



**HAL**  
open science

## Bilan environnemental d'un système d'aquaponie carpes-salades.

Christophe Jaeger, Pierre Foucard, Aurélien Tocqueville, Sarah Nahon, Joël  
Aubin

► **To cite this version:**

Christophe Jaeger, Pierre Foucard, Aurélien Tocqueville, Sarah Nahon, Joël Aubin. Bilan environnemental d'un système d'aquaponie carpes-salades.. Innovations Agronomiques, 2020, 80, pp.87-97. 10.15454/4tqn-nx47 . hal-03321454

**HAL Id: hal-03321454**

**<https://hal.inrae.fr/hal-03321454v1>**

Submitted on 17 Aug 2021

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

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



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

## Bilan environnemental d'un système d'aquaponie carpes-salades

Jaeger C.<sup>1</sup>, Foucard P.<sup>2</sup>, Tocqueville A.<sup>2</sup>, Nahon S.<sup>3</sup>, Aubin J.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> UMR SAS, INRAE, AGROCAMPUS OUEST, F-35000 Rennes

<sup>2</sup> ITAVI, Service aquaculture, 28 Rampe Bouvreuil, F-76000 Rouen

<sup>3</sup> INRAE UMR1419 NuMÉA, AquaPôle, F-64310 Saint Pée-sur-Nivelle

**Correspondance** : christophe.jaeger@inrae.fr

### Résumé

Un système aquaponique (SA) est un système intégré qui combine un système d'élevage aquacole en eau recirculée et un système de culture hydroponique (SH). Il est conçu pour que les plantes captent les nutriments rejetés par les poissons pour former ainsi un système plus respectueux de l'environnement, que si les deux systèmes fonctionnaient séparément. De nombreux SA sont en cours de développement, mais peu d'informations sont disponibles quant à leurs performances globales. L'objectif de cette étude est d'analyser l'efficacité d'utilisation des nutriments et les impacts environnementaux d'un SA carpes-salades fonctionnant sous serre. Un bilan de masse de l'azote (N) et du phosphore (P) a été établi et une Analyse de Cycle de Vie (ACV) a été conduite, en comparaison avec un système hydroponique de salade (SHI). L'étude s'est déroulée sur un cycle de 52 jours, correspondant au temps nécessaire pour récolter une salade commercialisable. Les bilans de masse étaient cohérents avec la littérature, avec 24,6% de N non comptabilisés, (vraisemblablement dus à l'émission de N<sub>2</sub>), et 6,6% de P non comptabilisés, (vraisemblablement dus à une sous-estimation de la quantité de sédiments). Le taux de fixation du N apporté, dans la salade et le poisson, est de 19,3% et le taux de fixation du P apporté est de 20,6%. L'ACV a montré clairement deux origines aux impacts environnementaux : les ingrédients de l'alimentation des poissons et l'utilisation d'énergie. Le gain d'un kg de croît de salade dans le SA a eu clairement moins d'impacts environnementaux que dans le SHI, sur le changement climatique, l'acidification, l'eutrophisation, la compétition sur l'utilisation des terres et la demande totale en énergie. Néanmoins, une diminution de l'utilisation de l'eau n'a pas été observée. L'indicateur portant sur l'utilisation de la production primaire nette a mis en évidence la dépendance du SA aux ressources naturelles, et plus spécifiquement aux farines et huiles de poissons, via l'alimentation des carpes. Comparée à l'utilisation d'engrais chimiques pour la production de salade dans le SHI, l'utilisation de nutriments issus indirectement de l'aliment poissons dans le SA, diminuerait l'impact sur le changement climatique mais augmenterait l'utilisation de ressources naturelles.

**Mots-clés** : Azote, Phosphore, Hydroponie, Aquaculture en eau recirculée, Bilan de masse, Analyse du cycle de vie (ACV)

### Abstract : Environmental statement of a carp-lettuce aquaponics system

The combination of an hydroponic system (HS) with a recirculating aquaculture system is an integrated system called aquaponics (AS). Thus, plants recover nutrients released by fish, representing a system more environmentally friendly than if the two systems would run independently. Several AS are under development but poor information about their environmental performances is available. The aim of this study was to assess the efficiency of the use of the nutrients and the environmental impacts of a carp-lettuce AS set in a greenhouse. A mass balance of the nitrogen (N) and the phosphorus (P), and a life

cycle assessment (LCA) were carried out, in comparison with a lettuce hydroponics system. The study lasted 52 days, corresponding to the time needed to obtain a marketable lettuce. With 24.6% N unaccounted for (probably due to denitrification) and 6.6% P unaccounted for (probably due to underestimation of the quantities of sediment), the mass balances calculated were in accordance with literature. The rates of N and P from feed recovered in fish and lettuce biomass were 19.3% and 20.6% respectively. The LCA pointed out that environmental impacts originate mainly in ingredients of fish feed and energy use. The gain of 1 kg of lettuce biomass in the AS had less environmental impacts than in the HS, on climate change, acidification potential, eutrophication potential, land use and cumulative energy demand. Nevertheless, a decrease in the water dependence indicator was not observed. The indicator dealing with the net primary production use pointed out the dependence of SA to natural resources, and more specifically to fish meal and fish oil, used in the fish feed. Compared to the use of chemical fertilizer in HS, the use of nutrients originating indirectly from fish feed in AS, seems decreasing impacts on climate change but increasing the use of natural resources in lettuce production.

**Keywords** : Nitrogen, Phosphorus, Hydroponics, Recirculating aquaculture system, Mass balance, Life cycle assessment (LCA)

## Introduction

Les déjections animales sont depuis longtemps utilisées comme fertilisants en agriculture et sont une source durable de nutriments (azote (N) et phosphore (P)) pour les cultures. De la même façon, l'aquaponie est un système aquacole intégré dans lequel la pisciculture et une culture hors-sol sont combinées pour recycler les nutriments. Les Systèmes Aquaponiques (SA), dans lesquels des plantes consommables captent des nutriments dissous issus des rejets d'un élevage de poisson, sont considérés comme durables (Graber and Junge 2009). Le SA est majoritairement constitué d'un Système Aquacole en eau Recirculée (SAR) couplé à un Système Hydroponique (SH) de culture de plantes, diminuant ainsi la consommation d'eau (Klinger et Naylor, 2012 ; Love et al., 2014 ; Goddek et al., 2015).

Dans une étude antérieure, Love et al. (2015) ont évalué l'utilisation d'énergie et d'eau sur des unités SA de petite échelle mais n'ont pas fait de lien avec les rejets de nutriments dans l'environnement. Plusieurs études, ont utilisé un bilan de masse pour déterminer le devenir de l'azote (N) (Endut et al., 2014 ; Delaide et al., 2017 ; Fang et al., 2017 ; Wongkiew et al., 2017 ; Zou et al., 2017), et plus rarement celui du phosphore (P) (Cerozi et Fitzsimmons, 2017 ; Delaide et al., 2017) dans des SA. Le bilan de masse renseigne sur la répartition des nutriments dans les différents compartiments du SA (poissons, cultures, eau, boues, gaz émis) (Cho et Kaushik 1990), mais nécessite des analyses précises de leurs concentrations. La part de nutriments non comptabilisés (non retrouvés) est variable selon les études. Elle représente 20%-50% du N entrant dans le système (Delaide et al., 2017 ; Fang et al., 2017 ; Wongkiew et al., 2017 ; Zou et al., 2017), et 8%-80% du P entrant (Cerozi et Fitzsimmons, 2017 ; Delaide et al., 2017). Du fait de la diversité des systèmes (avec ou sans extraction des boues, ratio aliment distribué/surface de cultures, types de cultures et espèces de poisson, taux de renouvellement en eau, etc.) la répartition des nutriments entre plantes, poissons et les autres compartiments du SA est difficilement comparable entre études. L'indicateur d'Efficacité d'Utilisation de l'azote (EUN) est souvent utilisé (Hu et al., 2015 ; Fang et al., 2017 ; Zou et al., 2017). En SA, l'EUN correspond au pourcentage de N total entrant, principalement apporté par l'aliment des poissons, valorisé en biomasse (de poisson et de plante). Ainsi, selon le système étudié, l'EUN était compris entre 34%-50% (Hu et al., 2015 ; Fang et al., 2017 ; Zou et al., 2017). Néanmoins, l'EUN est seulement un indicateur grossier de la capacité du système à améliorer la qualité de l'eau en produisant de la biomasse mais ne donne pas d'indication sur les autres impacts environnementaux.

L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est une méthode qui estime le bilan environnemental d'un produit (ou d'un service) selon plusieurs indicateurs d'impacts, tout au long de son cycle de vie (Guinee et al., 2002). Seules quelques études ont été réalisées sur des SA (Xie et Rosentrater, 2015 ; Hollmann et al., 2016 ; Boxman et al., 2017 ; Forchino et al., 2017). Ces ACV ont mis en évidence que l'énergie et l'aliment des poissons contribuent le plus aux impacts environnementaux en SA, quelle que soit l'approche utilisée pour répartir les impacts entre les co-produits (poissons et végétaux).

A notre connaissance, aucune étude n'a déjà combiné bilans de masse et ACV. L'étude présentée a été réalisée dans le cadre du projet APIVA (AquaPonie Innovation Végétale et Aquaculture<sup>1</sup>) avec plusieurs objectifs dont celui de modéliser le fonctionnement d'un SA pour déterminer ses capacités de production et d'évaluer ses capacités épuratoires des eaux usées de pisciculture (Foucard et al., 2019).

Notre étude a pour objectif d'évaluer, les avantages environnementaux relatifs d'un SA de taille commerciale, produisant de la salade avec des carpes, comparé à la même production de salade en Système Hydroponique Indépendant (SHI), en s'appuyant sur les bilans de masse du N total (TN) et du P total (TP) et l'ACV.

## 1. Matériel et méthodes

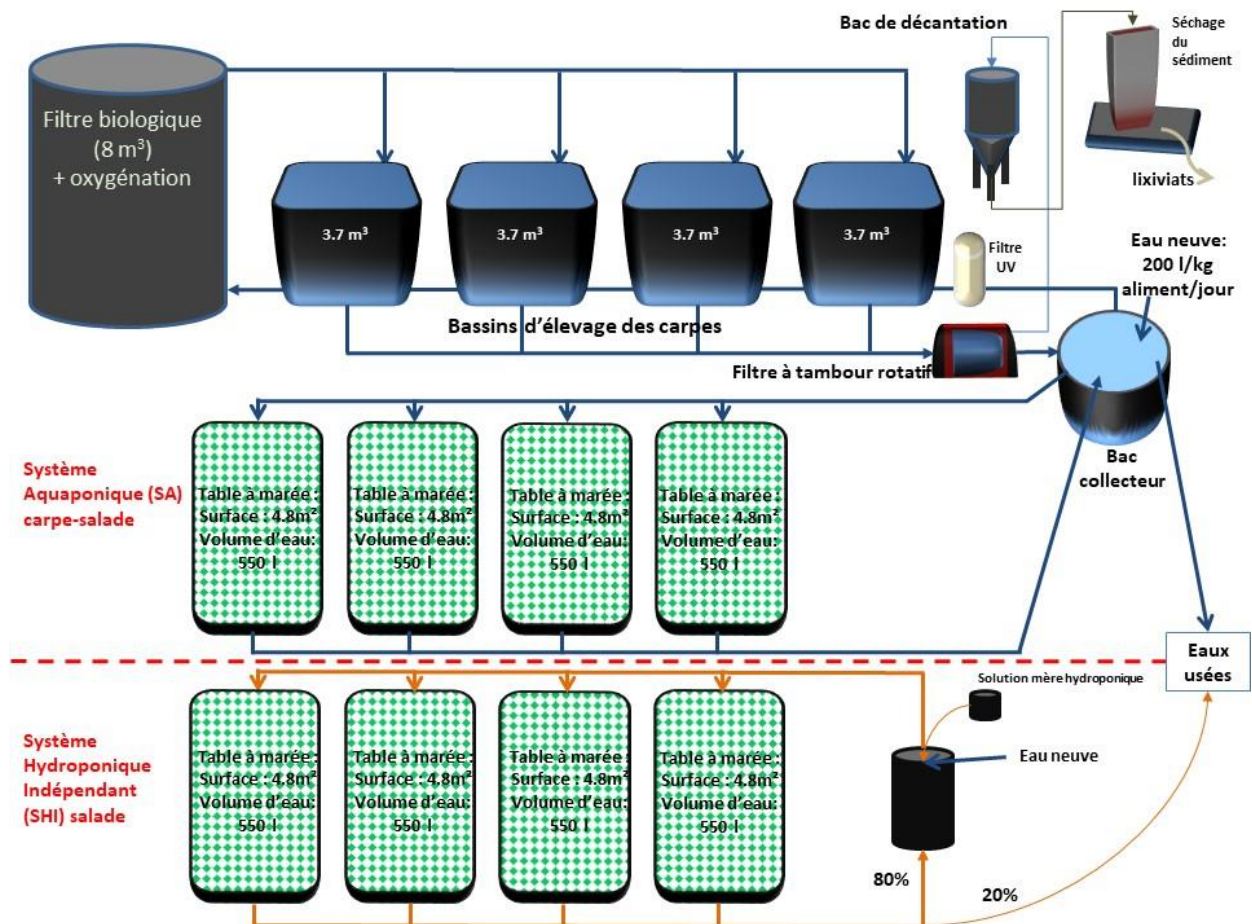
L'étude s'est déroulée pendant 52 jours, entre le 26 janvier (J1) et le 18 mars 2016 (J52), sous une serre unique dans la station expérimentale du RATHO (Rhône-Alpes Techniques Horticoles, Brindas, France). La serre (225 m<sup>2</sup>) hébergeait deux systèmes (Figure 1): (1) le SA (60 m<sup>2</sup>) et (2) un SHI (20 m<sup>2</sup>) comme témoin, identique à la partie hydroponique du SA. Les couloirs couvraient la superficie restante.

### 1.1 Le système aquaponique

Le SA était constitué d'un SAR pour élever les poissons, connecté au SH pour la culture de plantes. Un filtre rotatif à tambour d'une maille de 60 µm était installé pour traiter l'eau issue des quatre bassins d'élevage des poissons (3,7 m<sup>3</sup> chacun). Les particules solides ainsi extraites par le filtre étaient envoyées vers un bac de décantation puis exportée après floculation. L'eau ainsi filtrée était mélangée à de l'eau neuve dans un bac collecteur, à raison de 200 l par kg d'aliment distribué et par jour (taux de renouvellement moyen de 6%). De ce bac collecteur, l'eau était distribuée soit vers le SH, soit vers le SAR ou soit vers le trop plein. Dans le SAR, l'eau était pompée pour être traitée par une lampe UV (désinfection), puis dans un filtre biologique à lit fluidisé (dénitrification) avant de retourner vers les bassins d'élevage. Dans le SAR, l'eau circulait en continu avec un débit de 45m<sup>3</sup>/h. Du bicarbonate de potassium était ajouté (en moyenne, 219 g/jour) pour maintenir le pH entre 6,5 et 7,2 et contribuer à la croissance des plantes. Dans le SH, l'eau passait à travers quatre tables à marée d'une superficie de 4,8 m<sup>2</sup> pour un volume de 550 l chacune et sur lesquelles flottaient des radeaux en polystyrène, support des salades (16 plants par m<sup>2</sup>). L'eau aérée par bullage, circulait en continue sous les radeaux à raison de 1 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> par table à marée, avant d'être renvoyée au bac collecteur.

La carpe commune (*Cyprinus carpio*) a été choisie pour sa rusticité et parce que c'est l'une des espèces aquacoles majeures dans cette région. Au début de l'étude, 1001 poissons (poids moyen : 647 ± 140,9 g) ont été répartis de manière aléatoire et équilibrée dans les bassins d'élevage. Une ration moyenne de 1,1 kg d'aliment pour 100 kg de poisson (Le Gouessant<sup>®</sup>, 32% protéines, 9% matières grasses et 1% P) a été distribuée durant l'étude. La salade (laitue feuille de chêne, *Lactuca sativa*) a été choisie pour sa capacité à pousser en hydroponie et en photopériode hivernale. Les plants de salade sont tous issus du même fournisseur et ont été mis en culture, en début d'étude, au stade quatre feuilles. La température sous serre a été suivie en continue.

<sup>1</sup> <https://projetapiva.wordpress.com>



**Figure 1** : Schéma du Système Aquaponique (SA, représenté au-dessus de la ligne en pointillés) et du Système Hydroponique Indépendant (SHI).

## 1.2 Le système hydroponique indépendant

Le SHI représente le témoin du SH dans le SA. Les nutriments ont été apportés sous forme d'une solution nutritive standard adaptée aux besoins des plantes selon leur stade de croissance. La solution nutritive circulait sous les rafts et de l'air y était injecté par bullage au niveau de chaque table à marée. Cette solution était préparée et renouvelée hebdomadairement par un automate qui prenait en compte la composition et la conductivité de la solution. A chaque renouvellement, 20% de l'ancienne solution était éliminée puis remplacée jusqu'à atteindre les valeurs souhaitées, en volume (550 l par table à marée), en conductivité ( $1500 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) et en concentration en TN ( $120 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ) et TP ( $25 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ).

## 1.3 Mesures et enregistrements

### 1.3.1 Poissons et aliment

La quantité et la composition en TN et TP de l'aliment ont été mesurées.

La teneur en TN des poissons a été évaluée en fin d'étude, à partir de l'analyse du muscle dorsal de 10 individus pêchés au hasard. La teneur en TP a été extraite de données disponibles pour la carpe à partir de l'article de Schreckenbach et al. (2001). Les teneurs en TN et TP de la carpe sont supposées identiques en début et en fin d'étude. Chaque poisson a été pesé en début et en fin d'étude. Aucune mortalité n'a été observée.

L'Indice de Consommation (IC) a été calculé selon la formule suivante :

$$IC (kg \text{ kg}^{-1}) = \frac{\text{aliment distribué (kg MS)}}{\text{gain de croit de poisson (kg)}}$$

### **1.3.2 Salade**

Au début et à la fin de l'étude, les teneurs en TN et TP ont été mesurées selon les mêmes méthodes que pour l'aliment, incluant trois échantillons de terreau utilisé pour les plants et dix échantillons de plants de salade (racines + feuilles), pris au hasard. Les feuilles mortes ainsi que toute la biomasse de culture ont été collectées et pesées durant toute l'étude.

### **1.3.3 Eau**

Un compteur d'eau a mesuré le volume total d'eau neuve entré dans le système. Le volume en eaux usées a été considéré comme équivalent à celui de l'eau neuve entrée. Pour établir le bilan de masse et déterminer les quantités de TN et TP dans les systèmes, un échantillon d'eau a été collecté, en début et fin d'étude, à partir du bac collecteur du SA et de l'évacuation en eaux usées du SHI. Les teneurs en TN et TP ont été mesurées pour chaque échantillon par spectrophotométrie. Les teneurs en TN et TP dans l'eau sortante du SA ont été considérées comme constantes durant l'étude et égales à celles issues des analyses réalisées dans le bac collecteur en fin d'étude. L'eau neuve a été échantillonnée une fois pour mesurer les teneurs en TN et TP, et ont été considérées constantes tout au long de l'étude.

### **1.3.4 Sédiments**

Les sédiments extraits par le filtre rotatif ont été collectés et leur teneur en TN et TP analysées. A la fin de l'étude, la quantité de boues ayant décanté au fond des tables à marée a été estimée, en les remettant en suspension et en mesurant la matière en suspension présente dans l'eau. Les teneurs en TN et TP ont été considérées comme égales à celles du sédiment issu de la filtration.

## *1.4 Bilan de masse*

A partir des résultats issus des analyses décrites précédemment, le bilan de masse, pour le SA, a été calculé pour chaque nutriment (N ou P) en rapportant sa quantité (g) dans chaque compartiment, suivant la formule ci-dessous :

$$\text{Bilan de masse} = (Al + S1 + P1 + E1 + En) - (P52 + S52 + E52 + Eu + Sé + Lix)$$

Avec :

- Al* pour l'aliment distribué,
- S1* et *S52* pour les plants + terreau respectivement à J1 et à J52, incluant les feuilles mortes et autre biomasse de culture,
- P1* et *P52* pour la biomasse de poisson respectivement au début et à la fin de l'étude,
- E1* et *E52* pour l'eau du circuit respectivement au début et à la fin de l'étude,
- En* et *Eu* pour respectivement l'eau neuve et les eaux usées,
- Sé* pour le sédiment à la fin de l'étude,
- Lix* pour les lixiviats à la fin de l'étude.

## *1.5 Analyse de Cycle de Vie*

L'ACV est une méthode normée (ISO 14040 et 14044) utilisée pour estimer les impacts environnementaux d'un produit ou d'un service tout au long de ses étapes de cycle de vie, du "berceau à la tombe". L'ACV suit quatre étapes principales : (1) décrire l'objectif et le périmètre de l'étude et du

système, (2) réaliser un Inventaire de Cycle de Vie où sont identifiés et quantifiés les entrants et sortants du système, (3) analyser les impacts environnementaux et (4) interpréter les résultats. Dans cette étude, l'ACV a été réalisée du berceau à la sortie de l'exploitation sur un cycle de 52 jours, correspondant au temps nécessaire de croissance d'une salade de taille commerciale. Les indicateurs d'impact utilisés ont été : l'**acidification** (AC, en kg SO<sub>2</sub> équivalents), calculée selon Huijbregts (1999), renvoie aux effets négatifs des polluants acidifiants sur les sols, la terre et les eaux de surface, et les écosystèmes ; L'**eutrophisation** (EU, en kg PO<sub>4</sub> équivalent), calculée selon Guinee et al. (2002), renvoie aux impacts potentiels des hauts niveaux de nutriments, et plus spécialement N et P, dans l'environnement ; Le **changement climatique** (CC) représente l'impact potentiel des émissions de gaz à effet de serre sur l'absorption des rayonnements thermiques dans l'atmosphère, et a été calculé selon les potentiels de réchauffement climatique à 100 ans (en kg CO<sub>2</sub> équivalents) ; La **compétition sur l'utilisation des terres** (LC, en m<sup>2</sup> an) renvoie à l'utilisation des terres par les Hommes empêchant un retour à l'état naturel durant le temps d'utilisation (Guinee et al., 2002) ; La **demande totale cumulée en énergie** (DCE, en MJ) correspond à la consommation des différentes sources d'énergie utilisées ; L'**utilisation de la production primaire nette** (UPPN, en kg de carbone) renvoie à la quantité de biomasse produite par la photosynthèse nécessaire à la production (Papatriphon et al., 2004) ; et la **dépendance en eau** (DE, m<sup>3</sup>) qui équivaut à la quantité d'eau utilisée par le système (Aubin, Papatriphon et al. 2009).

Etant donné que les carpes et les salades sont produites dans le même système, les ressources utilisées et les émissions doivent être allouées entre les deux co-produits. Comme l'objectif de cette étude était d'analyser l'efficacité d'utilisation des nutriments dans un SA pour produire de la salade, par conséquent nous avons choisi de ne considérer qu'une seule unité fonctionnelle : 1 kg de croit de salade sur 52 jours et d'utiliser une allocation dite par expansion de système (Weidema and Schmidt 2010). L'aliment pour poisson était la seule source de nutriments pour les carpes. Par conséquent, les nutriments non assimilés pour la croissance des poissons ont été considérés comme la seule source pour les plantes, même si une faible proportion venait aussi des nutriments présents dans l'eau circulante initiale et l'eau neuve. Comme P est un élément conservatif, les impacts environnementaux liés à la production de carpe qui ont été alloués à la production de 1 kg de salade ont été calculés selon la proportion suivante (AllocSalade) :

$$AllocSalade = \frac{P_s}{P_s + P_p}$$

Où  $P_s$  est le pourcentage de P de l'aliment poisson retenu par la salade et,  $P_p$  est le pourcentage de P de l'aliment poisson retenu par le poisson (Figure 3).

Pour analyser les avantages relatifs de la production de salade en SA, les impacts environnementaux de la production de salade en SA ont été comparés à ceux d'une production en SHI. Les émissions et impacts ont été calculé avec le logiciel SimaPro<sup>®</sup> v8.3.0.0 (PRé Consultants, Amersfoort, The Netherlands), et les bases de données ecoinvent<sup>®</sup>v3 et EcoAlim AGBv1.3 (Wilfart et al., 2016).

## 2. Résultats et discussion

### 2.1 Productions de carpe et de salade

Au bout de 52 jours de croissance, le gain de poids total en poisson a été de 181 kg. Avec 412 kg d'aliment distribué, l'IC (2,26 kg aliment.kg<sup>-1</sup> gain de poisson) a été légèrement supérieur à ceux obtenus habituellement en production de carpe (Fry et al., 2018), probablement dû à une distribution excessive d'aliment et à une période d'étude courte par rapport au cycle de production de la carpe, avec une température d'eau non optimale (20-30°C (Billard, 1995) contre 15,5±0,9°C durant ce test). La salade a atteint sa taille commercialisable au bout de 52 jours, ce qui est relativement long, mais normal, compte tenu des conditions hivernales (température et intensité lumineuse). Sur ce cycle, un



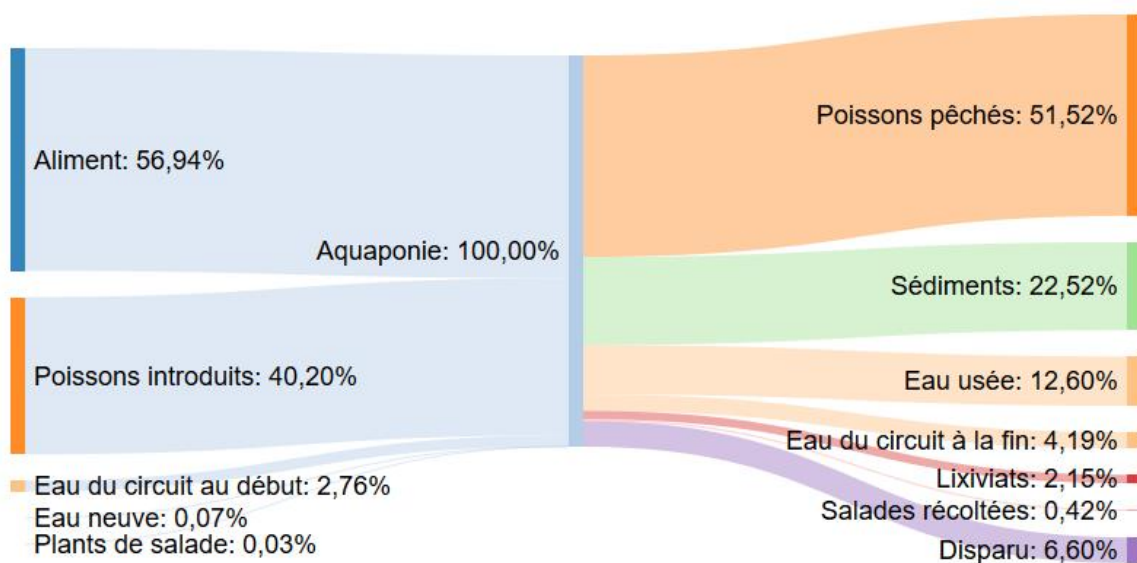
total de 90,74 kg de salade et 6,03 kg de feuilles mortes ont été récoltées en SA, contre 111,73 kg de salade et 6,47 kg de feuilles mortes en SHI. Dès le début de l'étude, il avait été décidé de ne pas apporter de suppléments nutritifs pour les salades dans le SA, même si une déficience en fer causant de la dépigmentation (Rakocy et al., 2006) a été observée.

## 2.2 Bilans de masse

Dans le SA, les intrants de N les plus importants étaient l'aliment et les poissons introduits, représentant 93% du TN entrant. Le poisson pêché et la salade récoltée représentaient 48% du TN entrant. Ainsi, le N retenu pour la croissance de poisson représentait 18,7% du N issu de l'aliment, ce qui est moins que la moyenne de 25% observée par Piedrahita (2003). Tandis que le N retenu pour la croissance de poisson et de salade représente 19,3% du N issu de l'aliment, ce qui est inférieur à l'EUN d'autres études (Hu et al., 2015 ; Fang et al., 2017 ; Zou et al., 2017) (Tableau 1). Le bilan n'est pas équilibré puisque 24,5% du TN n'a pas été retrouvé en fin d'étude. Ce résultat est en accord avec celui d'autres études et est expliqué par des émissions de N sous forme de gaz, principalement sous forme de N<sub>2</sub> (Endut et al., 2014 ; Ru et al., 2017).

Les intrants en P les plus importants étaient l'aliment et le stock initial de poissons, représentant 97,1% du TP entrant (Figure 2). Le poisson pêché et la salade récoltée représentaient 51,9% du TP entrant. Ainsi, le P retenu pour la croissance de poisson représente 19,9% du P issu de l'aliment, ce qui est moins que la moyenne de 29% observée par Piedrahita (2003) et de 42% par Cerozi et Fitzsimmons (2017). Tandis que le P retenu pour la croissance de poisson et de salade représente 20,6% du P issu de l'aliment, ce qui est moins que les 71,7% observés par Cerozi et Fitzsimmons (2017) avec 29,4% utilisé pour la croissance des plantes et 42,3% pour celle des poissons (Tableau 1), mais dans un SA configuré différemment sur la gestion des matières en suspension (concentrant une forte proportion en P issu de l'aliment) et avec l'utilisation de poissons plus jeunes, à croissance plus rapide.

Etant donné que P est un élément conservatif et que les analyses ont été réalisées dans chaque compartiment du système, un bilan équilibré était attendu. Dans cette étude, les 6,6% de TP entrants disparus sont plus bas que les 11% observés par Cerozi et Fitzsimmons (2017). Ce déséquilibre, tout comme pour celui observé avec N, est en partie expliqué par des imprécisions de mesure et d'échantillonnage, et plus particulièrement sur les eaux usées et les quantités de sédiments.



**Figure 2** : Bilan de masse du phosphore dans le système aquaponique. Les valeurs sont exprimées en pourcentage du phosphore total entrant dans le système.



**Tableau 1** : Devenir de l'azote et du phosphore contenu dans l'aliment observé dans différentes études de systèmes aquaponiques.

Poissons	Plantes	N de l'aliment retenu par (%)			P de l'aliment retenu par (%)			P de l'aliment contenu dans les sédiments (%)	Références
		Poisson	Plante	Poisson + Plante	Poisson	Plante	Poisson + Plante		
<b>Carpe</b>	Salade	18,7	0,6	19,3	19,9	0,7	20,6	39,5	Etude actuelle
<b>Carpe</b>	Chou chinois	22,6	-	43,8	-	-	-		Fang et al. (2017)
<b>Carpe</b>	Chou chinois	-	-	35,2-50,0	-	-	-		Zou et al. (2017)
<b>Tilapia</b>	Salade	-	-	-	42,3	29,4	71,7	10,7	Cerozi et Fitzsimmons (2017)
<b>Tilapia</b>	Salade et basilique	-	-	-	-	-	10,0	5,0	Delaide et al. (2017)
<b>Tilapia</b>	Tomate	24,3	17,0	-	-	-	-	-	Hu et al. (2015)
<b>Tilapia</b>	Chou chinois	19,4	15,0	-	-	-	-		Hu et al. (2015)
<b>Saumon</b>	-	36,5-47,1	-	-	20,4 - 38,6	-	-	-	Sun et al. (2016)
<b>Plusieurs espèces</b>	-	25,0 <sup>1</sup>	-	-	29,0 <sup>1</sup>	-	-	-	Piedrahita (2003)

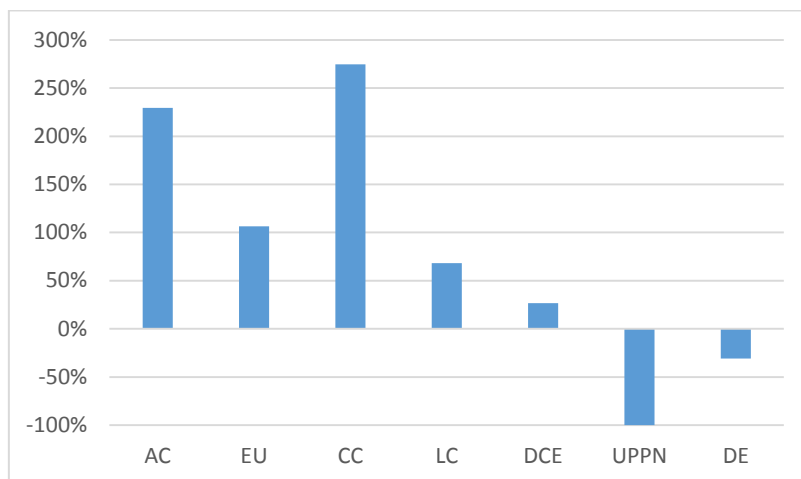
<sup>1</sup> Valeurs moyennes calculées à partir d'estimations issues du : saumon Atlantique, carpe, poisson chat, bar, daurade, truite arc-en-ciel et tilapia.

### 2.3 Analyse de cycle de vie

Suivant le coefficient Allocsalade (0,03), l'analyse de contribution pour la production de 1 kg de croit de salade en 52 jours dans le SA a mis en avant que l'énergie utilisée a été le principal contributeur aux indicateurs DE (83%), DCE (78%), CC (70%) et AC (60%) tandis que la production de biomasse de carpe (assimilée à la principale source fertilisante des salades) a été le principal contributeur à UPPN (98%) et EU (49%).

Dans le SHI, l'énergie utilisée a contribué le plus à DE (98%) et DCE (56%), tandis que la solution fertilisante a contribué le plus à AC (81%), CC (76%), EU (67%) et LC (65%).

En comparant les impacts de la production de salade dans les deux systèmes (Figure 3), les plus petites différences observées sont pour DCE (27%, SA<SHI) et DE (31%, SA>SHI), principalement expliquées par des effets cumulés liés à l'utilisation d'énergie et de solutions fertilisantes dans ces systèmes intensifs. Ainsi, comme indiqué dans des études antérieures (Boxman et al., 2017 ; Forchino et al., 2017 ; Xie et Rosentrater, 2015), l'utilisation d'énergie en SA, principalement par les pompes du SAR (Cao et al., 2013), ont contribué fortement aux impacts environnementaux, tandis que l'utilisation de nutriments de synthèse dans le SHI a contribué le plus à la DCE. Pour la DE, comme la production d'électricité française est principalement issue du nucléaire et de l'hydraulique, toutes deux dépendantes en eau, cela explique la forte contribution de l'énergie à cet impact, et encore plus en SA nécessitant plus d'eau pour les poissons. Les différences d'impact étaient plus contrastées sur les autres indicateurs où l'utilisation d'aliment poisson en SA était plus marquée sur UPPN (100%), tandis que l'utilisation de solutions fertilisantes de synthèse était plus marquée sur CC (275%), AC (229%), EU (106%) et LC (68%).



**Figure 3** : Pourcentage d'écart des impacts pour 1 kg de gain de salade entre le système hydroponique indépendant et le système aquaponique, pour chaque catégorie : acidification (AC), eutrophisation (EU), changement climatique (CC), compétition sur l'utilisation des terres (LC), demande cumulée en énergie (DCE), utilisation de la production primaire nette (UPPN) et dépendance en eau (DE).

## 2.4 Limites de l'étude

Plusieurs limites sont à considérer avant de pouvoir généraliser ces résultats. L'étude a été menée en hiver, ce qui a une incidence sur les performances de croissance de la salade (durée de culture plus longue) et de la carpe (IC dégradé). L'étude a été calée sur le cycle de production de la salade, plus courte que celui de la carpe, ce qui limite les interprétations du bilan de masse, et plus spécifiquement les ratios utilisés dans le calcul d'AllocSalade de l'ACV. Un temps d'étude plus long aurait réduit certaines incertitudes liées notamment à l'effet des saisons et à l'IC des poissons.

## Conclusion

Si l'association d'une production animale et d'une production végétale, telle que l'aquaponie, est un principe intéressant, il n'en reste pas moins que la part de nutriments disponibles issus du SAR, retenue par les salades (0,6% N et 0,7% P) est faible. A partir des bilans de masse de N et P, il est donc difficile de déterminer les avantages, d'un point de vue environnemental, d'une salade produite en SA par rapport à une salade produite en SHS.

En complément, l'ACV met en évidence que la production de salade en SA, par rapport à celle en SHS, a un moindre impact sur des indicateurs tels que CC, AC, EU et LC, lié à l'absence de fertilisants minéraux. Néanmoins, la différence entre les deux types de production pour DCE n'est pas sensible, ce qui laisse entrevoir des améliorations à apporter sur l'utilisation et l'origine de l'énergie. Il en est de même pour DE où, notamment dans un contexte d'agriculture urbaine, le recyclage et l'approvisionnement en eau sont également des axes de progrès.

Enfin, si l'utilisation de l'aliment poisson comme source de nutriments a un moindre impact sur CC, son impact sur l'UPPN est très important. Pour rendre l'aquaponie plus vertueuse, il est donc nécessaire d'utiliser un aliment économe en huile et farine de poisson, si possible avec des ingrédients produits localement.

## Références bibliographiques

- Aubin J., Papatryphon E., van der Werf H.M.G., Chatzifotis S., 2009. Assessment of the environmental impact of carnivorous finfish production systems using life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production* 17(3): 354-361.
- Billard R., 1995. Les carpes biologie et élevage.
- Boxman S.E., Zhang Q., Bailey D., Trotz M.A., 2017. Life Cycle Assessment of a Commercial-Scale Freshwater Aquaponic System. *Environmental Engineering Science* 34(5): 299-311.
- Cerozi B.S., Fitzsimmons K., 2017. Phosphorus dynamics modeling and mass balance in an aquaponics system. *Agricultural Systems* 153: 94-100.
- Cho C.Y., Kaushik S.J., 1990. Nutritional energetics in fish: energy and protein utilization in rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *World Reviews in Nutrition and Dietetics* 61: 132-172.
- Delaide B., Delhaye G., Dermience M., Gott J., Soyeurt H., Jijakli M.H., 2017. Plant and fish production performance, nutrient mass balances, energy and water use of the PAFF Box, a small-scale aquaponic system. *Aquacultural Engineering* 78: 130-139.
- Endut A., Jusoh A., Ali N., 2014. Nitrogen budget and effluent nitrogen components in aquaponics recirculation system. *Desalination and Water Treatment* 52(4-6): 744-752.
- Fang Y.K., Hu Z., Zou Y., Fan J.L., Wang Q.S., Zhu Z.R., 2017. Increasing economic and environmental benefits of media-based aquaponics through optimizing aeration pattern. *Journal of Cleaner Production* 162: 1111-1117.
- 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.
- Foucard P., Tocqueville A., Gaumé M., Labbé L., Baroiller J.F., Lejolivet C., Darfeuille B., 2019. Potentiel de développement de l'aquaponie en France : Le programme APIVA® "Aquaponie Innovation Végétale et Aquaculture". *Innovations Agronomiques* 71: 385-400.
- Fry J.P., Mailloux N.A., Love D.C., Milli M.C., Cao L., 2018. Feed conversion efficiency in aquaculture: do we measure it correctly? *Environmental Research Letters* 13(2).
- Goddek S., Delaide B., Mankasingh U., Ragnarsdottir K.V., Jijakli H., Thorarinsdottir R., 2015. Challenges of Sustainable and Commercial Aquaponics. *Sustainability* 7(4): 4199-4224.
- Graber A., Junge R., 2009. Aquaponic Systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. *Desalination* 246(1-3): 147-156.
- Guinee J.B., Gorree M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., de Koning A., van Oers L., Wegener Sleswijk A., Suh S., Udo de Haes H.A., 2002. Handbook on Life Cycle Assessment. An operational guide to the ISO Standards, Springer Netherlands.
- Hollmann R., Cronin G, Brett J., 2016. An aquaponics Life Cycle Assessment: Evaluating an innovative method for growing high quality produce and protein. *LCA Food*. Dublin: 8.
- Hu Z., Lee J.W., Chandran K., Kim S., Brotto A.C., Khanal S.K., 2015. Effect of plant species on nitrogen recovery in aquaponics. *Bioresource Technology* 188: 92-98.
- Huijbregts M.A.J., 1999. Life-cycle impact assessment of acidifying and eutrophying air pollutants. Calculation of characterisation factors with RAINS-LCA, Faculty of Environmental Science, Univ. of Amsterdam.
- Klinger D., Naylor R., 2012. Searching for Solutions in Aquaculture: Charting a Sustainable Course. *Annual Review of Environment and Resources*, Vol 37. A. Gadgil and D. M. Liverman. Palo Alto, Annual Reviews. 37: 247-+.
- Love D.C., Fry J.P., Genello L., Hill E.S., Frederick J.A., Li X.M., Semmens K., 2014. An International Survey of Aquaponics Practitioners. *Plos One* 9(7).
- Love D.C., Fry J.P., Li X.M., Hill E.S., Genello L., Semmens K., Thompson R.E., 2015. Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey. *Aquaculture* 435: 67-74.

- Papatryphon E., Petit J., Kaushik S.J., van der Werf H.M.G., 2004. Environmental impact assessment of salmonid feeds using Life Cycle Assessment (LCA). *Ambio* 33(6): 316-323.
- Piedrahita R.H., 2003. Reducing the potential environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation. *Aquaculture* 226(1-4): 35-44.
- Rakocy J.E., Masser M.P., Losordo T.M., 2006. Recirculating aquaculture tank production systems : Aquaponics - integrating fish and plant culture.
- Ru D.Y., Liu J.K., Hu Z., Zou Y.N., Jiang L.P., Cheng X.D., Lv Z.T., 2017. Improvement of aquaponic performance through micro- and macro-nutrient addition. *Environmental Science and Pollution Research* 24(19): 16328-16335.
- Schreckenbach K., Knosche R., Ebert K., 2001. Nutrient and energy content of freshwater fishes. *Journal of Applied Ichthyology* 17(3): 142-144.
- Sun G.X., Liu Y., Qiu D.G., Yi M.M., Li X., Li Y., 2016. Effects of feeding rate and frequency on growth performance, digestion and nutrients balances of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in recirculating aquaculture systems (RAS). *Aquaculture Research* 47(1): 176-188.
- Weidema B.P., Schmidt J.H., 2010. Avoiding Allocation in Life Cycle Assessment Revisited. *Journal of Industrial Ecology* 14(2): 192-195.
- Wongkiew S., Hu Z., Chandran K., Lee J.W., Khanal S.K., 2017. Nitrogen transformations in aquaponic systems: A review. *Aquacultural Engineering* 76: 9-19.
- Wongkiew S., Popp B.N., Kim H.J., Khanal S.K., 2017. Fate of nitrogen in floating-raft aquaponic systems using natural abundance nitrogen isotopic compositions. *International Biodeterioration & Biodegradation* 125: 24-32.
- Xie K., Rosentrater K.A., 2015. Life cycle assessment (LCA) and Techno-economic analysis (TEA) of tilapia-basil aquaponics. 2015 ASABE Annual International Meeting, New Orleans, LA, United States.
- Zou Y.N., Hu Z., Zhang J., Fang Y.K., Li M.Y., Zhang J.D., 2017. Mitigation of N<sub>2</sub>O Emission from Aquaponics by Optimizing the Nitrogen Transformation Process: Aeration Management and Exogenous Carbon (PLA) Addition. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 65(40): 8806-8812.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0).



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « *Innovations Agronomiques* », la date de sa publication, et son URL ou DOI).