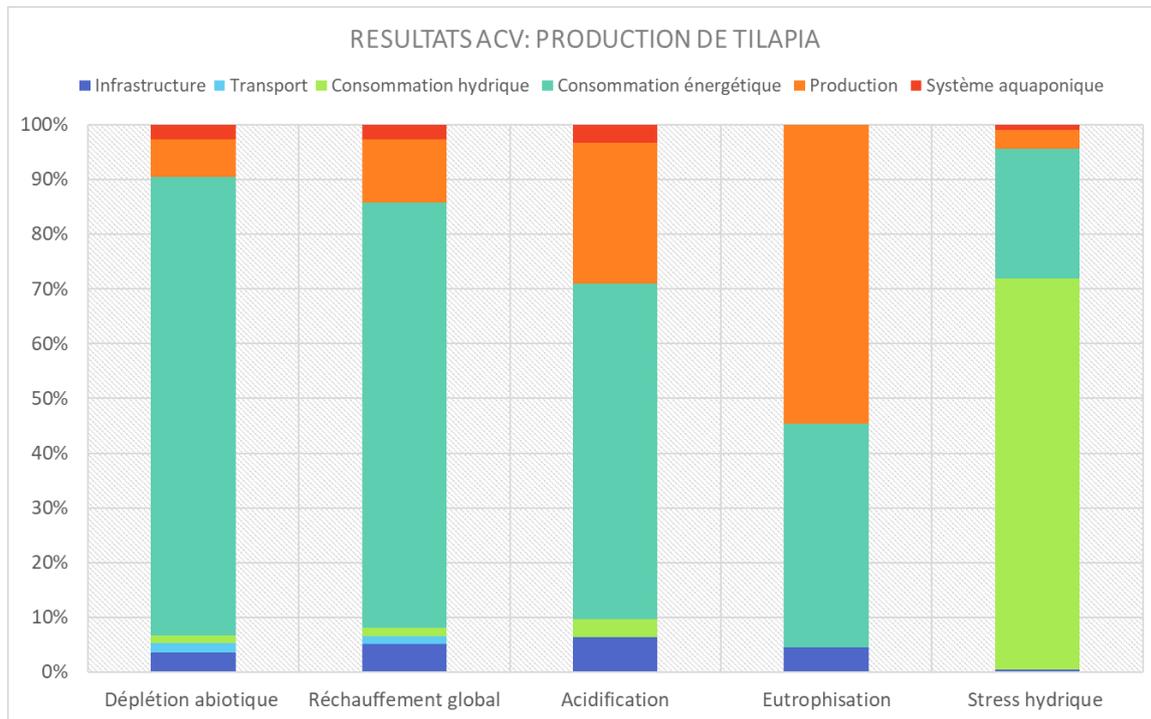


Figure 43. Catégories d'impact et contributions relatives (%) pour les principaux processus de la production aquaponique de tilapia.

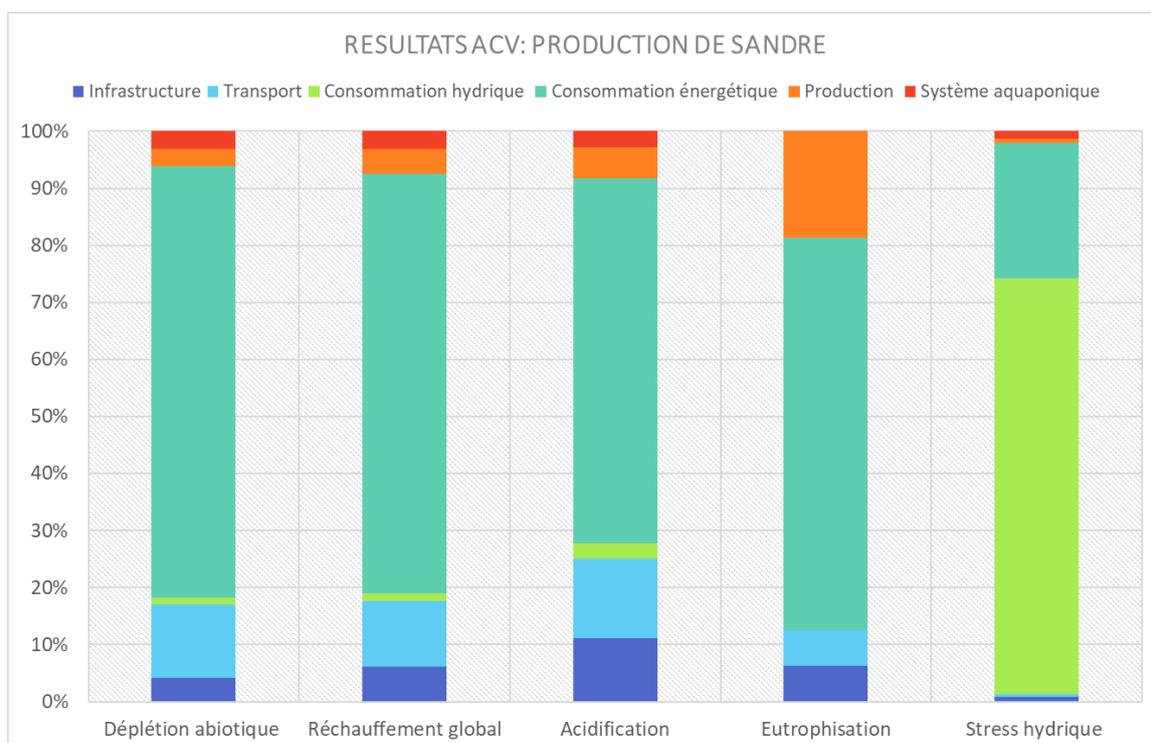


Figure 44. Catégories d'impact et contributions relatives (%) pour les principaux processus de la production aquaponique de sandre.

La « demande d'exergie cumulée » présente un profil similaire dans le cadre des deux productions (Figures 45 et 46). La consommation d'énergie est la contribution majeure suivie du transport dans les deux cas (Figure 45 et 46). L'analyse CExD divise les catégories d'impacts entre renouvelable et non renouvelable. En tout, dix catégories de ressources sont analysées. Cette analyse met en évidence que la majorité de l'énergie utilisée pour construire et faire fonctionner le système est dérivée de sources d'énergie non-renouvelables à savoir l'énergie nucléaire (sandre : 244,33 MJ ; tilapia : 204,278 MJ) et fossile (sandre : 141,81 MJ ; tilapia : 110,789 MJ).

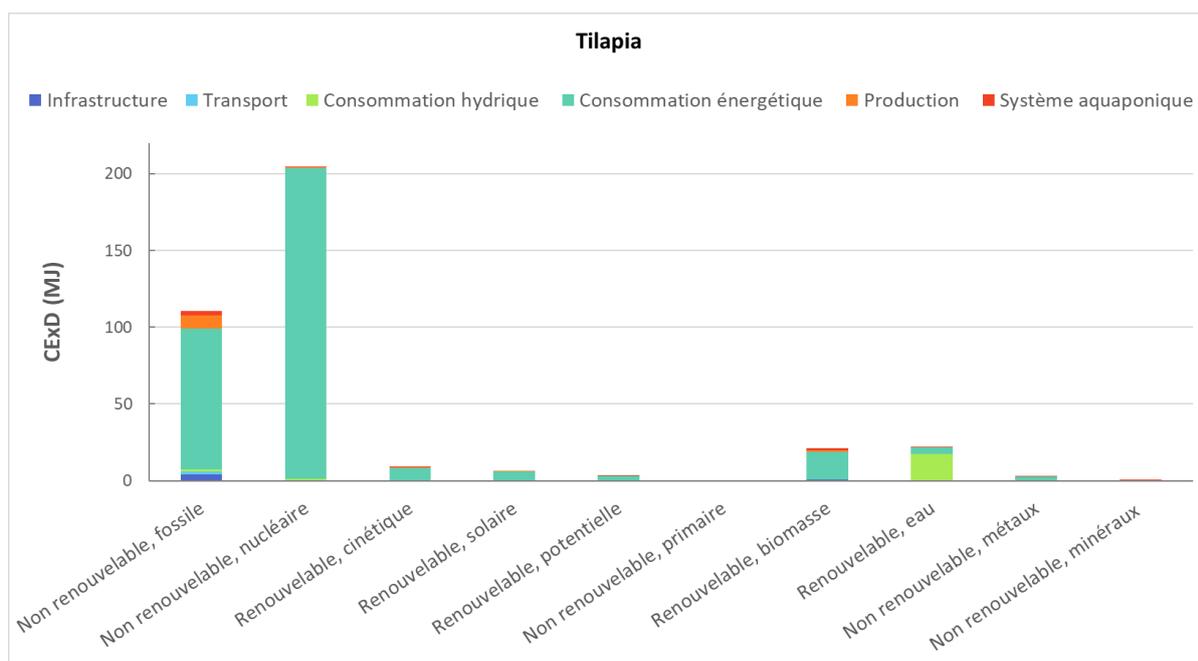


Figure 45. Demande d'exergie cumulée (CExD) associée à la production aquaponique de tilapia.

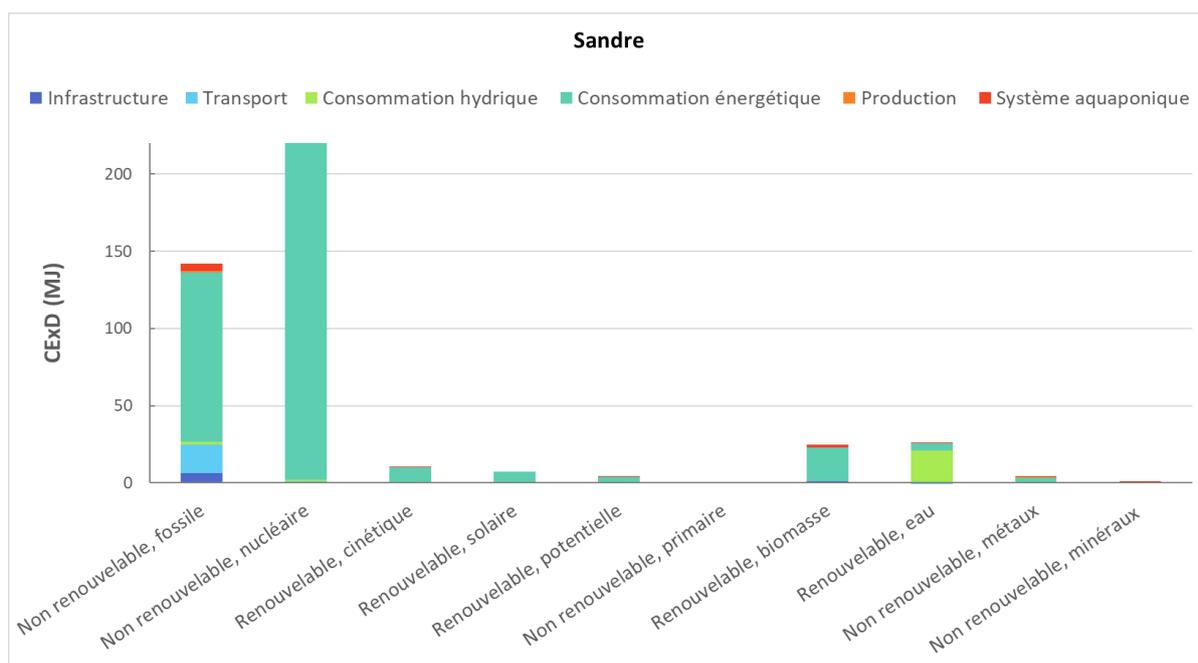


Figure 46. Demande d'exergie cumulée (CExD) associée à la production aquaponique de sandre.

3.3. Conclusion

Les résultats de l'ACV (tableaux 32 et 33) ont mis en évidence que pour l'unité de production aquaponique de Strée, la consommation énergétique est la charge la plus importante d'un point de vue environnemental, peu importe la production. De plus, le système consomme majoritairement de l'énergie nucléaire et de l'énergie fossile non-renouvelable.

Des pistes d'optimisation sont cependant envisageables. L'installation de panneaux solaires permettrait de réduire la dépendance de l'unité de production vis-à-vis des énergies non renouvelables. La piste de la valorisation des boues pour la production de biogaz mérite elle aussi d'être envisagée.

La comparaison des deux productions montre que l'élevage de tilapia a un impact environnemental réduit comparé à la production de sandre en ce qui concerne la déplétion abiotique, l'acidification, le stress hydrique, la demande cumulée en exergie et le réchauffement global. Ceci est particulièrement visible pour cette dernière catégorie, l'empreinte carbone de la production de tilapia (8,4 kg CO₂ équ.) étant moins élevée que celle du sandre (10,6 kg CO₂ équ.).

La seule catégorie d'impact qui fait exception et qui présente un impact environnemental moindre lors de la production de sandre est l'eutrophisation. Ceci peut s'expliquer par une production de tilapia plus importante et une meilleure utilisation de l'azote et du phosphore lors de la production de sandre. Cependant, en terme de valeur absolue, les impacts liés à l'eutrophisation semblent assez limités (0,017 kg PO₄³⁻ pour le sandre et 0,022 kg PO₄³⁻ pour le tilapia).

Comme nous l'avons vu dans le chapitre « bilan de masses », l'optimisation de l'utilisation des nutriments lors des deux productions est tout à fait envisageable, par conséquent cette catégorie d'impact pourrait être encore réduite à l'avenir.

VII. DISTRIBUTION – FAISABILITÉ ÉCONOMIQUE

1. EVALUATION ÉCONOMIQUE DU SYSTÈME PILOTE

1.1. Distribution des produits

1.1.1. Prix du marché

L'un des objectifs de cette étude était l'identification de circuits courts pour évaluer le potentiel de distribution des produits aquaponiques (végétaux et poissons). Le prix de vente des poissons a été établi sur base d'échange avec les acteurs de la distribution (poissonniers, grossistes et restaurateurs) et des données disponibles auprès des institutions en charge de la surveillance du marché du poisson européen (European Market Observatory for Fisheries and Aquaculture Products, <https://www.eumofa.eu/>; FAO Globefish, European Price Report, <https://www.fao.org/in-action/globefish/globefish-home/en/>).

Il ressort de ces recherches (menées en 2020) que, dans notre région, le marché du tilapia est majoritairement ethnique, visant principalement les communautés africaines. Les restaurateurs se procurent du tilapia entier congelé à un prix d'environ 3 €/kg. L'EUMOFA, rapporte un prix de 2,86€ pour le même produit.

Le sandre, lui, est distribué aux restaurateurs et poissonniers par des grossistes au prix de 9,5 €/kg (pour de poissons de 1,2 kg). Les grossistes Océan Marée et Difalux ont indiqué se fournir dans les pays d'Europe du Nord, respectivement au Danemark et en Suède. L'EUMOFA indique un prix moyen de 12,41 €/kg (sans préciser la forme du produit), et la FAO (Globefish) rapporte un prix identique de 9,5 €/kg pour du sandre frais entier vendu chez le grossiste en France.

D'après le Centre Interprofessionnel Maraîcher (CIM), le prix moyen d'une laitue en Wallonie en sortie d'exploitation était de 0,45 € en 2018. Concernant les plantes en pots, le prix de vente en sortie de production varie entre 1,00 € et 1,20 € selon la taille du pot et l'espèce cultivée (Jardins de Bellecourt, PME spécialisée dans la production de plantes en pots cultivées en biologique).

Tableau 34. Évaluation des prix du marché wallon pour les produits aquaponiques en 2020.

Produit	Prix	Source
Tilapia (entier congelé)	2,86 €/kg	EUMOFA, restaurateurs
Sandre (entier frais)	9,50 €/kg	EUMOFA, grossistes (Océan Marée, Difalux)
Laitues (serre)	0,45 €/pc	CIM
Aromatiques (pot)	1 – 1,20 €/pc	Producteur (Jardins de Bellecourt)

1.1.2. Vente de la production

Une fois les prix du marché établis, des canaux de ventes ont été recherchés afin d'écouler localement la production du pilote aquaponique (Tableau 35).

Concernant la production végétale, différentes plateformes de vente et magasins de proximité ont été contactées pour évaluer les opportunités d'écoulement de la production aquaponique. Si certaines structures accueillent les produits aquaponiques de manière positive grâce au message de durabilité véhiculé par l'aquaponie, d'autres sont réticentes face à la commercialisation de ces produits en raison de l'absence de saisonnalité (vente de salades en hiver et concurrence avec les maraîchers traditionnels en été) ou l'absence d'ancrage à la terre dans la culture hydroponique.

La coopérative de distribution locale Hesbicoop a accepté de commercialiser les pots et les laitues, ces dernières uniquement en période hivernale (afin de ne pas concurrencer les producteurs en pleine terre en période estivale), aux prix de 1,20 €/pot et 1,50 €/laitue. Ces prix sont supérieurs à ceux du marché pratiqués dans la plus grande distribution. Cependant, le CERER ne disposait pas de la logistique nécessaire à l'écoulement (transport) de ces produits et la production végétale n'a pas été écoulée par ce biais.

La production piscicole a été écoulée (poissons entiers non éviscérés) de façon locale, sur des circuits spécifiques pour chaque produit, tilapia et sandre. Le tilapia a été vendu entre 06/2018 et 08/2019. La demande, irrégulière, provenait principalement de particuliers et restaurateurs africains. Une partie de la production a également été vendue à la cuisine de collectivité locale de l'asbl Devenirs. Cependant, cette collaboration n'a pu se pérenniser en raison de l'absence de capacité de transformation (demande pour des filets). Le prix de vente, variable, était compris entre 2,50 et 8,00 €/kg. En tout, 966 kg de tilapia ont été écoulés au prix moyen de 3,38 €/kg. Les poissons issus de la production pilote et vendus en circuit court avaient un poids moyen variant de 500 à 950 g.

La production de sandre a été vendue presque exclusivement à un poissonnier local (l'Aquarium-Coumont, Ohey). De 07/2020 à 12/2021, 294 kg de sandres (poids moyen : 1105 g) ont été vendus au prix de 12,00 €/kg. Notons, que les ventes de sandres réalisées pour le même client après la période du projet (à partir du 08/2022) ont été conclues au prix de 15,00 €/kg, en raison de l'augmentation globale des prix du marché, notamment le prix final consommateur.

Tableau 35. Distribution des produits aquaponique issus du système pilote.

Produit	Prix	Volume	Valeur	Client
Tilapia (entier frais)	3,38 €/kg	966 kg	3270 €	Particuliers - restaurateurs
Sandre (entier frais)	12,00 €/kg	294 kg	3528 €	Poissonnerie (Aquarium)
Laitues (automne/hiver)	1,50 €/pc	/	/	Hesbicoop
Plantes en pots	1,20 €/pc	/	/	Hesbicoop

1.2. Bilan économique

L'unité de production aquaponique de Strée a été conçue pour offrir des données technico-économiques réalistes, afin d'évaluer si l'aquaponie peut être envisagée comme une activité de production aquacole durable en Wallonie. Ces données ont été utilisées afin d'estimer les coûts de production des deux modèles choisis (tilapia vs sandre). Ces résultats ont ensuite été croisés avec les données du marché (estimation des recettes) afin d'évaluer la rentabilité du système et dégager des pistes d'optimisation dans la perspective d'une transposition du modèle à plus grande échelle.

1.2.1. Analyse des coûts

Coûts fixes

Par définition, les coûts fixes sont l'ensemble des coûts qui évoluent indépendamment du niveau d'activité de l'entreprise, mais que l'entreprise doit nécessairement payer pour continuer à fonctionner. Ils ne sont pas proportionnels à l'activité de l'entreprise, et peuvent donc être relativement stables sur une période donnée.

Dans cette étude, les charges fixes prises en compte pour l'évaluation technico-économique de l'unité de production aquaponique sont les suivantes : les salaires, les charges sociales et l'amortissement des investissements.

Le temps de travail pour faire fonctionner l'unité de production a été estimé à 560 h/an (Tableau 36). Sur base d'un temps-plein de 1725 h/an, cela représente 0,32 ETP. Le coût salarial annuel pour cette charge de travail, calculé pour un technicien bachelier, s'élève 8470,08 €. À cela s'ajoute 38,07 % de charges sociales, donnant un coût total de 11 694,64 €. L'investissement total a été évalué à 79938 € pour une surface de 103 m², soit 773,27 €/m² (Tableau 37).

Tableau 36. Estimation du temps de travail nécessaire au fonctionnement de l'unité de production aquaponique.

Activité	Temps estimé (h)	h/semaine	h/an
Entretien journalier *	0,5	3,5	183
Récolte des laitues**	1,83	1,83	95
Récolte des pots***	2,25	2,25	117
Pêche****	2,75	0,67	35
Entretien hebdomadaire*****	2,5	2,5	130
TOTAL		10,75	560

* Purges des bassins, mesure de la qualité de l'eau, relevé des morts, nourrissage, arrosage des semis.

** Récolte, siphonage des bacs, mise en culture, semis, nettoyage.

*** Récolte, mise en culture, semis, nettoyage des gouttières.

**** Pêche, vidange et remplissage des bassins, nettoyage.

***** Relevés des compteurs, nettoyage bac de charge et tambour filtrant, vérification réserve d'eau, renouvellement et aération.

Les coûts liés à l'investissement peuvent être répartis en grands postes comme suit : bâtiment, compartiment aquacole et compartiment horticole (Tableau 37). Le coût des amortissements a été obtenu en calculant la dépréciation annuelle de chaque dépense due à la construction du pilote. La méthode de dépréciation utilisée est linéaire (chaque année l'investissement perd la même valeur), et se fait sur 25 ans pour les postes bâtiment et horticulture (Andrea Alberto Forchino et al., 2018). Certains équipements du compartiment aquacole subissent une dépréciation plus rapide, avec une durée de vie moyenne de 14 ans. Le terrain étant mis à disposition par le CTA, son coût n'est pas inclus.

Tableau 37. Postes des investissements et leur dépréciation annuelle.

Bâtiment	Coûts	Dépréciation annuelle	Durée de vie
Matériaux de construction	18 844,27 €	753,77 €	25 ans
Outils de construction	717,80 €	28,71 €	25 ans
Réseau électrique / éclairage	5 185,14 €	207,41 €	25 ans
Réseau eau	389,95 €	15,60 €	25 ans
Divers	1 281,31 €	51,25 €	25 ans
SOUS-TOTAL	26 418,47 €	1 056,74 €	25 ans
Compartiment aquacole			
Bassins d'élevage	2 514,45 €	100,58 €	25 ans
Tuyauterie	8 702,94 €	348,12 €	25 ans
Biofiltre	746,57 €	29,86 €	25 ans
Tambour filtrant	3 856,27 €	385,63 €	10 ans
Filtre UV	1 047,57 €	104,76 €	10 ans
Bac de charge	200,00 €	8,00 €	25 ans
Ventilation	6 952,79 €	278,11 €	25 ans
Chauffage	392,65 €	78,53 €	5 ans
Système d'alarmes	1 205,16 €	120,52 €	10 ans
Pompes	6 034,22 €	603,42 €	10 ans
Systèmes d'aération	3 480,93 €	348,09 €	10 ans
Divers	2 723,63 €	272,36 €	10 ans
SOUS-TOTAL	37 857,18 €	2 677,98 €	14 ans
Compartiment horticole			
Structure étagères – bacs de culture	5 212,43 €	208,50 €	25 ans
Éclairage	10 449,57 €	417,98 €	25 ans
SOUS-TOTAL	15 662,00 €	626,48 €	25 ans
TOTAL	79 937,65 €	4 361,20 €	18 ans

Coûts variables

Par définition, les coûts variables sont l'ensemble des coûts liés à l'activité de l'entreprise. Ils dépendent du volume de production. Plus celle-ci est importante, plus les coûts variables le sont également. Les coûts variables pris en compte dans cette étude sont figurés au Tableau 39.

Premièrement, les coûts liés aux consommations électriques et hydriques ont été calculés. Les détails de la consommation d'eau et d'électricité du pilote de production aquaponique ont été présentés au § VI.2. Les coûts de l'eau et de l'électricité considérés ici sont respectivement de 3,23 €/m³ et 0,2089 €/kWh.

Ensuite, le coût des consommables a été pris en compte. Les consommables nécessaires au fonctionnement de l'unité de production aquaponique sont les suivants : graines, mousses de germination, pots, terreau, intrants chimiques, aliment et alevins.

La production horticole nécessite des graines ainsi que les substrats correspondants (laine de roche, pots, terreau). Au total (laitues + plantes en pots), le coût des consommables liés à la production horticole lors de l'élevage de tilapia s'élève à 2260,99 €, alors qu'il atteint 1945,88€ lors de l'élevage de sandre. Cette différence tient à la surface de culture et au volume de production plus faible avec le sandre.

Les intrants chimiques se composent de la dolomie, du bicarbonate de potassium et de la solution de micronutriments nécessaires aux plantes. A cela s'ajoute les produits d'entretien (HNO₃ et H₂O₂) et de désinfection (virkon) utilisés dans le pilote de production. Le coût des intrants chimiques s'élève à 629,36 €/an pour le tilapia et 523,39 €/an pour le sandre. Le coût moins élevé lors de la production de sandre s'explique principalement par une quantité d'aliment distribuée plus faible, ce qui entraîne moins d'intrants pour le contrôle du pH. Il est intéressant de noter que le coût du produit de désinfection utilisé pour les pédiluves et la désinfection du matériel est non négligeable. Il représente 48 % du coût de l'intrant chimique lors de la production de tilapia et 58 % lors de la production de sandre.

Les coûts variables liés à la production piscicole sont dédiés à l'aliment et l'achat d'alevins. La composition de l'aliment diffère en fonction de la production, le tilapia étant un omnivore à tendance herbivore et le sandre un carnivore. Cela influe sur le prix ainsi que la marque, la granulométrie et la quantité achetée. L'aliment pour tilapia coûtait 1,40 €/kg alors que l'aliment pour sandre s'élevait à 2,23 €/kg (à noter que le coût du transport est intégré dans le coût total de l'aliment). Cependant, la consommation d'aliment étant plus élevée avec le tilapia (946 kg/an) qu'avec le sandre (358 kg/an) les coûts variables sur une année sont plus importants lors de l'élevage du tilapia (1324,40 €) que lors de l'élevage de sandre 798,34 €.

Le coût des alevins s'élève à 397,44 € pour le tilapia et 1463,27€ pour le sandre. Cette différence s'explique par un prix d'achat des alevins de tilapia beaucoup plus faible 0,40 €/pièce à 1 g (source :

Aquakoi nv, 2490 Balen) que celui de sandre, achetés 2,12 €/pièce chez FISH2BE (pour des poissons de 30 g).

Au final, la somme des coûts variables liées à la production de tilapia (19778,85 €) sont plus élevés que ceux liés à l'élevage de sandre (16795,47 €). Les principaux postes de dépenses sont l'électricité (66 % des coûts variables), l'eau (10 %) et l'aliment (7 %) pour le modèle tilapia, et l'électricité (62 %), l'eau (10 %) et l'achat d'alevins (9 %) pour le modèle sandre. La différence s'explique principalement par une consommation d'électricité et d'eau moindre lors de la production de sandre dus à une production de poisson et de plantes moindre lors de cet élevage.

1.2.2. Chiffre d'affaire potentiel

Afin d'estimer les revenus potentiels générés par le pilote, il convient de calculer sa capacité de production, parallèlement au prix en vigueur sur le marché, considérant que l'ensemble de la production est vendu.

Le Tableau 38 détaille les revenus potentiels annuels générés par les produits aquaponiques : laitue (pommée, batavia, feuille de chêne), plantes en pots (persil, basilic, coriandre, roquette), ainsi que les deux espèces de poissons tilapia et sandre. Les prix indiqués pour chaque produit sont ceux que nous avons pu obtenir dans les canaux de distribution locaux identifiés. Le fait de proposer des produits frais et locaux avec pas ou peu d'intermédiaires, permet, pour des petits volumes, d'atteindre des prix de vente supérieurs à ceux de la grande distribution.

Tableau 38. Détail du chiffre d'affaire annuel potentiel du pilote aquaponique.

	TILAPIA			SANDRE		
	Unités produites/an	Prix de vente	Chiffre d'affaire	Unités produites/an	Prix de vente	Chiffre d'affaire
Production horticole						
Laitue pommée	2392	1,50 €	3.588,00 €	1196	1,50 €	1.794,00 €
Laitue batavia	1196	1,50 €	1.794,00 €	1196	1,50 €	1.794,00 €
Laitue feuille de chêne	1196	1,50 €	1.794,00 €	1196	1,50 €	1.794,00 €
Total laitues			7.176,00 €			5.382,00 €
Basilic	3744	1,20 €	4.492,80 €	3328	1,20 €	3.993,60 €
Roquette	1248	1,20 €	1.497,60 €	1664	1,20 €	1.996,80 €
Persil	1248	1,20 €	1.497,60 €	832	1,20 €	998,40 €
Coriandre	1248	1,20 €	1.497,60 €	832	1,20 €	998,40 €
Total pots			8.985,60 €			7.987,20 €
Production piscicole						
Poissons	658 kg/an	3,38 €/kg	2.224,04 €	229 kg/an	12,00 €/kg	2.748,00 €
Total			18.385,64 €			16.117,20 €

Les recettes dégagées dans le modèle de production tilapia (18385,64 €) sont supérieures à celle du modèle sandre (16117,20 €). Cependant, cette différence n'est pas grande compte tenu de la différence de productivité des deux modèles. Pour rappel, l'élevage aquaponique du tilapia a permis de produire 658 kg/an de poissons, 4784 laitues/an et 7488 plantes en pots/an alors que l'élevage du sandre a permis de produire 229 kg/an de poissons, 3588 laitues/an et 6656 plantes en pots/an. Les différences dans les volumes de production (la biomasse de sandre produite est presque 3 x plus petite que celle de tilapia) sont donc en partie compensées par un prix de vente beaucoup plus élevé pour le sandre par rapport au tilapia.

Il a été souligné précédemment qu'il était tout à fait envisageable d'améliorer la production de sandre et de tilapia. Dans le scénario tilapia, une augmentation de la densité d'élevage à 100 kg/m³ et une amélioration de la gestion des stocks (sécuriser l'écoulement des poissons arrivés à taille commerciale) permettrait d'atteindre une production de 1065 kg/an. Pour le sandre une meilleure sélection de l'approvisionnement en alevins et une augmentation de 10 % du volume d'élevage permettrait d'atteindre une production de sandre de 461 kg/an. Dans ce cas et en considérant une production d'aromates égale dans les deux cas, le chiffre d'affaire s'élèverait à 18762,90 € pour le tilapia et 18901,20 € pour le sandre. Ainsi l'élevage de sandre, bien que moins productif, permet une rentrée financière équivalente à celle du modèle tilapia.

Notons également que le prix de vente du tilapia était un peu faible car il a manqué un peu de temps durant cette phase de production pour sécuriser les circuits de distribution. Cependant, en vente directe, un prix de 5 €/kg est tout à fait envisageable, ce qui porterait le chiffre d'affaire potentiel du modèle tilapia à 20488,20 €.

1.2.3. Analyse financière

Les données récoltées permettent d'effectuer un bilan économique du système et de comparer les deux scénarios de production (tilapia vs sandre) afin d'identifier les points clés à optimiser. Le diagnostic économique révèle un bilan négatif de 18449,05 € pour le tilapia et 17734,11 € pour le sandre (Tableau 39). Le résultat d'exploitation du sandre est donc légèrement meilleur que celui du tilapia.

Les coûts fixes pour l'unité de production aquaponique sont les mêmes (17055,84 €) dans les deux scénarios de production. Ils tiennent compte des salaires, des charges sociales de l'amortissement de la structure et du petit matériel nécessaire à son fonctionnement. Dans le cas de l'unité de production aquaponique de Strée, les salaires représentent 50 % des coûts fixes et sont suivis par l'amortissement (26 %).

La plus grosse différence observée entre les deux scénarios de production se trouve au niveau des coûts variables. En effet, les coûts variables liés à la production de tilapia sont plus élevés de près de 3000 € en comparaison au modèle sandre. Cela s'explique principalement par une production de tilapia et de plantes plus importante, qui induit une consommation d'électricité et un coût d'alimentation plus élevé. Le coût d'électricité plus élevé lors de l'élevage du tilapia est principalement lié à la surface

de culture plus importante dédiée aux laitues (33 m² vs 25 m²) et qui nécessitait plus d'éclairage LED. Or nous avons vu précédemment que l'éclairage LED du compartiment horticole est le poste le plus consommateur d'énergie. Concernant l'aliment, la production de tilapia est presque 3 x plus élevée que celle du sandre et nécessite par conséquent plus d'aliment. La quantité d'aliment distribuée est de 946 kg/an pour le tilapia contre 358 kg/an pour le sandre. Cela cause un coût variable plus élevé 1324,40 € pour le tilapia contre 798,34 € pour le sandre, et ce malgré un prix de l'aliment tilapia plus faible que celui du sandre, respectivement 1,40 €/kg et 2,23 €/kg.

Par contre, le chiffre d'affaire réalisé est légèrement plus élevé pour le tilapia (18385,64 €) que pour le sandre (16117,20 €). Cette différence de 2268,44 € s'explique par une production de laitues et de plantes en pots moindre lors de l'élevage de sandre ainsi que par une production de sandre nettement inférieure (229 kg/an contre 658 kg/an de tilapia). Il est cependant intéressant de noter que le sandre, avec son prix de vente nettement plus élevé, atteint un chiffre d'affaire pour la vente de poisson de supérieur au chiffre d'affaire réalisé par la vente de tilapia alors que la production de ce dernier est presque 3 x plus importante.

Tableau 39. Résultats d'exploitation du pilote aquaponique de Strée selon les deux modèles de production (tilapia vs sandre).

Bilan économique				
	Tilapia		Sandre	
Coûts fixes				
Salaires	8.470,08 €	50%	8.470,08 €	50%
Charges sociales (38,07%)	3.224,56 €	19%	3.224,56 €	19%
Amortissements	4.361,20 €	26%	4.361,20 €	26%
Petit matériel	1.000,00 €	6%	1.000,00 €	6%
Sous-total	17.055,84 €	100%	17.055,84 €	100%
Coûts variables				
Electricité	13.147,98 €	66%	10.404,95 €	62%
Eau	2.018,69 €	10%	1.659,64 €	10%
Graines	158,07 €	1%	126,63 €	1%
Aliment	1.324,40 €	7%	798,34 €	5%
Laine de roche	360,06 €	2%	270,05 €	2%
Intrants chimiques	629,36 €	3%	523,39 €	3%
Pots	736,06 €	4%	654,27 €	4%
Terreau	1.006,80 €	5%	894,93 €	5%
Alevins	397,44 €	2%	1.463,27 €	9%
Sous-total	19.778,85 €	100%	16.795,47 €	100%
Chiffre d'affaire				
Poissons	2.224,04 €	12%	2.748,00 €	17%
Laitues	7.176,00 €	39%	5.382,00 €	33%
Aromates	8.985,60 €	19%	7.987,20 €	50%
Sous-total	18.385,64 €	100%	16.117,20 €	100%
Résultat d'exploitation	-18.449,05 €		-17.734,11 €	

Le bilan économique négatif de l'unité de production aquaponique s'explique par sa taille pilote et par un coût de production élevé quel que soit l'espèce, lié principalement au coût de l'électricité qui représente 66 % des coûts variables de production dans le cadre de l'élevage du tilapia et 62 % dans le cadre de l'élevage du sandre. À cela s'ajoute que les laitues et le tilapia sont des espèces à faible valeur commerciale.

Cependant, plusieurs leviers peuvent être envisagés pour améliorer les performances de ces modèles. Premièrement, il est tout à fait envisageable d'améliorer la production de tilapia et de sandre (voir § IV.3.5 et V.4.5), ce qui permettrait de maximiser les recettes au niveau de la production piscicole. Un deuxième levier important nous est fourni par l'analyse du bilan de masses. En effet, on a pu observer que l'effluent liquide reste très chargé en nutriments. Il est donc tout à fait envisageable et souhaitable d'agrandir les surfaces de culture horticole ce qui permettrait de maximiser les recettes et de mieux valoriser l'aliment distribué dans le système. Enfin, le choix des variétés végétales joue également un rôle important. On peut voir sur le Tableau 38 que les plantes en pots permettent de réaliser un chiffre d'affaire supérieur aux laitues. D'autres espèces, à valeur commerciale encore plus élevée permettraient de maximiser les recettes et d'améliorer le bilan économique du pilote aquaponique.

Enfin, l'amortissement de l'infrastructure et les coûts énergétiques pourraient être réduits par des choix techniques ou technologiques différents, en particulier pour la production horticole. L'option choisie pour ce pilote de réaliser la production végétale à l'intérieur d'un bâtiment avec un éclairage artificiel (culture indoor) se justifiait dans le cadre de ce projet par la nécessité de produire en conditions environnementales constantes, afin de pouvoir plus facilement modéliser et comparer les schémas de production. Cependant, ce choix représente un coût d'investissement et de fonctionnement conséquent. Pour une transposition de la production à l'échelle commerciale, il serait adapté à la production de plantes à très haute valeur qui nécessitent des conditions constantes (p. ex. plantes médicinales), mais la production de légumes à plus faible valeur comme des laitues serait probablement plus adaptée et rentable en culture sous serre.

1.3. Conclusion

D'un point de vue économique, le modèle de production du sandre permet d'atteindre un bilan d'exploitation légèrement plus favorable. Le Tableau 40 permet de comparer les deux modèles de production (tilapia vs sandre) avec des schémas de production et des prix de vente optimisés.

Tableau 40. Résultat d'exploitation du pilote de production aquaponique dans le cadre des deux scénarios de production (tilapia vs sandre) ajustés.

	Tilapia	Sandre
Production		
Poisson	1 065 kg/an	461 kg/an
Prix de vente	5,0 €/kg	12,0 €/kg
Laitues	4 784 pc/an 1 252 kg/an	3 588 pc/an 1 056 kg/an
Prix de vente	1,5 €/pc	1,5 €/pc
Aromates	6 656 pc/an 256 kg/an	6 656 pc/an 256 kg/an
Prix de vente	1,2 €/pc	1,2 €/pc
Bilan économique		
Coûts fixes	17 056 €	17 056 €
Coûts variables	19 579 €	16 877 €
Chiffre d'affaire	20 488 €	18 901 €
Bilan d'exploitation	-16 146 €	-15 032 €

Ces bilans restent naturellement négatifs en raison de la taille du système de production. Cette évaluation ne prétend pas viser la rentabilité qui ne peut être atteinte à l'échelle pilote, mais constitue un exercice qui permet de fournir des données concrètes alimentant des scénarios de production, et identifier les points forts et points faibles de ces modèles pour une transposition à plus grande échelle.

Le bilan d'exploitation du sandre (-15032 €) reste supérieur de 7 % à celui du tilapia (-16146 €). C'est au niveau des coûts variables et du chiffre d'affaire que la production de sandre se démarque. Premièrement, les recettes générées par les poissons sont quasiment identiques (tilapia : 5325 € ; sandre : 5532 €) entre les deux modèles, la différence de productivité étant compensée par la différence de prix de vente. Le chiffre d'affaire est cependant légèrement plus bas dans la production de sandre car le volume de production végétale (laitues) est plus faible.

La seconde différence est visible au niveau des coûts variables. Le modèle de production du sandre permet d'économiser 2701 € par rapport au tilapia, principalement grâce à une consommation électrique et hydrique moindre lors de la production de sandre. La consommation électrique moindre lors de la production de sandre étant liée à la surface de culture réduite dédiée aux laitues, et par conséquent à un besoin moindre en éclairage artificiel. La quantité plus importante d'aliment distribuée lors de la production de tilapia joue également en sa défaveur en induisant un coût d'alimentation plus élevé que pour le sandre et ce malgré un coût d'achat moindre. De plus, la

distribution d'aliment plus importante lors de l'élevage de tilapia nécessite une consommation d'eau accrue afin de conserver la qualité d'eau nécessaire à l'élevage des poissons, et ce même s'il est moins riche en azote que l'aliment sandre.

D'un point de vue économique, bien qu'une faible différence apparaisse en faveur du modèle sandre, les deux modèles sont très proches et des petits ajustements des variables, opérés en fonction de la situation géographique, économique, ..., telles que le prix de vente, le coût de l'énergie ou de l'aliment peuvent faire pencher la balance dans un sens ou dans l'autre.

2. DÉVELOPPEMENT D'UN PROJET COMMERCIAL

2.1. Etudes de marché

Une étude de marché visant l'ensemble des produits issus de la production expérimentale a été confiée à un service externe (Christopher Valente Aquaculture Consultancy). L'objectif étant de définir les marchés potentiels et les canaux de distribution pour les poissons et légumes/plantes issus de la production aquaponique afin de définir le marketing stratégique à adopter pour ce type de produits et positionner une potentielle entreprise de production face aux opportunités du marché.

Les résultats de ces études sont décrits dans les deux rapports annexes :

- *Espèces d'intérêt pour la production aquaponique en Wallonie : le tilapia et le sandre*
- *Production végétale d'intérêt pour l'aquaponie en Wallonie : salades, herbes aromatiques et légumes racines.*

2.2. Plan d'affaires

Les données technico-économiques récoltées tout au long du projet et présentées dans ce rapport ont été confiées à un service externe (Christopher Valente Aquaculture Consultancy) chargé de l'élaboration d'un plan d'affaires pour le développement d'une ferme aquaponique commerciale. Ce plan d'affaires explore les deux modèles de production choisis (tilapia et sandre) sur base d'une production piscicole de 30 t. Les résultats sont présentés dans le rapport annexe :

- *Plan d'affaires : Production aquaponique de tilapia et de sandre en Wallonie.*

VIII. COMMUNICATION - DIFFUSION

Communication scientifique

- Présentation orale congrès : Gennotte V., Noël A., Nivelles R., Rougeot C. (2022). Towards a sustainable aquaponics farm model in Belgium: productivity and economic analysis of two contrasting fish production models (tilapia vs pikeperch). EAS conference, Rimini, Italie.
- Présentation orale congrès : Gennotte V., Forchino A.A., Takedo Tchuindjo S.M., Leroy J., Maesen P., Mélard C., Rougeot C., Pastres R., Brigolin D. (2019). Environmental and economic assessment of a pilot aquaponic production : a life cycle approach. EAS conference, Berlin, Allemagne.
- 12/02/19 : Séminaire sur l'aquaponie et présentation du projet AquaLocl à l'Université Ca' Foscari de Venise (Italie).
- Présentation orale congrès : Forchino A.A., Gennotte V., Mélard C., Brigolin D., Pastres R. (2018). Application of the life cycle approach to the set-up of a pilot aquaponic facility in Belgium. EAS conference, Montpellier, France.
- Participation COST Action FA1305 : The EU Aquaponics Hub: Realising Sustainable Integrated Fish and Vegetable Production for the EU : conférence finale (Université de Greenwich, 9-10/04/2018).
- Article scientifique et présentation orale congrès : Forchino A.A., Gennotte V., Maiolo S., Brigolin D., Mélard C., Pastres R. (2018). Eco-designing Aquaponics: a case study of an experimental production system in Belgium, *Procedia CIRP* 69 : 546-550. 25th CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference, Copenhagen, Danemark.
- Présentation orale congrès : Gennotte V. (2019). Aquaponics as a sustainable way to diversify local food production in Belgium: an integrated study. NovelFarm - International conference & trade show for new growing systems, soilless and vertical farming, Pordenone, Italie.
- Présentation poster congrès : Gennotte V., Forchino A.A., Mélard C., Rougeot C., Pastres R. (2017). Life Cycle Assessment (LCA) of an indoor pilot aquaponics production facility in Belgium. EAS conference, Dubrovnik, Croatie.

Communication grand public

- Conférence donnée au Kiwanis club de Huy pour présenter le projet (21/06/2018) : *L'aquaponie comme méthode durable de diversification de la production alimentaire : essai pilote à Strée.*
- Journées fermes ouvertes : présentation du projet et visite du système pour le public (23-24/06/2018).

- Présentation « *L'aquaponie : intérêt et développement en Wallonie* », en collaboration avec Thomas Tomson (Unité de phytopathologie intégrée et urbaine, ULiège), à l'assemblée sectorielle aquaculture de la SOCO PRO (Freux, 8/11/2017).
- Organisation d'un atelier *aquaponie* à la journée multidisciplinaire organisée au CTA (26/4/2018) : ateliers thématiques destinés aux étudiants en agronomie et en agriculture.
- Journée *Afriquement Dingue*, asbl Devenirs, Marchin (19/05/2018)
- 19/02/19 : Visite de l'école primaire des Gattes.
- 12/03/19 : Séminaire sur l'aquaponie et présentation du projet AquaLoCl aux étudiants du Master de spécialisation en Gestion des Ressources Aquatiques et Aquaculture (ULiège).
- 15/03/19 : Visite de l'école secondaire du Sartay (Embourg).
- 19/03/19 : Visite de l'école secondaire Sainte-Marie (Huy).
- 28/03/19 : Visite dans le cadre de la réunion conjointe GAL Leader/Commission Permanente *Illustrer et partager les résultats du RwDR - Thème 2 : Biodiversité et nouveaux modes de production*.
- 2/04/19 : Visite de la Chambre de Commerce d'Industrie et d'Agriculture de Dakar (Sénégal).
- 3/04/19 : Visite de l'UR AFPA, Equipe Domestication en aquaculture continentale, Université de Lorraine (France).
- 11/03/19 : Visite des étudiants du Master de spécialisation en Gestion des Ressources Aquatiques et Aquaculture (ULiège).
- 7/04/19 : Visites et présentations du projet AquaLoCl dans le cadre du rallye touristique *L'eau dans tous ses états*, journée d'ouverture de la saison touristique du Syndicat d'Initiative "Entre Eaux & Châteaux" (Modave-Marchin-Clavier-Tinlot).
- 26/04/19 : Journée multidisciplinaire de visites sur le terrain à destination des étudiants en agronomie et en agriculture organisée par le CTA.
- 30/04/19 : Visite de l'école secondaire IPES Huy.
- 14/05/19 : Visite des membres du Contrat de rivière Meuse Aval.
- 29/05/19 : Visite de l'AEIDL (Association Européenne pour l'Information sur le Développement Local).

(+ ..., liste non exhaustive).

Stages et mémoires

- Encadrement TFE : Optimisation fonctionnelle de la filtration mécanique d'un système aquaponique et essai de valorisation des effluents en production maraichère (Dossou-Yovo A.). ULiège, Master de spécialisation en gestion des ressources aquatiques et aquaculture (2021-2022).

- Encadrement TFE : Développement d'une ferme aquaponique commerciale dans la localité de Marchin (Tristan Dawance). Haute Ecole Province de Namur, Bachelier Développement durable, 2021-2022)
- Encadrement d'un stage « Recherche et Innovation » (06-08/2021) : Caractérisation qualitative et quantitative des effluents issus du système de production aquaponique et recherche de voies de valorisation en culture hydroponique. (Autier-Miconi E.). Ecole Supérieure d'Agricultures d'Angers, ingénieur agronome.
- Encadrement TFE : Valorisation des effluents organiques d'aquaponie dans un système de production par Biofloc (Sow O.). ULiège, Master de spécialisation en gestion des ressources aquatiques et aquaculture (2020-2021).
- Encadrement mémoire de fin d'études (2020) : Etude de faisabilité économique d'un modèle de production aquaponique en Région Wallonne (Leroy J.). Ecole Supérieure d'Agricultures d'Angers, MSc. in Agriculture, Food technology and environmental Sciences.
- Encadrement travail de synthèse (2019) : Analyse théorique et pratique de l'aquaponie (Dawance T., Hubrechts D., Peters S.). Haute Ecole de la Province de Namur, Bachelier Conseiller en Développement Durable.
- Encadrement stage recherche et innovation (2019) : Analyse fonctionnelle d'un système aquaponique : Productivité, bilan de masse, consommation énergétique et hydrique (Leroy J.). Ecole Supérieure d'Agricultures d'Angers, MSc. in Agriculture, Food technology and environmental Sciences.
- Encadrement TFE (2019) : Analyse fonctionnelle d'un système aquaponique : évaluation environnementale et économique en lien avec la productivité du système (Takedo Tchuidjo S.M.). ULiège, Master de spécialisation en gestion des ressources aquatiques et aquaculture.
- Encadrement TFE (2019) : Comparaison des performances de croissance et du bien-être des sandres (*Sander lucioperca*) élevés en système aquaponique couplé et système recirculé classique (Coulibaly B.). ULiège, Master de spécialisation en gestion des ressources aquatiques et aquaculture.
- Encadrement TFE (2018) : Optimisation du système de filtration mécanique d'un circuit pilote de production aquaponique : évaluation de l'efficacité technique et énergétique d'un tambour filtrant et d'un hydrocyclone (Chery H.J.). ULiège, Master de spécialisation en gestion des ressources aquatiques et aquaculture.
- Encadrement stage de recherche et formation en aquaponie (2019) : Dr Saïdou Santi, enseignant-chercheur au sein de l'Unité de Recherche en Aquaculture et Biodiversité Aquatique (UR ABAQ) de l'Université Nazi BONI (Bobo Dioulasso, Burkina Faso).
- Encadrement stage formation technique en aquaponie (2020) : Mamadou Somé, technicien au sein de l'Unité de Recherche en Aquaculture et Biodiversité Aquatique (UR ABAQ) de l'Université Nazi BONI (Bobo Dioulasso, Burkina Faso) pour le projet AQUAPRO : Développement d'un système pilote

de production intégrée durable de poissons et de végétaux à destination des femmes et des jeunes au Burkina Faso (WBI).

- Encadrement stage formation technique en aquaponie Choukri Sabit (2021) dans le cadre d'une formation en aquaponie Echologia Aquaponia – Développement d'une ferme aquaponique au Tchad.

Autres projets en aquaponie du CERER-pisciculture

- *AQUAPRO : Développement d'un système pilote de production intégrée durable de poissons et de végétaux à destination des femmes et des jeunes au Burkina Faso (2021-2023) ; fonds : WBI, partenaires : ULiège, Université Nazi Boni – Bobo-Dioulasso.*
- *Perciponie : Développement de la periculture en aquaponie (2020-2022) ; fonds : Interreg GR – SPW, partenaires : ULiège, ULorraine, HTW Saar.*

IX. BIBLIOGRAPHIE

- Anseeuw, D. (2018). N an P partitioning in fish (waste). EU Aquaponics Hub Fact sheet. http://euaquaponicshub.com/hub/wp-content/uploads/2016/05/FactSheet_NutrientFlow.pdf
- Ayipio, E., Wells, D. E., McQuilling, A., & Wilson, A. E. (2019). Comparisons between aquaponic and conventional hydroponic crop yields: A meta-analysis. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 22). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/su11226511>
- Baekelandt, S., Mandiki, S. N. M., Schmitz, M., & Kestemont, P. (2019). Influence of the light spectrum on the daily rhythms of stress and humoral innate immune markers in pikeperch Sander *luciperca*. *Aquaculture*, *499*, 358–363. <https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2018.09.046>
- Baekelandt, S., Redivo, B., Mandiki, S. N. M., Bournonville, T., Houndji, A., Bernard, B., El Kertaoui, N., Schmitz, M., Fontaine, P., Gardeur, J.-N., Ledoré, Y., & Kestemont, P. (2018). Multifactorial analyses revealed optimal aquaculture modalities improving husbandry fitness without clear effect on stress and immune status of pikeperch Sander *luciperca*. *General and Comparative Endocrinology*, *258*, 194–204. <https://doi.org/10.1016/J.YGCEN.2017.08.010>
- Barbosa, G. L., Almeida Gadelha, F. D., Kublik, N., Proctor, A., Reichelm, L., Weissinger, E., Wohlleb, G. M., & Halden, R. U. (2015). Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. Conventional agricultural methods. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *12*(6), 6879–6891. <https://doi.org/10.3390/IJERPH120606879>
- Boulay, A. M., Bulle, C., Bayart, J. B., Deschênes, L., & Margni, M. (2011). Regional characterization of freshwater use in LCA: Modeling direct impacts on human health. *Environmental Science and Technology*, *45*(20), 8948–8957. <https://doi.org/10.1021/ES1030883>
- Cerozi, B. S., & Fitzsimmons, K. (2017). Phosphorus dynamics modeling and mass balance in an aquaponics system. *Agricultural Systems*, *153*, 94–100. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.020>
- Dalsgaard, J., Lund, I., Thorarinsdottir, R., Drengstig, A., Arvonen, K., & Pedersen, P. B. (2013). Farming different species in RAS in Nordic countries: Current status and future perspectives. *Aquacultural Engineering*, *53*, 2–13. <https://doi.org/10.1016/J.AQUAENG.2012.11.008>
- Endut, A., Jusoh, A., & Ali, N. (2014). Nitrogen budget and effluent nitrogen components in aquaponics recirculation system. *Desalination and Water Treatment*, *52*(4–6). <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.826336>
- Espinal, C. A., & Matuli Ć, D. (2019). Recirculating Aquaculture Technologies. *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*, 35–76. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_3
- EUMOFA (2021). Le marché européen du poisson, édition 2021. European Market Observatory for Fisheries and Aquaculture Products, 116 pp. <https://www.eumofa.eu/market-analysis>.
- FAO (2020). Aquaculture production statistics, FishStatJ.
- Forchino, A.A., Lourguioui, H., Brigolin, D., & Pastres, R. (2017). Aquaponics and sustainability: The comparison of two different aquaponic techniques using the Life Cycle Assessment (LCA). *Aquacultural Engineering*, *77*, 80–88. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.03.002>

- Forchino, A.A., Gennotte, V., Maiolo, S., Brigolin, D., Mélard, C., & Pastres, R. (2018). Eco-designing Aquaponics: A Case Study of an Experimental Production System in Belgium. *Procedia CIRP*, 69, 546–550. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2017.11.064>
- Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K., Jijakli, H., & Thorarinsdottir, R. (2015). Challenges of Sustainable and Commercial Aquaponics. *Sustainability*, 7(4), 4199–4224. <https://doi.org/10.3390/su7044199>
- Goddek, S., Joyce, A., Wuertz, S., Körner, O., Bläser, I., Reuter, M., & Keesman, K. J. (2019). Decoupled Aquaponics Systems. *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*, 201–230. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_8/FIGURES/13
- Goddek, S., Schmautz, Z., Scott, B., Delaide, B., Keesman, K., Wuertz, S., & Junge, R. (2016). The Effect of Anaerobic and Aerobic Fish Sludge Supernatant on Hydroponic Lettuce. *Agronomy*, 6(2), 37. <https://doi.org/10.3390/agronomy6020037>
- Izydorczyk, G., Saeid, A., Mironiuk, M., Witek-Krowiak, A., Koziół, K., Grzesik, R., & Chojnacka, K. (2022). Sustainable method of phosphorus biowaste management to innovative biofertilizers: A solution for circular economy of the future. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 27. <https://doi.org/10.1016/J.SCP.2022.100634>
- Jaeger, C., Foucard, P., Tocqueville, A., Nahon, S., & Aubin, J. (2019). Mass balanced based LCA of a common carp-lettuce aquaponics system. *Aquacultural Engineering*, 84, 29–41. <https://doi.org/10.1016/J.AQUAENG.2018.11.003>
- John, V. C., Verma, A. K., Krishnani, K. K., Chandrakant, M. H., Bharti, V. S., & Varghese, T. (2022). Optimization of potassium (K⁺) supplementation for growth enhancement of *Spinacia oleracea* L. and *Pangasianodon hypophthalmus* (Sauvage, 1878) in an aquaponic system. *Agricultural Water Management*, 261. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2021.107339>
- Jones J.B. (2004). *Hydroponics: a practical guide for the soilless grower*. CRC Press, Boca Raton, 440 pp.
- Joyce, A., Goddek, S., Kotzen, B., & Wuertz, S. (2019). Aquaponics: Closing the Cycle on Limited Water, Land and Nutrient Resources. *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*, 19–34. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_2
- Joyce, A., Timmons, M., Goddek, S., & Pentz, T. (2019). Bacterial Relationships in Aquaponics: New Research Directions. *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*, 145–162. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_6/COVER
- König, B., Janker, J., Reinhardt, T., Villarroel, M., & Junge, R. (2018). Analysis of aquaponics as an emerging technological innovation system. *Journal of Cleaner Production*, 180, 232–243. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.037>
- Konig, B., Junge, R., Bittsanszky, A., Villarroel, M., & Komives, T. (2016). On the sustainability of aquaponics. *Ecocycles*, 2(1), 26–32. <https://doi.org/10.19040/ecocycles.v2i1.50>
- Lennard, W., & Ward, J. (2019). A comparison of plant growth rates between an NFT hydroponic system and an NFT aquaponic system. *J*, 5(2). <https://doi.org/10.3390/horticulturae5020027>
- Lennard, Wilson, & Goddek, S. (2019). Aquaponics: The Basics. *Aquaponics Food Production Systems*, 113–143. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_5

- Li, T., Raza, S. H. A., Yang, B., Sun, Y., Wang, G., Sun, W., Qian, A., Wang, C., Kang, Y., & Shan, X. (2020). *Aeromonas veronii* Infection in Commercial Freshwater Fish: A Potential Threat to Public Health. *Animals : An Open Access Journal from MDPI*, *10*(4). <https://doi.org/10.3390/ANI10040608>
- Love, D. C., Fry, J. P., Genello, L., Hill, E. S., Frederick, J. A., Li, X., & Semmens, K. (2014). An International Survey of Aquaponics Practitioners. *PLoS ONE*, *9*(7), e102662. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102662>
- Luchiari, A. C., De Morais Freire, F. A., Koskela, J., & Pirhonen, J. (2006). Light intensity preference of juvenile pikeperch Sander lucioperca (L.). *Aquaculture Research*, *37*(15), 1572–1577. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2109.2006.01599.X>
- Luchiari, A. C., De Morais Freire, F. A., Pirhonen, J., & Koskela, J. (2009). Longer wavelengths of light improve the growth, intake and feed efficiency of individually reared juvenile pikeperch Sander lucioperca (L.). *Aquaculture Research*, *40*(8), 880–886. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2109.2008.02160.X>
- Lunda, R., Roy, K., Másilko, J., & Mráz, J. (2019). Understanding nutrient throughput of operational RAS farm effluents to support semi-commercial aquaponics: Easy upgrade possible beyond controversies. *Journal of Environmental Management*, *245*, 255–263. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2019.05.130>
- Maucieri, C., Nicoletto, C., Junge, R., Schmautz, Z., Sambo, P., & Borin, M. (2018). Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review. *Italian Journal of Agronomy*, *13*(1), 1–11. <https://doi.org/10.4081/IJA.2017.1012>
- Maucieri, C., Nicoletto, C., van Os, E., Anseeuw, D., Van Havermaet, R., & Junge, R. (2019). Hydroponic Technologies. *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*, 77–110. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_4
- Monsees, H., Kloas, W., & Wuertz, S. (2017). Decoupled systems on trial: Eliminating bottlenecks to improve aquaponic processes. *PLOS ONE*, *12*(9), e0183056. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183056>
- Palm, H. W., Knaus, U., Appelbaum, S., Strauch, S. M., & Kotzen, B. (2019). Coupled Aquaponics Systems. *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*, 163–200. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_7
- Pattillo, D. A., Hager, J. V., Cline, D. J., Roy, L. A., & Hanson, T. R. (2022). System design and production practices of aquaponic stakeholders. *PloS One*, *17*(4), e0266475. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0266475>
- Preena, P. G., Rejish Kumar, V. J., & Singh, I. S. B. (2021). Nitrification and denitrification in recirculating aquaculture systems: the processes and players. *Reviews in Aquaculture*, *13*(4), 2053–2075. <https://doi.org/10.1111/RAQ.12558>
- PRè (2014). SimaPro 8 Software. <http://www.pre.nl>
- Rakocy, J. E., Masser, M. P., & Losordo, T. M. (2006). Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: Aquaponics—Integrating Fish and Plant Culture. *SRAC Fact Sheets, SRAC Publi*, 1–16.
- Rana, K. S., Jahan, M., Ferdous, Z., & Salam, M. (2018). Production performance of lettuce (*Lactuca sativa*): aquaponics versus traditional soil. *Asian Journal of Medical and Biological Research*, *4*(2), 149–156. <https://doi.org/10.3329/ajmbr.v4i2.38249>

- Resh H.M. (2013). Hydroponic food production, a definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower, seventh edition. CRC Press, Boca Raton, 524 pp.
- Schneider, O., Sereti, V., Eding, E. H., & Verreth, J. A. J. (2005). Analysis of nutrient flows in integrated intensive aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 32(3–4), 379–401. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2004.09.001>
- Senff, P., Baßmann, B., Kaiser, F., Harbach, H., Robin, C., & Fontaine, P. (2022). Root-released organic compounds in aquaponics and their potential effects on system performance. *Reviews in Aquaculture*, 1–7. <https://doi.org/10.1111/RAQ.12778>
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., & Lovatelli, A. (2014). *Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming* (No. 589; FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper).
- SPW-DGARNE (2021). Plan stratégique de l'aquaculture en Wallonie 2021-2030, 39 pp. <https://agriculture.wallonie.be/files/20182/170503/202109%20-%20StratAquacWall-V1-approuvéGW.pdf>
- Steinberg, K., Zimmermann, J., Meyer, S., & Schulz, C. (2018a). Start-up of recirculating aquaculture systems: How do water exchange rates influence pikeperch (*Sander lucioperca*) and water composition? *Aquacultural Engineering*, 83, 151–159. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2018.10.006>
- Steinberg, K., Zimmermann, J., Stiller, K. T., Nwanna, L., Meyer, S., & Schulz, C. (2018b). Elevated nitrate levels affect the energy metabolism of pikeperch (*Sander lucioperca*) in RAS. *Aquaculture*, 497, 405–413. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.08.017>
- Strauch, S. M., Wenzel, L. C., Bischoff, A., Dellwig, O., Klein, J., Schüch, A., Wasenitz, B., & Palm, H. W. (2018). Commercial African Catfish (*Clarias gariepinus*) recirculating aquaculture systems: Assessment of element and energy pathways with special focus on the phosphorus cycle. *Sustainability (Switzerland)*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/SU10061805>
- Timmons M.B., Ebeling J.M., Wheaton F.W., Summerfelt S.T., Vinci B.J. (2002). Recirculating aquaculture systems 2nd Edition. NRAC Publication No. 01-002, 769 pp.
- Turnsek, M., Joly, A., Thorarinsdottir, R., & Junge, R. (2020). Challenges of Commercial Aquaponics in Europe: Beyond the Hype. *Water*, 12(1), 306. <https://doi.org/10.3390/w12010306>
- Yang, T., & Kim, H. J. (2020). Comparisons of nitrogen and phosphorus mass balance for tomato-, basil-, and lettuce-based aquaponic and hydroponic systems. *Journal of Cleaner Production*, 274. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.122619>

X. ANNEXES

Indicateurs d'avancement du projet – phase 1 (2017-2020)

<i>Intitulé de l'indicateur</i>	<i>Unité de mesure</i>	<i>Objectif</i>	<i>Réalisé</i>
Mise en place du circuit	mois	6	12
Taux de production piscicole (tilapia)	kg/m ³ /an	150	139
Taux de production maraîchère (modèle tilapia)	kg/m ² /an	100	40
Distribution de la production en circuit court (modèle tilapia)	t/an	7	0,9
Taux de production piscicole (sandre)	kg/m ³ /an	62	33
Taux de production maraîchère (modèle sandre)	kg/m ² /an	40	40
Distribution de la production en circuit court (modèle sandre)	t/an	4	1,6
Validation du choix des circuits de distribution	nombre de circuits	2	2
Optimisation du système: réduction de la consommation d'eau	m ³ /m ³ d'élevage-culture/an	40	26
Optimisation du système: réduction de la consommation énergétique	kWh/m ³ d'élevage-culture/an	200	550
Bilan coût de production	Nombre	1	1
Rédaction d'un rapport technique et pratique	Nombre	1	1

Indicateurs d'avancement du projet – phase 2 (2020-2022)

<i>Intitulé de l'indicateur</i>	<i>Unité de mesure</i>	<i>Objectif</i>	<i>Réalisé</i>
Construction et aménagement du local d'abattage	réalisation	1	1
Valorisation des effluents : construction d'une nouvelle surface de culture	réalisation	1	1
Valorisation des effluents : réduction des rejets d'effluents dans l'environnement	%	100	12
Valorisation des effluents : augmentation de la production horticole	%	25	17
Taux de production piscicole (sandre)	kg/m ³ /an	52	33
Taux de production maraîchère	kg/m ² /an	40	40
Bilan économique pilote de production	réalisation	2	2
Etude de marché – produits aquaponiques	réalisation	2	2
Dimensionnement et plan d'affaires	réalisation	2	2
Rapport final	réalisation	1	1

Indicateurs obligatoires liés à la mesure

<i>Intitulé de l'indicateur</i>	<i>Unité de mesure</i>	<i>Réalisé</i>	<i>Objectif 2018</i>	<i>Objectif 2023</i>
Nombre d'emplois maintenus	Nbr	0,00	0,00	0,00
Modification de la valeur de la production aquacole	Euros/an	3270,00	0,00	80.000,00
Modification du volume de la production aquacole	Tonnes/an	0,9	0,00	10,00
Modification du volume de la production aquacole avec un système de recirculation	Tonnes/an	0,9	0,00	10,00
Modification du profit net	Euros/an	0,00	0,00	8.000,00
Modification du nombre d'entreprises aquacoles fournissant des services environnementaux (seulement pertinent pour M54)	Nbr	0,00	0,00	0,00
Modification du volume de la production aquacole reconnue Bio	Tonnes/an	0,00	0,00	0,00
Nombre d'emplois créés	Nbr	0,00	0,00	2,00
Modification du volume de la production aquacole certifiée via des filières libres	Tonnes/an	0,00	0,00	0,00