HAL open science

Acquisition de données de performances des systèmes aquaponiques : potentiel phytoépuratoire et qualité des produits

Lucile Delorme

To cite this version:

Lucile Delorme. Acquisition de données de performances des systèmes aquaponiques : potentiel phytoépuratoire et qualité des produits. Sciences du Vivant [q-bio]. 2019. dumas-02632546

HAL Id: dumas-02632546

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02632546

Submitted on 27 May 2020

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

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

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

AGROCAMPUS OUEST

- ● CFR Angers
- ● CFR Rennes

Année universitaire : 2018 - 2019

Spécialité : IEVU

Spécialisation (et option éventuelle) :

Agriculture urbaine

Mémoire de Fin d'Études

- ● d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- ☐ de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- ☐ d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Acquisition de données de performances des systèmes aquaponiques : potentiel phytoépuratoire et qualité des produits

Par : Lucile DELORME

Soutenu à Angers le 05/09/2019

Devant le jury composé de :

Président : Gilles GALOPIN

Maître de stage : Pierre FOUCARD

Enseignant référent : Laure VIDAL-BEAUDET

Autres membres du jury (Nom, Qualité) :

Jean Charles MICHEL (Unité EPHOR), Juré

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

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

REMERCIEMENTS

Je remercie de tout cœur Pierre FOUCARD pour son temps et son apprentissage, sa confiance quant à la réalisation de mes tâches, ses conseils pertinents quant à la rédaction de ce rendu et à la mise au point d'un poster scientifique pour les Journées de la Recherche de la Filière Piscicole. Il fut pour moi et restera un mentor d'exception.

Merci à Aurélien TOCQUEVILLE pour m'avoir fait prendre part à ce projet passionnant.

Merci au personnel du RATHO, pour ces journées de travail dans la bonne ambiance même sous la canicule, mon intégration dans la vie du centre et ces parties de jeu de société endiablées.

J'adresse aussi mes remerciements à Théo DUBOIS pour sa collaboration et nos échanges enrichissants sur nos stages respectifs durant et hors de nos déplacements communs.

J'associe à ces remerciements le personnel de la SERAIL pour leur contribution et leur expertise.

Je remercie enfin mes parents, sans qui rien de cette aventure n'aurait été possible.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS

TABLE DES MATIERES

GLOSSAIRE ET ABREVIATIONS

TABLE DES ANNEXES

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Introduction 1

I. Contexte de l'aquaponie 3

A. Historique et principes généraux 3

B. Types de systèmes 3

C. Avantages et inconvénients de l'aquaponie 4

D. Enjeux actuels 4

II. Bilan de masse du système pilote du RATHO 6

A. Présentation de l'approche 6

B. Matériel et méthodes 6

1. Dispositif expérimental : le système expérimental du RATHO 6
2. Espèces végétales et piscicoles installées dans le système 8
3. Paramètres étudiés 8

C. Résultats 9

D. Analyse et discussion 11

E. Conclusion du bilan de masse 12

III. Etude de la qualité nutritionnelle et sensorielle de tomates aquaponiques 13

A. Matériel et méthodes 13

1. Dispositif expérimental 13
2. Compartiment piscicole 13
3. Compartiment végétal 15
4. Physico-chimie de l'eau dans les compartiments 18

B. Résultats 18

1. Physico-chimie 18
2. Résultats zootechniques 19
3. Résultats de l'expérimentation sur les tomates 20

C. Analyse et discussion 22

1. Analyse des paramètres du système 22
2. Concernant les perches 22
3. Conduite de culture des tomates 23
4. Qualité des tomates 24

D. Conclusion sur la qualité des plantes en aquaponie 26

IV. Utilisation des eaux de surverse du compartiment végétal pour la production de spiruline (*Arthospira platensis*) 27

A. Matériel et méthodes 27

1. Dispositif expérimental 27
2. Modalités mises en place 28
3. Mesures effectuées 29
4. Protocole de récolte 29
5. Analyse de la qualité de la spiruline récoltée et séchée 30

B. Résultats 30

C. Analyse et discussion 33

D. Conclusion 35

Conclusion générale de la problématique 36

BIBLIOGRAPHIE 37

ANNEXES

GLOSSAIRE ET ABREVIATIONS

APIVA	Aquaponie, Innovation Végétale et Aquaculture
ASTREDHOR	Association nationale des structures d'expérimentation et de démonstration en horticulture
CIRAD	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
CTIFL	Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes
DRAPS	Système aquaponique à double recirculation (Double recirculation aquaponic system)
EPLEFPA	Etablissement public local d'enseignement et de formation professionnelle agricoles
ITAVI	Institut Technique d'Aviculture, cuniculture et aquaculture
RAS	Système aquacole recirculé (recirculation aquaculture system)
RATHO	Rhône-Alpes Techniques Horticoles
SERAIL	Station d'Expérimentation Rhône-Alpes Information

pH	Potentiel Hydrogène
NH_4^+	Ammonium
NO_2^-	Nitrite
NO_3^-	Nitrate
PO_4^{3-}	Phosphate
K	Potassium
Fe	Fer
Ca	Calcium
Mn	Manganèse
K_2SO_4	Sulfate de potasse

TABLE DES ANNEXES

Annexe I Résumé des analyses Eurofins pour T_0, T_{inter} et T_{final} du bilan de masse 2019……II

Annexe II Paramètres relevés et zones de prélèvements du bilan de masse 2019……...II

Annexe III Paramètres relevés et zones de prélèvements de l'expérimentation sur les tomates, 2019……..III

Annexe IV Résultats des récoltes de l'expérimentation des tomates « Cobra » en hydroponie et aquaponie……....IV

Annexe V Bilan du CTIFL pour la caractérisation sensorielle et nutritionnelle des lots de tomates (modalités hydroponie, aquaponie et pleine terre)…….…V

Annexe VII Bilan du screening végétal 2019……..….XIX

Annexe VIII Composition des milieux de base, des intrants post-récolte et des intrants journaliers de la spiruline……....XXV

Annexe IX Rapport d'analyse de la composition floristique : Milieux de culture……..XXVI

Annexe X Rapport d'analyse de la composition floristique : spiruline séchée sous forme de paillettes…….XXVII

Annexe XI Physicochimie des différentes modalités de spiruline…….…..XXVIII

Annexe XII Bilan de masse spiruline essai spiruline bio 2018…….…XXX

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 Tonnage des productions mondiales des produits de la mer ……1

Figure 2 Schéma général de l'aquaponie…….3

Figure 3 Evolution de l'intérêt pour les recherches internet sur le thème de l'aquaponie……5

Figure 4 Schéma du pilote aquaponique situé à l'ASTREDHOR-RATHO……..…7

Figure 5 Evolution des conductivités piscicole et horticole durant le bilan de masse 2019……..9

Figure 6 Evolution des concentrations en azote ($N\text{-}NO_3^-$) et phosphore ($P\text{-}PO_4^{3-}$) dans les compartiments durant le bilan de masse 2019……..10

Figure 7 Bilans de masse 2019 des éléments N, P et K du système aquaponique expérimental..10

Figure 8 Photographie d'une perche commune……..…..13

Figure 9 Photographie de l'installation des tomates en aquaponie en irrigation goutte-à-goutte avec perlite et pots hollandais……..……16

Figure 10 Photographie de l'installation des tomates en plein sol à la SERAIL……....16

Figure 11 Conductivité dans les différents compartiments durant l'expérimentation……....18

Figure 12 Graphiques des évolutions des concentrations en NPK dans les compartiments…..….19

Figure 13 Poids moyen et indice de conversion des perches……...19

Figure 14 Biomasses récoltées totales et commercialisables pour les modalités hors-sols……20

Figure 15 Photographies de BER sur les tomates d'hydroponie et d'aquaponie……...21

Figure 16 Profils sensoriels des trois modalités de culture…….21

Figure 17 Carcasses des échantillons issus de pleine terre et d'aquaponie……...25

Figure 18 Schéma de l'expérimentation « Spiruline – Essai BIO3 »……...28

Figure 19 Outils de mesure du Secchi avec disque de Secchi en fond……29

Figure 20 Photographie des paillettes obtenues pour les différentes modalités……...30

Figure 21 Pourcentage de NH3 en fonction du pH et de la température……....34

Tableau 1 Avantages et inconvénients de l'aquaponie…….4

Tableau 2 Quantité d'élément exportés du système par la phytoépuration……10

Tableau 3 Paramètres critiques supposés de la perchaude……..…14

Tableau 4 Table de rationnement pour *Perca fluviatilis* fournie par l'éleveur……..…15

Tableau 5 Critères de description de la tomate……....17

Tableau 6 Bilan de phytoépuration des tomates pour les parties végétales et les fruits……...20

Tableau 7 Rendements et taux de commercialisation pour les différentes modalités……...20

Tableau 8 Table de rationnement ajustée des perches obtenue pour un nourrissage ad libitum..…22

Tableau 9 Surfaces maximales envisageables en cas de monoculture dans le système…….23

Tableau 10 Description des paramètres suivis de la spiruline…….29

Tableau 11 Présentation des rendements obtenus aux termes de l'expérimentation……...31

Tableau 12 Présentation du bilan sanitaire des échantillons de spiruline……..31

Tableau 13 Bilan nutritionnel des différentes modalités……32

Tableau 14 Résumé de l'analyse floristique des milieux de culture et du produit fini……..32

Tableau 15 Volume d'eau du système aquaponique apporté et équivalent en azote……..33

Tableau 16 Calcul de l'apport journalier azoté théorique nécessaire pour fournir en azote la spiruline produite durant l'expérimentation……..…..34

Introduction

Selon l'INED, la population mondiale atteindra les 10 milliards d'habitants en 2050. Nourrir 2.3 milliards de personnes supplémentaires en prenant en compte les enjeux climatiques sera une tâche ardue. La consommation mondiale de poisson, notamment, est en forte hausse. D'après la FAO, celle-ci a dépassé pour la première fois les 20 kilogrammes par an et par habitant en 2014, contre 14 kilogrammes dans les années 90 (FAO, 2016). Ceci est surtout dû à l'augmentation de l'aquaculture qui fournit désormais plus de la moitié des stocks : le tonnage des pêches stagne depuis les années 90 (Figure 1). La croissance importante de cette filière agricole vient de la composition même du poisson (richesse en protéines et en acides gras polyinsaturés), et de son statut de matière alimentaire de base, en particulier dans les pays en voie de développement. Selon le dernier rapport de la FAO sur les perspectives d'alimentation, l'aquaculture continuera son expansion, du fait d'une demande croissante (FAO, 2019).

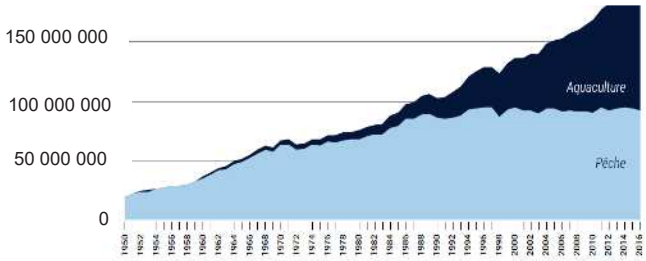


Figure 1 : Tonnage des productions mondiales des produits de la mer (FAO 2018)

Un enjeu de l'aquaculture est de disposer correctement de ses effluents. Principal rejet des activités de production piscicoles, ceux-ci sont le résultat des excrétions fécales et branchiales des poissons (Meriac et al, 2014). Les réglementations croissantes sur la qualité des eaux des milieux naturels contraignent de plus en plus leur disposition. Ces eaux chargées en ions azotés et phosphatés ainsi que les boues piscicoles (issues de leur filtration mécanique) restent encore sous-exploitées, non optimisées, mais présentent un potentiel important quant à leur composition en nutriments, ouvrant la voie à des possibilités d'exploitation dont les essais et les publications ne cessent de fleurir (Wang et al, 2019 ; Li et al, 2019 ; Khiari et al, 2018 ; Gichana et al, 2018).

Depuis le 1er janvier 2014, la loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques a fixé le débit maximal de prélèvement des pisciculture aux neuf dixièmes du débit moyen interannuel du cours d'eau (legifrance.gouv.fr). Les systèmes d'aquaculture en circuit recirculé (RAS), de par le recyclage de l'eau, permettent de diminuer les besoins en eau de renouvellement et donc potentiellement de produire davantage avec un débit prélevable identique, ainsi que de ne pas subir les problématiques dues à la sécheresse étant donné cette limitation. De plus le RAS présente un taux d'ouverture jusqu'à 100 fois moins important qu'en pisciculture conventionnelle, et la quantité de matières en suspension rejetée dans l'environnement est réduite grâce à une phase de filtration mécanique (IFREMER, 2009). Le développement des circuits piscicoles recirculés permet donc une diminution de la consommation en eau et des rejets d'effluents, mais ces derniers sont plus concentrés en azote et en phosphore. Les débits rejetés étant toutefois beaucoup plus faibles qu'en pisciculture conventionnelle, le traitement des effluents azotés devient techniquement possible. Ceux-ci s'accumulent parfois à des taux très élevés sous forme de nitrates, forme azotée non nocive pour les poissons jusqu'à une forte dose, mais toutefois impactante pour l'environnement. Les systèmes recirculés les plus aboutis (les plus fermés) recourent à la technique de la dénitrification pour faire baisser le taux de nitrates dans l'eau, tandis que la plupart des RAS appliquent simplement un taux d'ouverture suffisant pour rester en dessous d'un seuil de 150 mg/L, ce qui implique des rejets dans l'environnement. La technique de dénitrification permet le changement du nitrate [NO_3^-] en azote atmosphérique [N_2]. Mais cela ne résout pas le problème de rejet d'azote global, ni le rejet de la fraction phosphatée qui est beaucoup plus complexe à gérer.

L'aquaculture multitrophique intégrée se développe pour répondre à cet enjeu (Ashkenazi et al, 2018 ; Gichana et al, 2018). Selon les chercheurs de l'institut océanographique Paul Ricard, « *le concept d'aquaculture multitrophique intégrée (AMTI) s'inspire du fonctionnement trophique en milieu naturel […] pour aboutir finalement à un meilleur rendement environnemental et économique.* ». Ce principe a donc pour objectif de diminuer l'impact des rejets des effluents dans l'environnement en associant des chaînes trophiques ayant des interactions bénéfiques. L'aquaponie est un système d'AMTI en eau douce, et peut répondre à cette problématique grâce à l'efficacité de la phytoépuration (Estim et al, 2018). Il s'agit d'un mode de culture associant élevage de poissons (aquaculture) et culture de plantes en hors-sol (hydroponie) dans un même système de recirculation de l'eau.

L'aquaponie est étudiée dans le cadre du programme APIVA (Aquaponie, Innovation Végétale et Aquaculture), porté par l'ITAVI. Des résultats ont déjà été obtenus, dont de premières approches de dimensionnement des systèmes aquaponiques. L'ITAVI cherche à affiner ces premières estimations et à évaluer l'efficacité réelle de l'aquaponie en termes d'épuration des nutriments. De ce fait, la problématique de ce mémoire de fin d'étude réalisé dans le cadre de ces recherches a été définie ainsi : **En quoi l'aquaponie peut-elle permettre une diminution des rejets azotés, phosphorés et potassiques tout en offrant une production de qualité nutritionnelle compétitive dans le cadre de la gestion des effluents piscicoles ?**

Cette problématique était orientée autour de 3 hypothèses :

- **Hypothèse 1 :** Le bilan du rejet d'effluents azotés et phosphorés de la partie RAS du système aquaponique est amélioré du fait de la capacité phytoépuratoire du compartiment végétal.
- **Hypothèse 2 :** Les nutriments issus du RAS peuvent suffire pour cultiver des plantes à fruits comme les tomates, avec une qualité nutritionnelle du produit final comparable à des modes de culture conventionnels.
- **Hypothèse 3 :** Il est possible d'optimiser davantage le bilan azoté de l'aquaponie en complétant la bioremédiation des rejets du compartiment végétal, chargées en nutriments, dans la production de cyanobactéries valorisables notamment en alimentation humaine, avec une qualité de produit sanitaire et nutritionnelle comparables aux produits conventionnels.

Pour répondre à ces hypothèses, plusieurs expérimentations ont été réalisées au sein du pilote expérimental d'aquaponie mis en place par l'ITAVI au sein d'une serre de la station expérimentale ASTREDHOR-RATHO, des relevés et un suivi des installations ont été opérés, ainsi que des analyses en laboratoires. Suite à une rapide présentation du contexte de l'aquaponie et du système support de l'étude, trois expérimentations seront présentées selon le schéma directeur classique "matériel et méthodes", "résultats" et "discussions", à commencer par une étude des flux de nutriments en aquaponie grâce au bilan de masse achevé au début du stage et son interprétation. La partie suivante sera consacrée à une expérimentation visant à évaluer la qualité organoleptique et nutritionnelle de tomates produites en aquaponie. Enfin, la dernière partie traitera de la faisabilité de l'utilisation des eaux de sortie du système aquaponique en tant que milieu de culture et source d'azote pour de la spiruline.

I. Contexte de l'aquaponie

A. Historique et principes généraux

L'aquaponie est la production simultanée de poissons et de végétaux hors sol dans un système comprenant plusieurs compartiments couplés. Elle permet une économie d'eau importante et ne nécessite qu'un faible ajout d'eau de renouvellement contrairement aux systèmes d'aquaculture classiques. Utilisé à l'origine par les aztèques et en Chine via la culture de végétaux à proximité d'élevage de poissons (Edwards, 2015), ce principe a été remis au goût du jour dans les années 70 - 80 afin d'améliorer la qualité des eaux d'aquaculture. Ces dernières sont riches en matières organiques qui peuvent être rendues exploitables pour la production de végétaux (Lewis et al, 1978). Ces eaux contiennent notamment de l'ammonium, du phosphore, du potassium et autres macro- et micronutriments en proportions variables selon le type d'aliment et la composition de l'eau de renouvellement. L'aquaponie permet leur exploitation en faisant transiter cette eau via deux compartiments supplémentaires après une filtration mécanique (Figure 2) : un biofiltre composé de bactéries (principalement Nitrosomonas et Nitrobacter) et un compartiment de culture de végétaux.

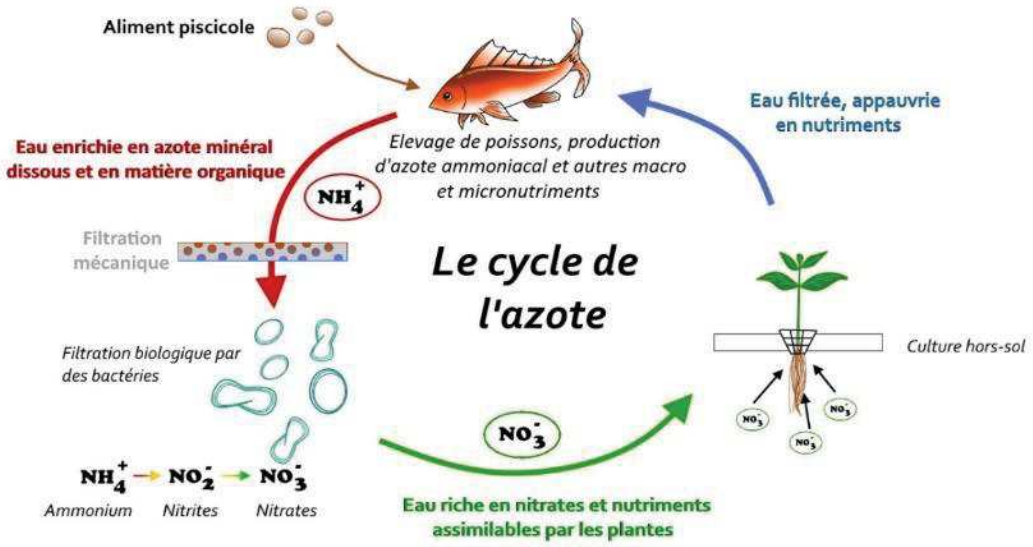


Figure 2 : Schéma général de l'aquaponie (Lucile Delorme)

L'azote ammoniacal ($N\text{-}NH_4^+$) rejeté par les poissons passe par une phase de filtration biologique permettant une transition de cette forme azotée rapidement toxique pour les animaux aquatiques vers une forme plus neutre, l'azote nitrique ($N\text{-}NO_3^-$) ou les nitrate (Estim et al, 2018). Les éléments sont alors assimilés par des productions végétales à valeur ajoutée, en général maraîchères. En aquaponie, les légumes-feuilles ont le plus de succès (Villaroel et al, 2016) car aux besoins en phosphore et potassium plus restreints que les autres productions, mais aussi car offrant un meilleur rendement grâce à des rotations de culture rapides (Bailey et Ferrarezi, 2017). Des productions plus complexes sont possibles : la tomate arrive en seconde position après le basilic dans un classement des principales productions aquaponiques selon Love et al (2014).

B. Types de systèmes

Plusieurs échelles de production plus ou moins importantes selon la surface du système existent (Foucard et al, 2019). On parle d'aquaponie domestique (5-20m²), démonstrative (50-200m²), semi-commerciale (200-1000m²) ou encore commerciale (1000m² et plus). Les techniques de culture végétale en aquaponie sont multiples :

- **La technique DWC** (Deep Water Culture), ou technique sur « Rafts »

Elle est la plus populaire. Les plants sont insérés sur des radeaux flottants ponctués de trous à intervalle réguliers. Les racines se retrouvent directement dans une eau d'une profondeur d'une vingtaine de centimètres. Cette installation est très ergonomique et facilite l'organisation des cultures. L'accumulation de sédiments dans le compartiment au cours du temps pourrait toutefois gêner l'assimilation des nutriments par les racines (Foucard et al, 2019).

- **La technique NFT** (Nutrient Film Technique) - technique de culture sur film nutritif

Consiste en gouttières légèrement inclinées, les racines se retrouvant en contact d'un mince filet d'eau au débit important et bien oxygéné. L'inconvénient principal de ce système est sa faible résilience et sa vulnérabilité en cas de panne électrique : les racines alors hors de l'eau risqueraient un dessèchement rapide.

- **La technique de culture sur média**

C'est la plus utilisée en domestique et démonstratif. Les plants dans un substrat neutre comme des billes d'argile expansées. Pour les installations de taille modérée, le média assure en général l'accueil des bactéries nitrifiantes. Il offre une filtration mécanique supplémentaire, mais les connaissances de son obstruction sur le long terme ne sont pas encore bien définies.

D'autres techniques existent, bien que moins exploitées, telles que le goutte-à-goutte sur substrat inerte, les cultures verticales ou encore la technique de subirrigation.

C. Avantages et inconvénients de l'aquaponie

Les avantages principaux de l'aquaponie (Tableau 1) sont une économie d'eau de plus de 95% par rapport aux systèmes classiques (Rakocy et al, 2010), des rendements végétaux plus importants qu'en agriculture conventionnelle (Estim et al, 2018) et un caractère hors sol la rendant possible dans les zones non exploitables par l'agriculture conventionnelle (Thorarinsdottir, 2015 ; Schmautz et al, 2016), notamment en agriculture urbaine et péri-urbaine. Ses désavantages principaux sont des coûts énergétiques importants, la nécessité de maîtriser deux thématiques bien distinctes et un grand manque de données technico-économiques sur le sujet (Foucard et Tocqueville, 2019).

Tableau 1 : Avantages et inconvénients de l'aquaponie.

Avantages	Inconvénients
✓ Economies d'eau importantes ✓ Diversification des productions et hauts rendements (Somerville et al, 2014) ✓ Usage d'espaces non exploitables en conventionnel (sols dégradés, milieu urbain), à différentes échelles (familiale, commerciale) ✓ Pas de fertilisants nécessaires ✓ Production à hauts rendements ✓ Valorisation de l''aliment aquacole (Foucard et Tocqueville, 2019) ✓ Démarche d'économie circulaire (Foucard et Tocqueville, 2019)	× Coûts d'installation et demande en énergie importants × Nécessité de sélectionner des espèces à forte valeur ajoutée (Foucard et Tocqueville, 2019) × Peu de données technico-économiques et de dimensionnement fiables (Foucard et Tocqueville, 2019) × Demande une grande exigence technique, savoirs horticoles, aquacoles et bactériologiques nécessaires × Recherche de compromis et non d'un optimum pour les paramètres des deux productions, équilibre physico-chimique fragile (Foucard et Tocqueville 2019) × Pas d'introduction d'antibiotiques possible × Choix de gestion réduits comparé à l'aquaculture ou l'hydroponie seuls (Somerville et al, 2014) × Un label Bio inaccessible étant donné la législation (REGLEMENT (CE) 2018)

D. Enjeux actuels

L'intérêt porté à l'aquaponie est en forte croissance depuis 2008 au niveau mondial et depuis 2013 en France (Figure 3). Les enquêtes auprès des aquaponiculteurs dans le monde, et plus récemment en Europe, se multiplient (Villarroel et al, 2016 ; Miličić et al, 2017 ; Pollard et al, 2017), tout comme les organisations et entreprises exploitant ce système (Love et al, 2014 ; Miličić et al, 2017). L'aquaponie est considérée comme présentant un rôle social important pour l'éducation, l'humanitaire et la lutte contre les inégalités (Somerville et al, 2014).

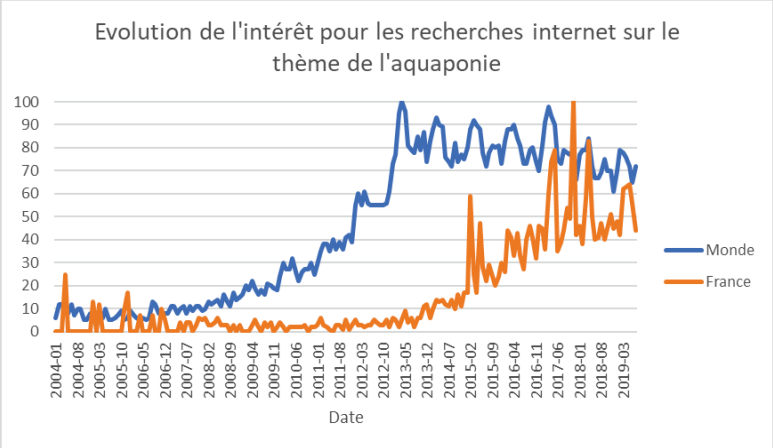


Figure 3 : Evolution de l'intérêt pour les recherches internet sur le thème de l'aquaponie. La base 100 des courbes correspond au mois où le thème recherché présente le plus grand pourcentage par rapport aux recherches totales de la région. Google Trends.

Autour de ces systèmes convergent aujourd'hui plusieurs enjeux, notamment l'épuration des déchets aquacoles, la réduction de l'énergie consommée, l'économie de la ressource en eau. L'aquaponie est considérée comme une technique durable s'inscrivant dans une économie circulaire. Sa grande dépendance à l'énergie reste un obstacle de taille, mais fait l'objet d'études visant à en diminuer sa consommation (Silva et al, 2018). Yogev et al (2016) rapportent que l'aquaponie est une candidate viable à la production de biogaz. En France, le Rapport Final De La Mission Sur Le Développement De L'aquaculture (Tanguy et al. 2008) fait mention du besoin d'une meilleure organisation et valorisation de la filière aquacole française, déjà stagnante, dans le but d'en éviter une régression. Se pose aussi la question de la qualité des produits issus des systèmes aquaponiques. Un des principaux enjeux de la production aquacole est d'avoir un produit de qualité. En circuit fermé (aquaponie comprise) les poissons peuvent développer de l' « off-flavour », un défaut d'arôme de la chair des poissons, diminuant grandement sa qualité organoleptique. Il s'agirait donc, afin de pallier ce phénomène, de mettre en place la « dépuration » du poisson, afin d'améliorer ses qualités organoleptiques (Lv et al, 2018).

Le programme APIVA (Aquaponie, Innovation Végétale et Aquaculture) est un projet de recherche et développement visant à obtenir des données technico-économiques sur des systèmes aquaponiques pilotes dans le but d'aiguiller l'installation et la conduite culturale des professionnels. Porté par l'ITAVI, il est le fruit d'une association entre l'INRA-PEIMA, l'EPLEFPA de la Lozère (Lycée de la Canourgue), l'ASTREDHOR-RATHO et le CIRAD. La station RATHO (Rhône-Alpes Techniques Horticoles) est une station de recherche horticole de l'ASTREDHOR. Située à Brindas dans la banlieue lyonnaise, elle réalise la mise en place et le suivi d'expérimentations à caractère horticole à destination des professionnels du secteur public et du privé. Le partenariat ITAVI-RATHO a permis la mise en place d'un des trois systèmes pilotes du projet APIVA dans cette station. Les objectifs d'APIVA sont :

- Réaliser une synthèse bibliographique de l'information concernant l'aquaponie
- Modéliser les flux des nutriments entre les différents compartiments
- Recueillir des éléments de dimensionnement et d'efficacité technico-économique
- Analyser de la qualité sanitaire et organoleptique des produits
- Etudier l'impact environnemental des systèmes aquaponiques
- Diffuser ces connaissances

Ce stage de fin d'études s'inscrit dans ces objectifs.

II. Bilan de masse du système pilote du RATHO

Une réponse à la problématique environnementale des charges azotée et phosphatée des effluents piscicoles en RAS pourrait être la phytoépuration des éléments via un biofiltre végétal. Pour faire ressortir les performances phyto épuratoires d'un système d'aquaponie et le bénéfice que peut avoir le compartiment végétal sur la charge azotée et phosphorée des effluents piscicoles, un bilan entrée/sortie était tout indiqué. Celui-ci permet l'évaluation du devenir des nutriments dans le système via un bilan de masse pour les éléments d'intérêt. Cette expérimentation devait permettre d'infirmer ou de confirmer notre première hypothèse : «Le bilan du rejet d'effluents azotés et phosphorés de la partie RAS du système aquaponique est amélioré du fait de la capacité phytoépuratoire du compartiment végétal».

A. Présentation de l'approche

Dans la cadre de la configuration et du dimensionnement des systèmes aquaponiques, plusieurs approches ont été envisagées dans la bibliographie. Les ratios définissant au mieux la valorisation des nutriments sont étudiés, en quête d'un consensus :

- **Les ratios poisson/plante**

Différents ratios quantifient le dimensionnement du compartiment végétal par rapport au dimensionnement du compartiment aquacole. Ces rapports peuvent concerner les surfaces de cultures végétales et surfaces d'élevage, le volume du compartiment végétal et celui du compartiment piscicole, ou encore les surfaces de cultures végétales et le volumes du compartiment piscicole (Foucard et Tocqueville, 2019). Mais ces ratios varient en fonction de l'espèce de poissons, de la variété de plantes, de la saison, de la conduite d'élevage.

- **Les ratios en lien avec l'aliment piscicole**

Rakocy et al (2010) présentent une approche exploitant l'apport journalier d'aliment par rapport à la surface cultivée. Mais toutes les sources bibliographiques mentionnant ce ratio n'expriment pas les mêmes valeurs (Somerville et al, 2014). Le taux d'ouverture, qui peut être calculé grâce au ratio apport d'aliment/apport d'eau neuve dans le système, varie d'une installation à l'autre. De plus, la proportion d'azote (et donc de protéines) par rapport au phosphore varie selon le type d'aliment, tout comme leur digestibilité (Foucard et Tocqueville, 2019).

Ces ratios restent donc assez variables et dépendants des éléments constituant le système tels que les espèces en place, le type d'aliment et le taux d'ouverture. Ils peuvent être exploités pour une première approche de dimensionnement, mais chaque système a ses caractéristiques propres. Afin d'avoir une meilleure approche du dimensionnement et de l'exploitation des nutriments apportés par l'aliment piscicole, un bilan de masse peut être employé. Il permet de mettre en exergue le devenir des nutriments apportés dans le système (par l'aliment, l'eau de renouvellement,…) en quantifiant leur fixation par les différents éléments du système (poissons, plantes, boues, matières en suspensions), le tout pour des espèces, un aliment et un laps de temps donnés. Cette approche a déjà été employée plusieurs fois, mais pour des systèmes à petite échelle (Jegatheesan et al, 2007 ; Endut et al, 2014), ou uniquement centrés sur un élément tel que le phosphore (Jegatheesan et al, 2007, Cerozi et al, 2017) ou l'azote (Endut et al, 2014). Plusieurs bilans de masse ont déjà été réalisés dans le cadre du projet APIVA en 2016 et 2017 (Jeager et al, 2018 ; Foucard et Tocqueville, 2019) et ont permis d'en perfectionner l'approche dans le cadre du projet.

B. Matériel et méthodes

1. Dispositif expérimental : le système expérimental du RATHO

Le bilan de masse a été réalisé entre le 15 Janvier 2019 et le 6 Mars 2019 soit pour une durée totale de 51 jours sur le pilote situé au RATHO. Le système aquaponique expérimental

y a été installé en 2014, et les premières expérimentations ont débuté en Janvier 2015. Le système occupait une serre d'une surface totale de 225 m² pour un système aquacole recirculé de 40 m² et 83 m² de surface agricole utile. Il s'agissait d'un système aquaponique aux compartiments horticoles et piscicoles découplés, principe développé par l'ITAVI début 2014 dans le contexte de la mise en place du pilote expérimental. L'indépendance des compartiments et le non-retour de l'eau du compartiment végétal au compartiment piscicole permettaient l'obtention de paramètres plus favorables aux différents espèces et l'ajout de microéléments dans la partie végétale sans affecter les poissons. La version découplée est aussi décrite par Kloas et al (2015) sous le nom de système aquaponique en double recirculation (DRAPS).

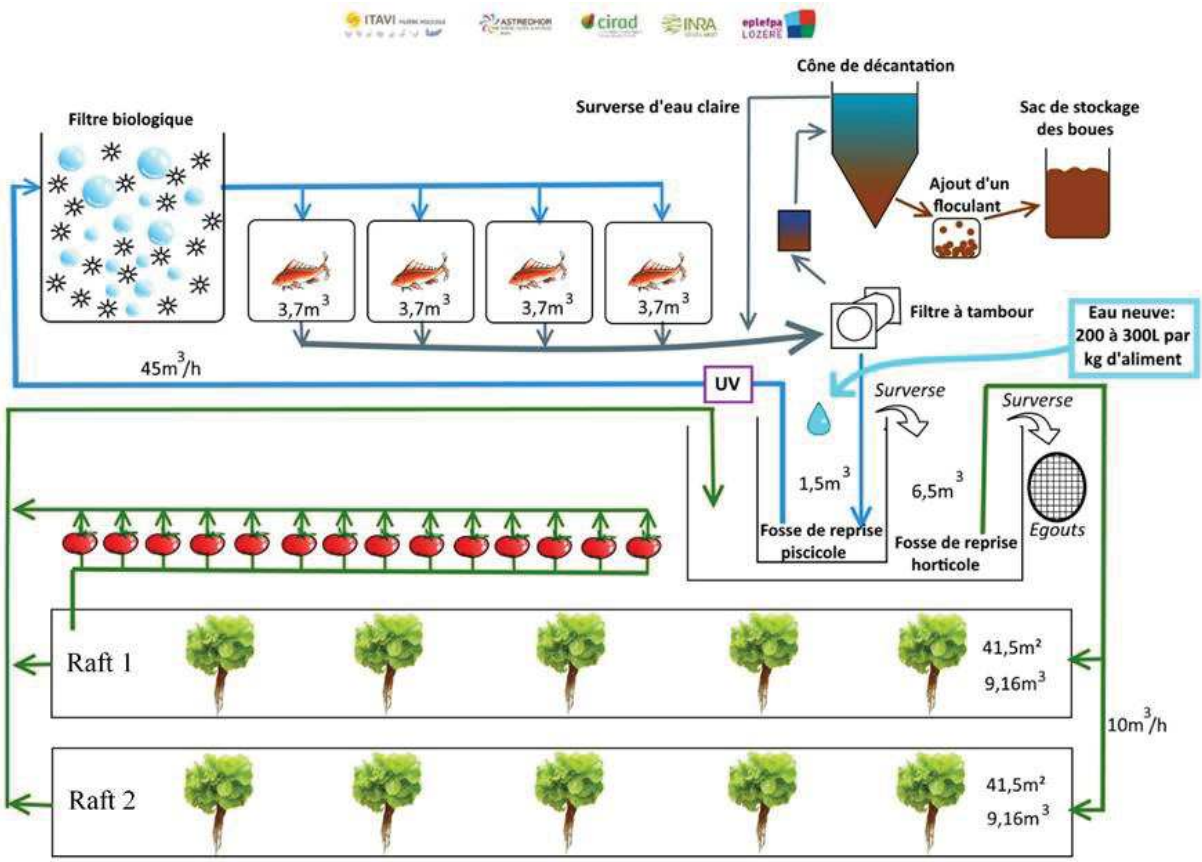


Figure 4 : Schéma du pilote aquaponique situé à l'ASTREDHOR-RATHO (Lucile Delorme)

Le volume d'eau de renouvellement du système s'élevait en moyenne de 1 à 10% de celui d'une pisciculture classique pour une même production de poissons. Il correspondait à la compensation de l'évapotranspiration et des vidanges ponctuelles des bassins. Cet ajout était aussi nécessaire contre l'accumulation de certains minéraux dans le système, comme le sodium présent dans l'aliment (phytotoxique pour les végétaux), mais aussi les nitrates, chroniquement toxiques pour certaines espèces de poissons (salmonidés notamment) à trop fortes concentrations (>100 mg/L selon Davidson et al, 2017). L'eau neuve était ajoutée en continu dans le système via une fosse de reprise piscicole de 1.5 m^3, de 0.6 à 1 m^3 par jour selon la biomasse piscicole (Figure 4). Ce chiffre équivalait à 200-300 litres d'eau neuve par kilogramme d'aliment piscicole, soit un taux d'ouverture du système de 3 à 5%. L'eau de la fosse de reprise piscicole était relevée à l'aide d'une pompe pour un débit recirculant de 45 m^3/h, passait par un filtre UV pour sa désinfection (traitement des algues et cyanobactéries notamment) jusqu'à un filtre biologique sur lit fluidisé muni d'un système de brassage permettant une oxygénation de l'eau à saturation. Le réservoir cylindrique composant ce filtre biologique, d'un volume de 7 m^3, contenait des médias filtrants ou « curlers » (à hauteur de 2,8 m^3) offrant une surface spécifique de 850 m²/m^3 et accueillant les populations bactériennes

d'intérêt. Ces bactéries autotrophes nitrifiantes (Nitrosomonas et Nitrobacter étant les plus connues) assuraient la transformation de l'ammoniac produit par les poissons en nitrate. L'azote nitrique ainsi obtenu était assimilable par les plantes.

L'eau repartait ensuite par gravité vers quatre bacs d'élevage aquacole de 3.7 m^3 chacun, puis arrivait dans le complexe de filtration mécanique. Ce dernier débutait par un filtre mécanique à tambour rotatif. L'eau filtrée retournait dans la fosse de reprise piscicole, tandis que l'eau de contre-lavage, riche en matière organique, était dirigée vers un bac de stockage tampon avant d'être envoyée dans un cône de décantation d'un volume de 2 m^3 ; le temps de rétention (rapport volume/débit) de cette eau "chargée" était d'approximativement 24 heures. Les boues y ayant décanté étaient soutirées à raison de 80 litres deux à trois fois par semaine. Elles transitaient dans un sac de filtration en géotextile suite à une étape préalable de floculation à l'aide de chitosan. L'eau de surface du cône, appauvrie en matières organiques, repartait par surverse dans le système en repassant par le filtre à tambour.

L'eau de la fosse de reprise piscicole réalisait fréquemment une surverse équivalente au volume d'eau de renouvellement et se retrouvait dans la fosse de reprise horticole. Une pompe envoyait l'eau à raison de 10 m^3/h à l'entrée de deux bassins de culture sur rafts disposés en parallèle de 41.5 m² chacun et 25 cm de profondeur d'eau. Le raft 1 accueillait 70 plaques en polyéthylène non réticulé, offrant une densité maximale de culture de 31.8 plants par m². Le raft 2 accueillait 52 plaques en polystyrène extrudé, avec au plus 44.7 plants par m². Une surface de 1.26 m² de culture sur média en sortie de raft faisait office de filtration mécanique de l'eau d'irrigation, afin de retenir les particules organiques fines et les débris végétaux pouvant y transiter. De la même manière que l'eau du compartiment piscicole se déversait dans le compartiment horticole par surverse, l'eau transitant dans la boucle horticole s'évacuait du système par une autre surverse cette fois ci avec un raccordement à l'égout.

2. Espèces végétales et piscicoles installées dans le système

Le système piscicole recirculé contenait des truites arc-en-ciel. La biomasse initiale s'élevait à 140.36 kg, soit une densité d'élevage initiale de 19 kg/m^3 car seulement deux bassins étaient en eau. Toute la surface du système de culture hors-sol était exploitée, avec une répartition égale de laitues feuille-de-chêne, de laitues iceberg, de mâches et d'épinards (soit environ 20 m² chacun). Chaque variété était répartie équitablement sur les deux sortes de rafts. Les variétés de salade était conduite à une densité de 15.9 plants par m² pour la moitié et 22.4 plants par m² pour le reste, les épinards à hauteur de 31.8 et 44.7 plants par m².

3. Paramètres étudiés

a) Ratios relatifs à l'aliment piscicole

Un objectif était d'optimiser le ratio moyen d'eau neuve apportée dans le système par kilogramme d'aliment, témoin du taux d'ouverture du système, le but étant qu'il soit le plus bas possible. Le ratio moyen d'aliment consommé chaque jour rapporté aux surface de culture, comme présenté par Rakocy et al (2010) a été relevé, pour pouvoir le comparer à la littérature existante. L'indice de conversion (IC) exprime la quantité d'aliment à distribuer (en kilogrammes) pour avoir la production d'un kilogramme de poisson. De manière générale, plus cet indice est bas, plus les performances zootechniques des poissons sont bonnes.

b) Suivi physico-chimique hydraulique, aquatique et végétal

Au début du bilan de masse, le 15/01/2019 (T_0) :

- Vidange et renouvellement du cône de décantation avec de l'eau du système.
- Evaluation de la biomasse piscicole en charge. La biomasse végétale des jeunes plants à T_0 a été considérée comme négligeable.

- Evaluation des volumes de tous les fluides présents (compartiment piscicole, horticole)
- Analyses NPK de ces fluides ainsi que de l'eau neuve.

Durant le bilan de masse (T_{inter}) :

- Pesée systématique des extrants du système (végétaux, poissons).
- Suivi des paramètres physico-chimiques de l'eau : 1) relevés quotidiens de pH, température, concentration en oxygène, conductivité, potentiel d'oxydo-réduction dans le compartiment piscicole le plus chargé et en amont et aval d'un raft ; 2) relevés hebdomadaires des concentrations en macro et micro-nutriments dans les compartiment piscicoles et horticoles .

A la fin du bilan de masse, le 6/03/2019 (T_{final}) :

- Evaluation des biomasses piscicole et végétale créées comme extrants du bilan.
- Evaluation de l'apport et de la sortie d'eau neuve dans le système.
- Evaluation des volumes des fluides et concentrations NPK (eau de la fosse piscicole, eau de la fosse horticole, cône décantation, lixiviats du sac de boues) et boues.
- Envoi d'échantillons des biomasses fraîches aux laboratoires Eurofins pour la composition en azote total, azote Kjeldahl, N-NO_3, N-NH_4, N-NO_2, P-PO_4 et K total.

Les éléments NH_4, NO_2, NO_3, PO_4, K, Fe, Mg et autres macro et microéléments présents dans l'eau ont été mesurés par les laboratoires Eurofins aux T_0, T_{inter} (le 18/02/2019) et T_{final}.

C. Résultats

- **Compartiment piscicole**

Durant le bilan de masse, 135.60 kg d'aliment ont été distribués. La biomasse finale s'élevait à 307.77 kg, le gain étant ainsi de 167.41 kg. L'IC durant le bilan de masse pour les truites s'est élevé à 0.81. Le taux de mortalité a été de 0.797%.

- **Suivi physico-chimique de l'eau**

La température a été comprise durant l'expérimentation entre 12.5 et 16.6°C. Un apport d'eau moyen de 0.9 m^3/j a été réalisé, et le pH a oscillé entre 7.2 et 8.1. La conductivité (Figure 5) témoigne de la concentration globale en nutriments dans l'eau. Celle de la fosse piscicole, initialement à 776 µS/cm, a suivi une croissance jusqu'à atteindre la valeur de 883 µS/cm le 11 février, et est restée stable ensuite. La conductivité de la fosse horticole a oscillé autour de 810 µS/cm jusqu'au 18 Février. Elle a alors atteint 875 µS/cm du fait d'un ajout de 0.8 kg de sulfate de potasse (K_2SO_4) afin de compenser les carences en potassium sans augmenter le pH, puis a régressé avant de se stabiliser autour de 830 µS/cm.

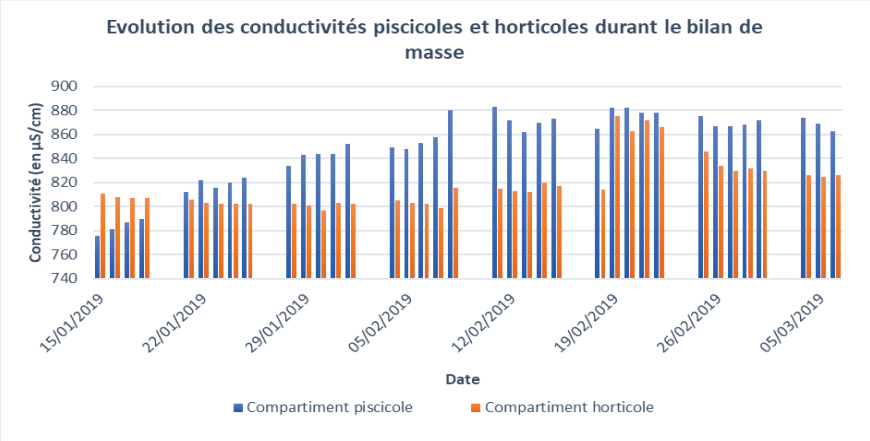


Figure 5 : Evolution des conductivités piscicole et horticole durant le bilan de masse 2019

- **Capacité phytoépuratoire**

L'abattement de l'azote et du phosphore entre les deux compartiements a été assez marqué et peut être mis en valeur sur la figure 6.

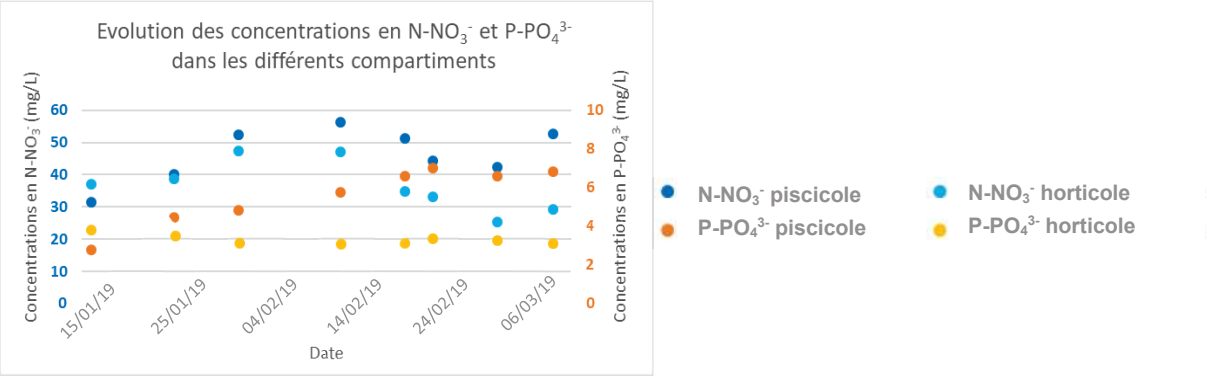


Figure 6 : Evolution des concentrations en azote ($N\text{-}NO_3^-$) et phosphore ($P\text{-}PO_4^{3-}$) dans les compartiments durant le bilan de masse 2019

La feuille de chêne et les épinards ont présenté les meilleures capacités d'exportations pour une même surface de culture (Tableau 2). Les résultats des mâches restaient faibles car les pieds n'ont pas correctement supporté l'humidité relative ambiante pouvant atteindre 85%.

Tableau 2 : Quantité d'éléments exportés du système par phytoépuration

Quantité exportée (g) / Elément exporté	Iceberg	Feuille de chêne	Epinards	Mâches	TOTAL
N	270,12	308,94	295,71	82,94	**957,71**
P	22,72	39,78	52,20	9,11	**123,80**
K	285,69	377,19	303,24	62,93	**1029,04**

La biomasse végétale a permis d'exporter 9.19% de l'azote total, 8.33% du phosphore et 46.40% du potassium (Figure 7). La biomasse animale ainsi que les boues, sédiments et lixiviats des boues piscicoles ont exporté un tiers du potassium, plus de la moitié de l'azote et deux tiers du phosphore. Une grande partie de ce dernier s'est retrouvée dans les boues piscicoles (37.99% du phosphore exporté).

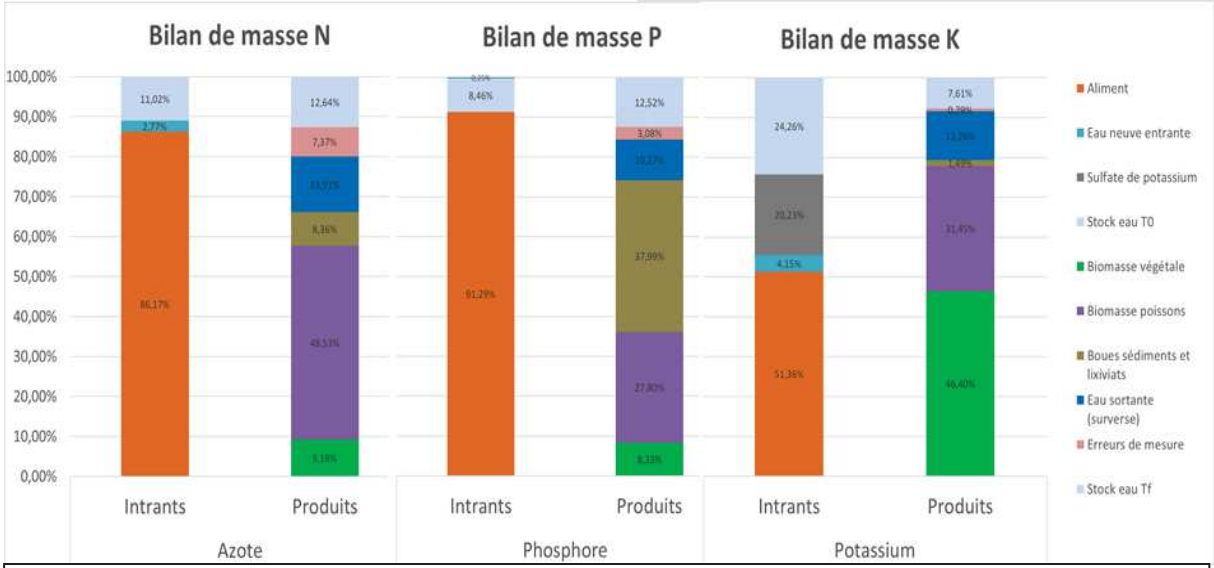


Figure 7 : Bilans de masse 2019 des éléments N, P et K du système aquaponique expérimental

D. Analyse et discussion

- Physico-chimie de l'eau

La conductivité dans la fosse piscicole était basse au début du bilan de masse du fait de l'absence de poissons dans le système durant le mois de Décembre. Le compartiment horticole a présenté une certaine inertie étant donné la surverse depuis la fosse piscicole et la consommation de NPK par les plantes. Le fait que l'on n'ait pas observé une nette baisse de conductivité au cours du temps montre que le compartiment végétal était légèrement sous dimensionné : une baisse de la conductivité traduirait une baisse du taux de nutriment (notamment des nitrates). Ainsi, l'apport en aliment piscicole (et donc l'entrée de nutriments dans le système) pouvait être encore réduit sans risquer un manque important dans le compartiment horticole.

- Capacité phytoépuratoire

Les pertes de la figure 7 ont permis d'équilibrer le bilan de masse et correspondaient à des erreurs d'évaluation des biomasses (végétales ou piscicoles) ou de volumes des fluides, mais aussi d'évaluation des concentrations en éléments dans les compartiments. L'azote étant un élément volatile, il subit un phénomène naturel de dénitrification ou de volatilisation de sa fraction gazeuse. Des pertes de 5 à 20% sont considérées comme normales. Le phosphore et le potassium ne subissant pas ce phénomène (éléments dits "conservatifs"), on tolère en général jusqu'à 5% de pertes pour juger la qualité et de fiabilité d'un bilan de matières, ce qui a été le cas dans la présente étude (Pierre Foucard, communication personnelle basée sur l'expérience en termes de bilans de masse de l'INRA UMR SAS).

En excluant la quantité d'éléments présents dans la biomasse des poissons et dans les boues piscicoles, sédiments et lixiviats, il a été possible de se placer dans le cas d'un élevage piscicole tentant de diminuer la quantité d'effluents rejetés. En effet, dans le cadre d'un système d'élevage piscicole en circuit recirculé, il y aurait eu quoi qu'il advienne assimilation d'une part des éléments N, P et K par les poissons, ou leur évacuation par le biais des boues piscicoles selon les performances zootechniques (digestibilité de l'aliment, taux d'aliment non consommé, …). Les performances de phytoépuration des nutriments par les plantes devaient donc être évaluées en proportion des nutriments qui se retrouvaient dans la fraction solubilisée : l'eau du système et les rejets. Les proportions d'éléments extraits par phytoépuration des eaux de rejets du pilote expérimental ont été les suivantes :

- Pour l'azote (Avec N_{phyto} la portion d'azote extraite par phytoépuration) :
  $N_{phyto} = N_{Biomasse\ végétale} / (N_{Biomasse\ végétale} + N_{eau\ sortante} + N_{stock\ d'eau} + \text{Erreurs de mesure})$
  $N_{phyto} = 9.19 / (9.19+13.91+12.64+7.37)$
  $N_{phyto} = 21.32\%$
- De même, 24.36% du phosphore des eaux de rejets ont été extraits par phytoépuration.

On peut ainsi en déduire les avantages phyto épuratoires d'une seule culture, par exemple pour la laitue feuille-de-chêne : il faudrait respectivement 290.7 m² et 255.4 m² de surface de culture de laitue « feuille de chêne » pour un abattement complet de l'azote et du phosphore, avec un même volume d'élevage.

- Pour le potassium : 67,69% de cet élément présent dans les eaux de rejets ont été extraits par phytoépuration.

Il faudrait 80.7 m² de laitue « feuille de chêne » pour un abattement complet du potassium, ce qui correspondait à la surface végétale utilisée dans le cadre de l'étude (sachant qu'il y a eu un apport de K_2S0_4 pendant l'étude qui constituait 20% des intrants en potassium). Le potassium a donc ici été un élément limitant dans ce système.

Un précédent bilan de masse a montré que les éléments Mg, Ca et S n'étaient aucunement limitants pour la croissance végétale. Par ailleurs, ils ne sont pas préoccupants environnementalement pour les milieux aquatiques. Pour ces deux raisons, on n'en fait plus le bilan. Il était également à noter que les microéléments étaient présents en quantités infimes, très variables selon la qualité de l'eau de renouvellement. Le fer a été limitant systématiquement et doit être apporté en supplément. D'autres microéléments peuvent souvent être sources de carences nuisant à la croissance végétale, il a donc été fait le choix d'apporter en routine un mélange de microéléments (fer, cuivre, bore, zinc, molybdène, manganèse...) en visant des concentrations similaires à l'hydroponie.

- Ratio alimentaire

La quantité d'aliment apportée durant le bilan de masse étant de 135.60 kilogrammes au total, pour une surface de 83 m², le ratio moyen d'aliment consommé était de 31.42g/m²/j. Ce résultat était bien inférieur à celui décrit par Rakocy et al (2010) qui rapportaient un ratio de 60 g/m²/j pour les aromatiques et légumes-feuilles, à 100g/m²/j pour les plantes aux besoins supérieurs (tomates, poivrons). Il en était de même pour Somerville et al (2014) qui rapportaient un ratio pour les légumes-feuilles entre 40 et 50 g/m²/jour, et un ratio nécessaire pour les légumes-fruits de 50 à 80 g/m²/j. Le ratio obtenu était donc satisfaisant et concordait avec des objectifs d'augmentation de la fermeture du système.

E. Conclusion du bilan de masse

Le bilan de masse a permis de mettre en valeur la capacité phytoépuratoire des plantes présentes dans le système et de chiffrer cette capacité. Une phytoépuration plus complète des éléments azotés et phosphorés était envisageable. Le potassium a quant à lui été un élément limitant en aquaponie. Il serait pertinent d'aller vers un scénario d'apport complémentaire de potassium pour pouvoir diminuer la ration aliment/surface. La valeur de 31.42 g/m²/j a été atteinte durant ce bilan de masse. Or, les résultats sur la conductivité et les concentrations en nutriments dans les compartiments ont démontré que cet apport pouvait encore être réduit. Le chiffre de 25 g/m²/jour d'aliment semblait être un optimum envisageable. Il serait ainsi possible d'améliorer le bilan phytoépuratoire d'azote et de phosphore en augmentant les surfaces végétales pour un même volume d'élevage. L'hypothèse 1 a donc pu être validée : «Le bilan du rejet d'effluents azotés et phosphorés de la partie RAS du système aquaponique est amélioré du fait de la capacité phytoépuratoire du compartiment végétal».

Le bilan de masse est une approche intéressante et détaillée, mais très spécifique. La variété végétale cultivée peut fortement affecter la capacité épuratoire du système pour une surface de production donnée. Le modèle mis en place, truites/laitues/épinards, était trop restrictif. Il y a donc nécessité de multiplier les couples poissons/plantes pour anticiper l'impact sur les bilans de masse azoté et phosphoré.

III. Etude de la qualité nutritionnelle et sensorielle de tomates aquaponiques

Afin d'obtenir des données d'abattement de nombreuses autres espèces végétales, une approche différente de celle du bilan de masse était à mettre en place, celui-ci étant trop spécifique. Etudier une large palette végétale, légumes aux besoins plus complexes inclus, afin de recueillir des informations similaires obtenues pour les salades et épinards lors du bilan de masse permettrait de recueillir des données de dimensionnement adaptées à plusieurs espèces végétales. L'objectif était donc 1) d'obtenir des données d'abattement en azote, phosphore et potassium des plantes (en grammes par mètre carré et par jour) par le biais d'analyses de concentration dans les tissus végétaux, afin de mesurer leur potentiel phytoépuratoire, mais aussi d'observer la dynamique d'abattement entre les compartiments piscicole et végétal, 2) de tester la ration « optimum » aliment-plantes (25 g/m²/jour en moyenne) obtenue suite au bilan de masse, dans un contexte de polyculture. Ainsi, cette expérimentation devait permettre d'infirmer ou de confirmer notre seconde hypothèse : «Les nutriments issus du RAS peuvent suffire pour cultiver des plantes à fruits comme les tomates, avec une qualité nutritionnelle du produit final comparable à des modes de culture conventionnels».

A. Matériel et méthodes

1. Dispositif expérimental

L'expérience s'est déroulée dans la station horticole RATHO sous une serre en verre à simple paroi, avec gestion des paramètres climatiques. Les volets de la serre avaient pour consigne de s'ouvrir si la température de l'air dans la serre dépassait 20°C (volets à l'abri du vent) ou 24°C (volets exposés au vent). Les écrans d'ombrage se fermaient pour un rayonnement supérieur à 650 W/m² ou une température nocturne inférieure à 12°C.

2. Compartiment piscicole

a) Description de l'espèce

Les poissons fournis par la société Lucas Perches étaient des perches communes (Figure 8) aussi dénommées perches européennes (*Perca fluviatilis*), très proches de leur homologue américaine la perchaude (*Perca flavescens*). La perche commune est un poisson d'eau douce carnivore au dos vert olive avec des rayures sur les flancs et aux nageoires ventrales oranges (www.fao.org/fishery/en). Les individus sont appréciés pour la pêche et pour leur chair de qualité (Hinshaw 2006) en Europe, tout particulièrement en Suisse (20 minutes, 2019). Il s'agit d'une espèce sauvage, domestiquée depuis peu. C'est pourquoi le secteur piscicole a encore peu d'informations à son sujet, et que plusieurs publications sur la perche se contredisent (Niebur et al, 2015). Leurs besoins se rapprochent des truites et autres salmonidés concernant la composition de leur nourriture, notamment en termes de protéines (40-45%). Ils sont tout de même plus faibles en termes de lipides (10-12% contre 16-22% pour les truites). Toutefois, étant donné qu'il n'existe pas encore sur le marché d'aliment spécifique pour la perche, un aliment truite a été utilisé. Les individus, au nombre de 1 687, présentaient un poids moyen de 37 grammes chacun. La biomasse totale initiale s'élevait à 62.42 kg. Elles ont été introduites dans le système le lundi 15 Avril.

Figure 8 : Photographie d'une perche commune. 21/06/2019. Lucile Delorme

b) Conduite d'élevage

Hinshaw (2006) fournit une table hypothétique sur les paramètres d'élevages critiques pour la perchaude (Tableau 3), sur laquelle l'expérimentation s'est appuyée. Il indique que la perche, sensible aux grandes variations de température, aurait une température physiologique optimale comprise entre 22°C et 24°C, information concordante avec Tidwell et al (1999). Une température plus élevée engendrerait un stress plus important, et une température plus basse un indice de conversion moins intéressant. Une table de rationnement a été fournie par l'éleveur (Tableau 4). Il n'existait pas de table officielle pour *Perca fluviatilis*, mais Tamazouzt (Tamazouzt, 1995) décrit un taux de rationnement pour *Perca fluviatilis* autour de 2%, confirmant la table de rationnement en notre possession. Il parlait aussi d'un possible rejet de l'aliment inerte de la part de perches élevées en circuit clos, problème ici restreint étant donné leur caractère domestiqué depuis 6 générations. Les perches ont toutefois été nourries à la main afin d'ajuster leur ration en fonction de leur appétit (approche de nourrissage « ad libitum »). Une suralimentation entraînerait un gaspillage des ressources - et donc des conséquences économiques- et une pollution de l'eau. Une sous-alimentation offrirait une moins bonne croissance qu'espérée des individus et une augmentation du risque de cannibalisme. Les rations étaient composées d'aliment extrudé F3 ou F4, respectivement de diamètres 3 et 4mm, fournit par Le Gouessant. L'aliment B-Nature grower (F4) contenait de la farine de poissons, du blé biologique, du tourteau de soja, de l'huile de poissons, de l'huile de soja biologique, des pois et de l'amidon de pois biologiques. Cet aliment formulé pour de la truite, à défaut d'avoir un aliment développé spécifiquement pour la perche, présentait un taux de lipides relativement faible (16%) et était toutefois un bon compromis pour la perche, tandis que le taux de protéines (40%) s'approchait des besoins des perches.

Tableau 3 : Paramètres d'élevage critiques supposés de la perchaude (Hinshaw, 2006)

Paramètre	Niveau critique (mg/L ou ppm, sauf pour le pH)
DO	3,5 – saturation
CO2	<0,5
Dureté	50 - 400
pH	6,5 – 9,0
Calcium	10 – 160
Phosphore	0,01 – 3,0
Sulfure d'hydrogène	0
Ammonium	<0,0125
Nitrite	<1,0

c) Acquisition de données zootechniques

i. Courbe de croissance et indice de conversion

Un poids moyen pour chaque bassin était réalisé toutes les deux semaines afin d'ajuster la ration journalière et de suivre la croissance des individus. Pour cela, un lot d'une centaine d'individus était échantillonné et pesé à l'aide d'une bassine. Ces mesures permettaient aussi de connaître l'indice de conversion des poissons, décrit selon la formule :

$$IC\ (sans\ unité) = \frac{Aliment\ distribué\ (kg)}{Biomasse\ gagnée\ (kg)}$$

Un tri de la population entière était réalisé en cas d'une grande différence aperçue concernant la taille des différents individus lors du poids moyen. Un panel de 200 individus était alors prélevé. Les perches étaient placées dans un récipient extérieur et mises en contact avec une dose de 70 mg/L d'anesthésiant MS222 Tricaïne Mesylate à 1000 mg/g. Les poissons endormis étaient pesés, mesurés puis relâchés. La courbe du poids en fonction de la taille des individus permettait de les répartir en plusieurs gammes de poids moyen en indiquant la valeur seuil de la longueur de poisson pour chaque classe définie. Les poissons étaient ensuite mesurés un par un et relâchés dans le bac d'élevage correspondant. En cas de manipulation les poissons n'étaient pas nourris la veille afin de limiter le stress engendré lors du processus. Les individus morts étaient retirés tous les jours, et les individus manquant lors des décomptes étaient attribués au cannibalisme.

ii. Construction d'une table de rationnement élargie

La table de rationnement fournie par l'éleveur (tableau 4) n'allant pas au-delà des 22°C, et étant donné la chaleur importante que l'on peut avoir sous serre, les besoins des perches ont été évalués par tâtonnement en procédant à une alimentation "ad libitum" (à satiété), et ce dans le but d'aboutir à une table de rationnement élargie pour des gammes de poids supérieures à 100-120g et pour des températures supérieures à 22°C. L'ajustement des rations en fonction de l'appétit des poissons devait permettre de compléter cette table.

Tableau 4 : Table de rationnement pour Perca fluviatilis fournie par l'éleveur

Type d'aliment	Granulométrie	Poids du poisson	18°C	20°C	22°C
AL3	1.2	<3 g	3.1%	3.3%	3.5%
F1	1.7	<15 g	2.6%	2.8%	3.0%
F2	2.5	<30 g	2.2%	2.3%	2.5%
F3	3.2	<60 g	1.8%	2.0%	2.2%
F4	4	<120 g	1.2%	1.3%	1.5%

3. Compartiment végétal

a) Culture de tomates en aquaponie en goutte-à-goutte

La culture de salades/épinards réalisée précédemment ainsi que l'expérience acquise sur une large gamme de végétaux a démontré la capacité de légumes-feuille à phyto-épurer les eaux du système. La faisabilité de la culture de légumes fruits en aquaponie était cependant moins certaine étant donné leurs besoins importants en phosphore et potassium. Peu de littérature scientifique portait sur des plantes autres que les laitues et le basilic il a été décidé de s'intéresser à la culture de tomate. En effet, il s'agit du deuxième légume le plus consommé au niveau mondial après la pomme de terre (fao.org/faostat), et elle pourrait apporter une valeur ajoutée intéressante en ciblant un marché de proximité et des variétés rares ou anciennes. La mise en place d'une technique innovante de culture de tomates en goutte-à-goutte permettait de vérifier la faisabilité de cette culture en aquaponie et de connaitre la capacité phytoépuratoire du légumes-fruits.

i. Principe de la méthode utilisée

Les plants ont été disposés dans des pots hollandais « Bato » (ou Dutch pot) d'une contenance de 16 litres, visibles en figure 9. Le substrat utilisé était de la perlite, substrat horticole inerte et inorganique utilisé en hydroponie (Jones, 2014). Les fonds des pots ont été tapissés de billes d'argiles afin d'éviter toute obstruction de leur évacuation, et remplis de perlite jusqu'à 2cm sous le niveau du bord.

ii. Modalités de cultures testées

Les plants ont été fournis par la SERAIL (Station d'Expérimentation Rhône-Alpes Information Légumes), station maraîchère à proximité directe du RATHO. Les variétés exploitées étaient Cobra et Estiva. Les plants étaient alignés sur une ligne orientée Nord-Sud dans la serre du système aquaponique. Chaque plant était dans un Dutch pot, les pieds étaient espacés de 50 cm chacun. La densité de culture était donc de 3.5 plants/m² en admettant qu'une seconde ligne de culture serait espacée d'au moins 1m pour des raisons de récolte et de compétition de la lumière. L'arrivée de l'eau se faisait via des tuyaux souples de diamètre 20 et l'évacuation via un tuyaux PVC de 50. Les plants ont été installés le 16 Avril.

- **Témoin hydroponie**

Le témoin hydroponie était composé d'un triplicat de plants de la variété Cobra irrigués par des goutteurs de 2L/h, et fertilisés par une solution de type 12-6-29+7CaO+TE fournie par l'entreprise ICL Specialty Fertilizer. La solution fille souhaitée, afin de répondre aux besoins des plants, devait avoir pour concentrations 200 mg/L d'azote, 50 mg/L de phosphore, 300 mg/L de potassium, 45 mg/L de magnésium (Jones, 2014). Ainsi pour 100 litres de solution étaient ajoutés 90g du fertilisant ICL, 47g de sulfate de magnésie, 10g de phosphate mono ammonium, 20g de sulfate de potasse et 1mL d'acide nitrique. Une pompe reliée à un minuteur envoyait la solution fille dans le système à raison de 5 minutes d'irrigation toutes les trente minutes, entre 8h et 20h au début de l'expérimentation, puis 6h et 21h une fois l'été installé (lever astral du soleil). Les eaux de drainage n'étaient pas réutilisées, la solution était renouvelée en cas de besoins.

Figure 9 : Photographie de l'installation des tomates en aquaponie en irrigation goutte-à-goutte avec perlite et pots hollandais. RATHO. 17/04/2019. Lucile Delorme

- **Modalité aquaponie**

Les 22 autres pots étaient reliés au système aquaponique. Une pompe munie d'un filtre et d'un ajusteur de pression (pressostat) injectait de l'eau du bassin raft le plus proche (Raft 1) dans un tuyau souple à raison de 5 minutes d'irrigation toutes les trente minutes, comme mentionné précédemment. Deux pots contenaient une variété différente, la variété Estiva, irrigués à hauteur de 2L/h, afin d'observer sa réaction quant à ce protocole. Les 20 pots restants accueillaient des plants de la variété Cobra (figure 9). La littérature scientifique démontre qu'une augmentation du débit passant au niveau des racines génèrerait une augmentation du rendement des plants de tomate (Khater et al, 2015). Ainsi, deux modalités ont été mises en place : un plant sur deux était irrigué à hauteur de 2L/h à l'image de la modalité témoin hydroponie, et un plant sur deux à hauteur de 4L/h.

Figure 10 : Photographie de l'installation des tomates en plein sol à la SERAIL. 16/04/2019. Lucile Delorme

- **Témoin sol**

Le témoin sol était dans le centre voisin, la SERAIL, fournisseur des différents plants. Quatre plants de type Cobra sous serre plastique non chauffée ont été suivis en parallèle (Figure 10). L'arrosage se faisait à l'eau claire à raison de 5 à 15mm selon le stade du plant, 5.71L/m²/h environ. Un apport de fond initial de 300U de chaux, 180U de potasse, 100U d'ammonitrate pour fertiliser le sol et répondre aux besoins des tomates a été réalisé.

iii. Irrigation

Des programmateurs permettaient une irrigation de 5 minutes toutes les 30 minutes entre 8h et 20h puis 6h et 21h chaque jour (Schmautz et al, 2016, avec appui des experts du RATHO). Le substrat de chaque pot était piqué de 2 ou 4 goutteurs d'1L/h selon la modalité.

Ce régime d'irrigation était une valeur adaptée au hors sol sur ce type de substrat, offrant un apport suffisant tout en évitant un drainage et une consommation en eau trop importants. Pour chaque modalité, un seau de drainage a été positionné afin de vérifier le volume et la conductivité de l'eau sortant des pots, mais aussi de l'eau sortant des goutteurs, et ainsi ajuster les régimes d'irrigation.

iv. Protocole de récolte

Les tomates étaient récoltées avant d'atteindre un stade de maturité maximal, quatre jours avant les analyses sensorielles, en vue d'assurer un niveau de maturité optimal le jour des dégustations. La biomasse totale récoltée était relevée pour chaque plant de chaque modalité. Les fruits ont été classés selon leur caractère commercialisable ou non : fruit abîmé, malade ou de diamètre inférieur à 47mm.

v. Paramètres étudiés

- Etablissement de profils sensoriels de la tomate

Trois profils sensoriels ont été réalisés par un panel d'experts du CTIFL (Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes), un pour chaque modalités (hors-sol hydroponie, hors-sol aquaponie, sol). Les profils sensoriels ont été réalisés avec un panel entraîné à l'évaluation de 12 critères de description spécifiquement sur la tomate (aspect, texture, saveur et arôme, présentés tableau 5), dans le laboratoire d'analyse sensorielle du centre de Balandran qui répond à la norme Afnor V09-105.

Tableau 5 : Critères de description de la tomate

	Descripteurs	Echelle
Aspect	Couleur	0 - 10
	Taille	0 - 10
	Caractère côtelé	0 - 10
	Fermeté à la coupe	0 - 10
Texture	Croquant	0 - 10
	Juteux	0 - 10
	Ferme	0 - 10
	Fondant	0 - 10
	Farineux	0 - 10
	Persistance du croquant	0-1
	Epaisseur de la peau	0-1
	Persistance de la peau	0-1
Saveur	Sucré	0 - 10
	Acidité	0 - 10
Arôme	Arôme global	0 - 10

- Analyse des composés d'intérêt nutritionnels des trois lots de tomates

8 types d'analyses ont été effectuées :
- Teneur en matière sèche
- Indice réfractométrique
- Acidité titrable
- Dosage des sucres (saccharose, glucose, fructose) par HPLC
- Dosage des acides organiques par HPLC (acide malique, citrique)
- Dosage de la vitamine C (acide ascorbique et déshydroascorbique) par HPLC
- Dosage des principaux caroténoïdes (lycopène, bêta-carotène, lutéine, …) par HPLC
- Dosage des principaux composés polyphénoliques (acides phénoliques, flavonoïdes) par UPLC

Afin de pouvoir traiter les résultats statistiquement, il était nécessaire d'effectuer pour chaque analyse au moins 3 répétitions d'analyses. Chaque modalité testée devait comporter en tout au moins 50 fruits.

- Analyse physico chimique des plants

Afin de pouvoir réaliser un bilan complet de l'extraction de NPK des plants de tomates du système aquaponique, des échantillons d'au moins 300g des fruits et des parties végétatives étaient congelés pour être analysés par un prestataire externe (laboratoire Eurofins, certifié COFRAC) et connaître leur composition en azote, phosphore et potassium en g/100g. Des

récoltes régulières étaient réalisées au fur et à mesure, en fonction de la maturité des plants. La biomasse récoltée était pesée et échantillonnée.

4. Physico-chimie de l'eau dans les compartiments

L'intégralité des paramètres de suivi physico-chimique ont été notés dans un document de suivi du système en ligne qui recense toutes les données physico-chimiques, végétales et piscicoles depuis le lancement du système en 2015. Tous les matins était effectué un relevé du pH, de la température, de la conductivité, la concentration en oxygène et le potentiel Redox de l'eau à l'aide de sondes portatives. Ces mesures étaient effectuées dans un bac d'élevage piscicole, en amont et en aval d'un des deux rafts. Chaque semaine un suivi des nutriments présents dans les différents compartiments était réalisé. Les tests étaient à base de réactifs dans des microtubes, lisibles au spectrophotomètre de la marque HACH Lange ou MACHEREY-NAGEL. Les tests réalisés concernaient :

- Le $N\text{-}NH_4$, $N\text{-}NO_2$, $N\text{-}NO_3$, $P\text{-}PO_4$, K^+ pour la partie piscicole
- $N\text{-}NO_3$, $P\text{-}PO_4$, K^+ et Fe pour la partie horticole

Les analyses initiales (T_0), intermédiaires (T_{inter}) et finales (T_{final}) de l'eau du système et du réseau étaient réalisées par les laboratoires Eurofins et portaient sur l'ensemble des macro et micro éléments contenus dans l'eau :azote global, azote kjeldahl, azote ammoniacal, azote nitreux, azote nitrique, phosphore total, orthophosphates, potassium, magnésium, calcium, sulfates, fer, bore, zinc, manganèse, molybdène, cuivre. Un mélange d'éléments traces de la marque ICL- Micromax WS apportait les oligoéléments supplémentaires nécessaires au bon fonctionnement du système : Bore, Cuivre, Fer, Manganèse, Molybdène et Zinc. Un ajout tous les dix jours à hauteur de 660g ($33g/m^3$) était réalisé en préventif dans la partie végétale du fait de l'observation de carences dans les expérimentations précédentes, notamment en fer et en bore. Ces apports ne constituaient pas une limite en termes de coût de production et semblaient indispensables en aquaponie commerciale si l'on souhaite optimiser le rendement.

B. Résultats

1. Physico-chimie

La physico-chimie du compartiment végétal après le 26 Juillet n'a pas été considérée pour l'expérimentation du fait de la perte de la pompe alimentant les rafts. Pour des raisons d'analyses, les résultats ont été comptabilisés jusqu'au premier Août.

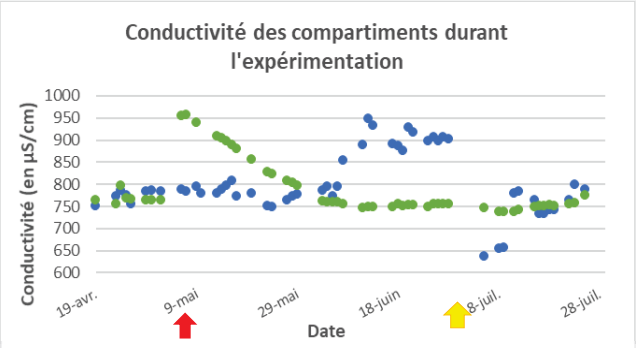


Figure 11 : Conductivité dans les différents compartiments durant l'expérimentation

Durant l'expérimentation le pH du compartiment aquacole a varié de 5.7 à 7.5. Un ajout de 1 kg de bicarbonate de potassium a été effectué les 7 et 12 Juin, les 9 et 23 Juillet afin de rétablir le niveau de pH qui était passé en-dessous de 6.2. L'oxygène a varié entre 6.0 et 8.5 mg/L. Concernant la conductivité, celle-ci s'est stabilisée autour de 900 µS/cm en semaine 24. La chute observée le 28/06 figure 11 a été due à la canicule et des hausses de température exceptionnelles dans la serre et par conséquent dans l'eau d'élevage, jusqu'à un stade

difficilement tenable pour le cheptel de perches. Face à ce problème, il a été décidé d'augmenter temporairement le taux d'ouverture du circuit piscicole, résultant ainsi en une dilution partielle des éléments et une légère baisse des concentrations en éléments NPK.

Le pH du compartiment horticole est resté stable entre 7.7 et 8.2. L'oxygène a varié entre 5.5 et 7.4, chutant à 1.7 lors de l'arrêt de la pompe horticole. Le 6 Mai, un ajout NPK a été réalisé dans la fosse de reprise horticole du fait des concentrations excessivement faibles de ces éléments. En effet, le système avait été vidangé quelques jours seulement avant l'arrivée des perches en raison de l'apparition d'un virus sur l'espèce précédemment intégrée dans le système et qui auraient dû initialement être support de l'étude, à savoir des carpes amour. Ces ajouts se sont appuyés sur les expérimentations précédentes en estimant la valeur que l'on aurait dû relever si le système fonctionnait correctement et s'il n'y avait pas eu une absence prolongée de poissons.

La figure 12 présente les résultats de l'évolution des concentrations en éléments azote, phosphore et potassium dans les compartiments piscicole et végétal.

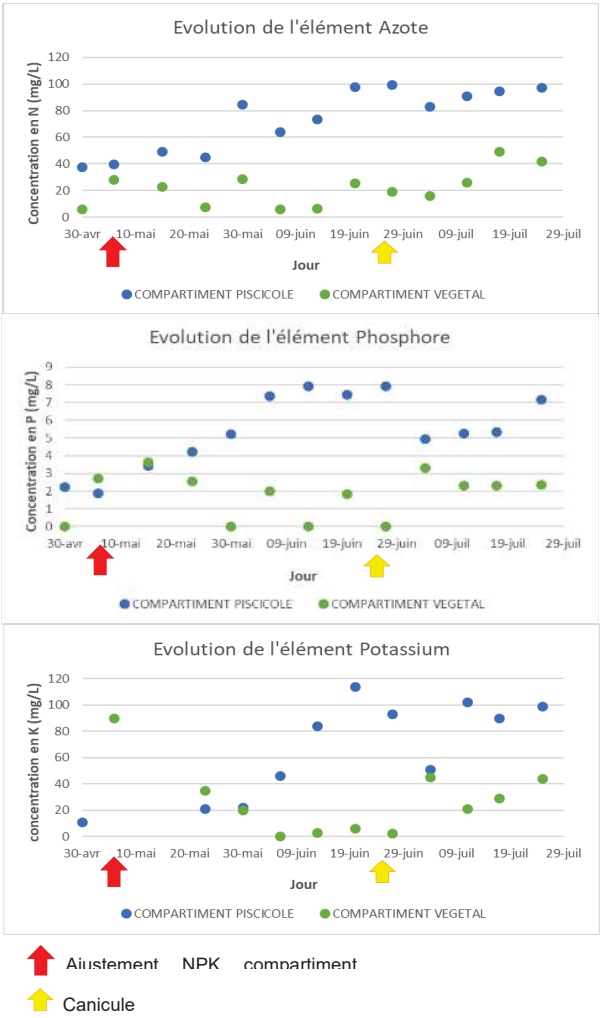
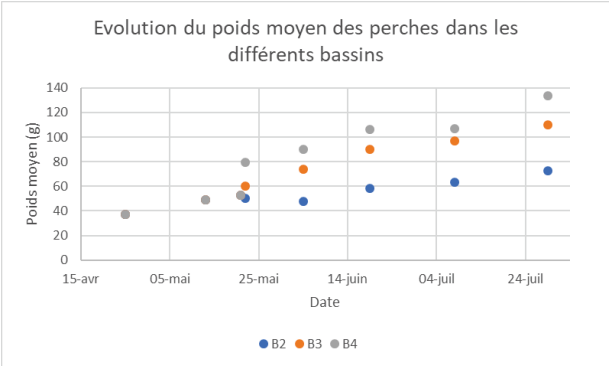


Figure 12 : Graphiques des évolutions de concentrations en NPK dans les compartiments

2. Résultats zootechniques

Les poissons ont été nourris avec de l'aliment F3 jusqu'à un poids de 60g, puis un aliment F4. Le taux de mortalité au 1° août était de 32.72%. La canicule de la fin du mois de Juin 2019 a entraîné une forte montée en température dans le compartiment piscicole, l'eau y atteignant 30.1°C le vendredi 28 Juin, entraînant la mortalité de 30.07% du cheptel dans le week-end. La canicule de Juillet n'a pas entraîné une telle mortalité alors que la température de l'eau a atteint une valeur identique. Le gain de biomasse avant le 28/06 était de 65.74 kg. L'indice de conversion (Figure 13) a été en moyenne de 1.97. La valeur du 4/06 du bassin 2, probablement due à un mauvais échantillonnage, mise à part, l'IC global était de 1.65.



	IC		
Date	**B2**	**B3**	**B4**
13 mai 2019	0,81	/	/
21 mai 2019	1,99	/	/
04 juin 2019	5,15	1,29	1,43
19 juin 2019	1,53	1,48	1,51
29 juillet 2019	1,70	3,28	1,48

Figure 13 : Poids moyen et indice de conversion des perches

3. Résultats de l'expérimentation sur les tomates

a) Phytoépuration et rendements des différentes modalités de tomates

La biomasse végétale moyenne à T_{final} était respectivement de 812g, 1132g et 2217g pour les plants en Aquaponie 2L/h, 4L/h et Hydroponie. Les tissus végétaux des modalités Aquaponie 2L/h comprenaient plus d'éléments NPK que la modalité 4L/h (Tableau 6), et ont exporté plus d'azote et moins de phosphore par unité de temps et de surface que la modalité 4L/h. Les tomates de cette dernière étaient moins chargées en éléments que la modalité 2L/h.

Tableau 6 : Bilan de phytoépuration des tomates pour les parties végétales et les fruits

		Composition en éléments de la biomasse fraîche			Extraction (g/m²/j)		
		Azote (g/kg)	Phosphore (mg/kg)	Potassium (mg/kg)	N	P	K
Aquaponie 2L/h	Végé.	2.4	480	5300	0.04	0.01	0.09
	Fruits	0	210	1700	0.00	0.04	0.34
Aquaponie 4L/h	Végé.	3.4	330	3400	0.08	0.01	0.08
	Fruits	0	190	1600	0.00	0.05	0.39

Les rendements des fruits les plus importants ont été obtenus en Pleine terre (Tableau 7). Les cultures de hydroponie arrivaient en seconde place. La modalité Aquaponie 4L/h a fourni une biomasse totale et commercialisable plus importante que la modalité 2L/h (Figure 14).

Tableau 7 : Rendements et taux de commercialisation pour les différentes modalités

	Aquaponie 2L/H	Aquaponie 4L/H	Hydroponie	Pleine terre
Rendement commercialisable (g/m²)	3616,60	4975,51	7159,52	8200,36
Rendement total (g/m²)	6245,86	7625,23	12978,67	13717,14
Poids moyen d'un fruit commercialisable (g)	103,75	132,93	167,06	188,20
% commercialisation	47,66%	54,13%	40,90%	58,94%

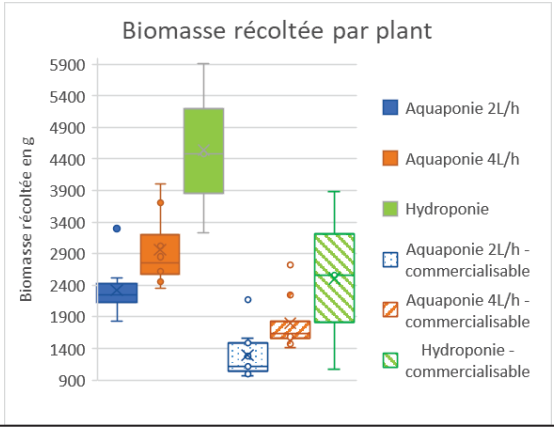


Figure 14 : Biomasses récoltées totales et commercialisables pour les modalités hors-sols

53 % des tomates en hydroponie ont présenté du Blossom-end-rot (BER), aussi dénommé cul-noir, et ce dès la première récolte. Presque aucun fruit récolté n'a été commercialisable en aquaponie durant la deuxième partie de juillet et début août, du fait d'une forme de BER (figure 15). Selon les experts du RATHO, il aurait aussi été possible que les tâches soient dues à la présence d'anthracnose. Cette maladie, due à un champignon de la famille des *Colletotrichums*, forme des tâches caractéristiques qui pourraient coïncider avec celles observées ici (Blancard, 2013a). Les plants en aquaponie présentaient un collet jaune autour du pédoncule.

Figure 15 : Photographie de BER sur les tomates d'hydroponie (à g.) et d'aquaponie (à d.). RATHO. 19/07/2019. Lucile Delorme

b) Qualité organoleptique des lots de tomates

L'échantillon de tomates destinées au CTIFL correspondai à la première récolte le 8 Juillet 2019. Les modalités 2L/h et 4L/h n'ont pas été différenciées par manque de fruits. Un échantillon global Aquaponie a été fournis. Des tomates de la même modalité de culture en pleine terre que les plants étudiés, ramassées par la SERAIL, ont été envoyés. Le profil sensoriel des trois lots de tomates selon leurs notations respectives concernant les critères employés sont présentés figure 16. Les modalités Aquaponie et Pleine terre se sont principalement différenciées. Les profils de la modalité Hydroponie et Pleine terre n'ont pas été significativement différents. La modalité Aquaponie était significativement moins colorée, plus ferme et plus croquante que la modalité Pleine terre. Selon le CTIFL, la présence de collet jaune important en Aquaponie était surement en lien avec la perception de la texture ferme. La modalité Aquaponie était plus claire et moins acide qu'en Hydroponie, et a été caractérisée par une peau épaisse. Les modalités Hydroponie et Aquaponie ont été caractérisées avec un arôme goût eau.

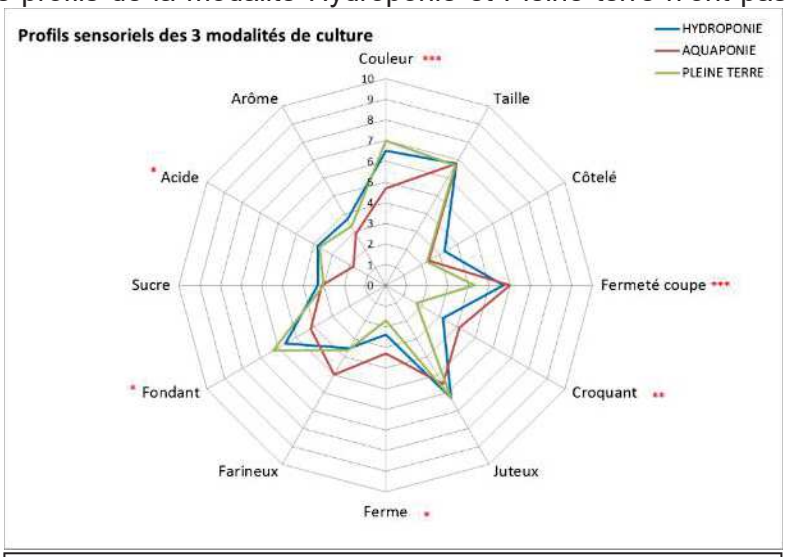


Figure 16 : Profils sensoriels des trois modalités de culture

c) Analyse nutritionnelle des lots de tomates

Les plants de la modalité Hydroponie n'ont pas produit suffisamment de fruits pour être analysés. Les mesures de fermeté ont démontré que les échantillons de la modalité Aquaponie étaient plus ferme que ceux de Pleine terre. Les teneurs en glucose, fructose et sucres totaux étaient environ 18% significativement plus élevées dans les échantillons Aquaponie ($p<0.01$). La valeur d'acidité titrable dans les échantillons Pleine terre était 1.8 fois plus élevée que celle observée dans les échantillons Aquaponie ($p<0.01$), résultats cohérents avec les teneurs en acide citrique significativement plus élevées (+54%) dans les échantillons Pleine terre. La teneur en acide ascorbique, soit 90% de la vitamine C totale, était 50% plus élevée dans les échantillons Aquaponie que dans les échantillons Pleine terre. Les teneurs en lycopène (responsable de la couleur rouge de la tomate), et caroténoïdes de manière générale étaient 2 à 3 fois plus faibles dans les échantillons Aquaponie que Pleine terre, résultats cohérents avec les différences de couleur observées. Il n'y avait aucune différence significative au niveau de la teneur en vitamine E totale. Pour les composés polyphénoliques, les résultats montraient que les teneurs des principaux composés (75 à 80% des polyphénols dans les échantillons)

étaient de 2.2 à 2.7 fois plus élevées dans les échantillons Aquaponie que dans les échantillons Pleine terre.

C. Analyse et discussion

1. Analyse des paramètres du système

Outre l'ouverture du système et l'ajout d'eau, les variations de la conductivité durant l'expérimentation ont traduit une variation de nutriments minéraux dans le temps, et donc un équilibre poisson/plante non optimal.

- Dans le circuit RAS, les taux de NPK, en particulier N et P étant donné l'ajout externe de bicarbonate de potassium, ont augmenté en fin d'expérimentation jusqu'à atteindre un seuil, seuil défini par le taux d'ouverture étant donné qu'en système totalement clos les concentrations devraient effectuer une hausse constante. Or, la dilution de l'eau du système via l'apport d'eau neuve a évacué une certaine quantité de NPK. L'équilibre aurait été atteint si la quantité de NPK ajoutée dans le système égalait la quantité de NPK sortant du système. Plus la concentration de NPK augmenterait dans l'eau, plus la quantité sortant chaque jour serait est importante, jusqu'à atteindre un équilibre entrée/sortie.

- Dans la fosse végétale, une tendance à la baisse des taux de NPK a été observée entre les deux compartiments, comme durant le bilan de masse. Les concentrations, faibles et stables dans le temps, témoignaient de la consommation des nutriments par les plantes. L'équilibre poisson/plante était toutefois incorrect durant Juin, les concentrations du phosphore et du potassium ayant atteint des valeurs nulles et risquant de provoquer des carences. L'équilibre était atteint en fin d'expérimentation. La biomasse présente dans le système variait en fonction des récoltes, mais il était aussi possible que les tomates, aux besoins en phosphore et potassium plus importants, en aient consommé une grande partie.

2. Concernant les perches

A leur arrivée les perches étaient très homogènes en termes de poids et de taille. Suite au tri, les individus ayant le moins grandi ont été placés dans le même bassin, queue de lot présentant une croissance moins intéressante. L'hétérogénéité de performances zootechniques venait de la domestication récente de la perche, et de la sélection génétique encore perfectionnable sur cette espèce piscicole. La perche devait encore être sélectionnée afin de limiter les tris et qu'un cheptel suive une courbe de croissance stable, au même titre que la truite arc en ciel par exemple.

Tableau 8 : Table de rationnement ajustée des perches obtenue pour un nourrissage ad libitum

	<50g	51g-70g	71g-90g	91g-110g	>111g
18 °C	1,21				
19 °C	1,54				
20 °C	1,29				
21 °C	1,60				
22 °C	1,85	1,94	1,72	1,47	
23 °C		2,09	1,81	1,52	
24 °C		2,13	1,67	1,42	
25 °C		2,25	1,96	1,74	1,78
26 °C		2,28	1,87	1,90	1,65
27 °C		2,14		2,01	2,34
28 °C		1,41		1,35	1,66

Les conditions de température élevées n'ont pas permis d'ajuster la table de rationnement de manière précise, car au-dessus de 28°C les poissons n'était pas ou peu nourris afin de limiter la mortalité. Toutefois, la température optimale s'est trouvée autour des 25°C, voir 26°C (Tableau 8) et non 24°C comme le mentionnait la bibliographie.

Avant la forte mortalité due à la première canicule, la biomasse totale des perches était de 120kg. Le ratio moyen atteint était de 25 g/m²/j d'aliment, soit le ratio « idéal » visé suite au bilan de masse. Et ce, sans carences particulièrement relevables mis à part pour les tomates, information décrite par la suite. L'IC s'est situé entre 1.65 et 1.97, et restait plus intéressant quand les perches étaient petites. La truite arc-en-ciel (IC de 0.8) présente de meilleures

performances en circuit recirculé. Mais dans le cas d'un marché de niche, la perche pourrait présenter une valeur ajoutée intéressante et rester compétitive.

3. Conduite de culture des tomates

Les rendements et tailles des fruits observés avec la modalité 4L/h étaient plus intéressants qu'en 2L/h, confirmant les observations dans la littérature scientifique (Khater et al, 2015). La biomasse végétale a suivi la même tendance. De plus, le rapport biomasse végétale / taille du plant a été plus important avec la modalité 4L/h : 5.10 (écart-type de 0.44) contre 3.97 (écart-type de 0.48) pour 2L/h. La phytoépuration journalière des deux modalités était à peu près égale du fait de l'importance de la production en 4L/h. En exploitant les résultats de phytoépuration, il a été possible d'estimer la surface maximale admissible par ces plants sur base du phosphore et de l'azote (le potassium étant dans ce modèle un intrant extérieur). Les calculs pouvaient être basés sur l'équilibre des concentrations atteintes en fin d'expérimentation dans le compartiment piscicole : 100mg/l pour l'azote et 7 mg/L pour le phosphore. Le volume de surverse étant de 0.8m^3/j, il y avait 800g d'azote disponible et 56g de phosphore. Le tableau 9 présente les surfaces maximales possibles en cas de monoculture pour chaque modalité. Le phosphore était ici l'élément limitant, principalement en raison des fruits. Ces résultats doivent toutefois être abordés avec précaution : en cas d'installation des plants dans les rafts, la phyto-extraction serait différente car le débit d'eau au niveau des racines diffèrerait d'un irrigation goutte-à-goutte.

Tableau 9 : Surfaces maximales envisageables en cas de monoculture dans le système

	Surface possible en monoculture (m²)	
	Selon extraction N	Selon extraction P
Tomates Cobra 4L/h	420,75	45,31
Tomates Cobra 2L/h	831,63	48,94

Selon Graber et Junge (2008) les rendements des tomates seraient les mêmes entre les modalités Aquaponie et Pleine terre, et légèrement supérieurs en hydroponie sans que cela soit très significatif. Les plants en aquaponie n'ont pas montré de tels résultats, sans doute du fait de la présence de BER en quantité importante diminuant drastiquement les rendements. Les fruits en aquaponie présentaient des tâches jaunes et fermes aux alentours du pédoncule. Ce collet jaune a pu être provoqué par des températures élevées lors de la fructification ou une carence en potassium (Blancard, 2013b). Ces essais seraient donc à reconduire en ajustant les quantités de potassium et calcium afin d'éviter toute carence. Il serait intéressant d'aller pour une prochaine expérimentation vers des modalités 4 à 8L/h, et deux sous-modalités « avec » ou « sans » enrichissement en potassium et en calcium. Les plus fortes extractions ont eu lieu durant la fructification. L'extraction des éléments n'étant pas constante, il serait intéressant de réaliser un bilan de la phytoextraction au cours du temps, durant la fructification notamment. Il était à noter que la Serail triait ses tomates en fonction d'attributs pour la grande distribution. Les tomates trop petites, bien que tout à fait comestibles, étaient donc exclues. Or, dans un contexte de circuit court et de polyculture, ou encore d'agriculture urbaine, les tomates produites en aquaponie pourraient se vendre sans trop de difficultés malgré leur faible taille. Les tomates en goutte-à-goutte sur perlite en aquaponie avaient donc un potentiel de production qui – une fois l'itinéraire technique corrigé – pourrait être à même d'égaliser celui des productions en pleine terre.

4. Qualité des tomates

- **Concernant le BER**

La proportion importante de BER en aquaponie, surtout sur une période précise en aquaponie, pouvait mettre en exergue une carence dans la solution nutritive ou autre condition à corriger dans le cas de la mise en place d'expérimentations futures. Une première hypothèse était l'existence d'une possible carence. L'arrivée rapide de BER en hydroponie a poussé à croire que la solution-fille utilisée n'était pas correctement équilibrée. Selon les analyses Eurofins réalisées, les experts du CTIFL nous ayant fournis la solution ainsi que Urban et Urban (2010), les concentrations en calcium étaient presque trois fois trop faibles. Ce résultat pouvait être dû à une mauvaise préparation de la solution fille, ou au fait que la préparation fournie, de type « clé-en-main », aurait malgré tout nécessité un ajustement en calcium. Selon la Table de Composition Nutritionnelle du CIQUAL (https://ciqual.anses.fr/), les concentrations en potassium dans les fruits étaient correctes. Certains articles suggéraient qu'une carence en calcium serait la cause du BER, mais Saure (2001) affirmait qu'elle en serait en fait une conséquence. Le BER surviendrait du fait d'un stress abiotique : salinité, sécheresse, intensité lumineuse importante, chaleur, quantité importante de $N\text{-}NH_4^+$ (Saure, 2014). Concernant la salinité, les concentrations sont restées très inférieures au seuil de tolérance de la tomate (40mg/L contre 1000mg/L). Le biofiltre a fonctionné correctement, offrant une concentration en $N\text{-}NH_4^+$ systématiquement proche de 0mg/L. La proportion de tomates atteintes de BER étant la plus importante suite à la canicule fin Juin 2019, intensité lumineuse et chaleur étaient les pistes les plus probables, les plants étant correctement irrigués. Suhl (2016) faisait mention d'une proportion moindre de BER en aquaponie, avec des plants de taille identique à ceux en hydroponie et des produits de haute qualité. Pour atteindre cet objectif, une solution serait de favoriser l'orientation de l'eau absorbée vers les fruits, en effeuillant les feuilles basses, pratique commune en maraîchage.

La présence d'anthracnose pouvait aussi être considérée. Toutefois, son arrivée simultanée sur tous les plants d'aquaponie en période de sécheresse et alors que les concentrations en éléments nutritifs étaient au plus bas nous poussait à ne pas renier l'hypothèse d'un facteur environnemental. La présence simultanée de BER et d'anthracnose était une piste privilégiée.

Les deux plants de la variété Estiva, installés en selon la modalité 2L/h, n'ont montré aucune forme de BER. Quelques cas de pourriture apicale ont été relevés, mais les fruits restaient dans leur globalité corrects. Certaines variétés présenteraient des résistances au BER. Cette distinction variétale pourrait être un atout dans la mise en place d'un protocole de culture semblable, pour une production destinée à la grande distribution. De plus, si le choix ici a été fait de cultiver la même variété que la SERAIL pour avoir des éléments de comparaison hors-sol/pleine terre, il serait pertinent par la suite d'étudier des variétés sélectionnées pour la culture hors sol, et de se limiter à un comparatif hydroponie/aquaponie.

- **Concernant la qualité nutritionnelle**

Les tomates issues de l'aquaponie étaient moins colorées que les tomates issues de pleine terre. Ce problème n'était pas dû à l'exposition des plants qui étaient dans les mêmes conditions que ceux en hydroponie, qui n'avaient pas ce problème. Le lycopène est un caroténoïde responsable des variations de couleur rouge chez la tomate (Story et al, 2010). Les caroténoïdes s'accumulent au cours de la maturation du fruit, et leur décomposition serait responsable en partie de l'arôme des tomates (Causse et al, 2007). En tant que pigment, le lycopène est positivement corrélé à la couleur des fruits mais c'est aussi un antioxydant

pouvant diminuer le risque de cancer et améliorer la santé cardiovasculaire (Agarwal et al, 2000 ; Mozos et al, 2018). Cet élément impacte donc à la fois les qualités visuelles, organoleptiques et nutritionnelles.

Si les échantillons Aquaponie ont d'une manière générale eu une teneur en caroténoïdes totaux bien plus faible que celle observée dans les échantillons sol, les résultats étaient inversés pour la teneur en vitamine C et en polyphénols. La vitamine C est un micronutriment de première importance pour l'alimentation humaine, tout comme les polyphénoles qui présentent de plus un caractère antioxydant et préventif face à certaines maladies (Poiroux-Gonord et al, 2010). La teneur en vitamine C serait plus importante dans les fruits immatures, et, alors qu'une fertilisation azotée minérale tend à la diminuer (face à une fertilisation organique), sa synthèse est stimulée par une contrainte hydrique modérée (Causse et al, 2007, Poiroux-Gonord et al, 2010). Les composés phénoliques voient leur concentration augmenter en cas de déficit d'irrigation. De plus, l'impact d'une salinité plus importante ou d'une restriction d'eau sur la composition en vitamine C et polyphénoles dépendrait du stade de développement durant laquelle elle surviendrait (Poiroux-Gonord et al, 2010). Les contenus en vitamine C, lycopène et β-carotène pourraient donc être modifiés en favorisant une réorientation des nutriments via un effeuillage plus important, et en modifiant les paramètres abiotiques.

- **Concernant la qualité organoleptique**

Les teneurs en acide citrique plus élevées dans les échantillons Pleine terre qu'en Aquaponie ont été ressentis durant le test organoleptique. Les tomates en Aquaponie contenant plus de sucres et moins d'acides organiques qu'en Pleine terre, le ratio acide/sucre y était donc plus faible. Ce ratio influence la perception et l'intensité du goût du fruit, et ne doit pas dépasser un certain niveau (Malundo et al, 1995). Les tomates issues du système Aquaponique ont donc eu un goût sucré plus prononcé qu'en Pleine terre.

Les tomates issues de l'aquaponie étaient plus fermes que les tomates issues de Pleine terre. Leurs carcasses présentaient une trame fibreuse interne blanche plus importante (figure 17), qui peut être liée à une fertilisation potassique trop faible et des températures élevées (Blancard, 2013c). Or, les températures relevées sous la serre de la SERAIL ont été plus importantes que celles relevées sous la serre aquaponique. Cette fermeté était aussi due à la présence du collet jaune autour du pédoncule, symptôme d'une carence en potassium.

Figure 17 : Carcasses des échantillons issus de pleine terre (à g.) et d'aquaponie (à d.). CTIFL.

Ainsi, la carence en potassium restait la piste privilégiée pour expliquer la moindre qualité des tomates en aquaponie, ainsi que leur rendement moins élevé que pour les autres modalités testées.

La qualité organoleptique des tomates en aquaponie était inférieure à celle des autres modalités. Mais les échantillons restaient tout de même acceptables : bien que plus farineuses que les autres, les tomates en aquaponie n'étaient pas considérées comme farineuses. Les préférences du consommateur diffèrent selon les publications. Le goût sucré, le goût de tomate

et la fermeté semblent toutefois être les principaux indicateurs d'appréciation (Sinesio et al, 2010). Causse et al (2010) comparaient les préférences organoleptiques concernant la tomate dans des pays différents en usant plusieurs cultivars. Il en ressortait une tendance générale de préférence pour des fruits de taille modérée, juteux, fermes et au goût prononcé. Les variétés de type ancienne, aux bords cannelés, à la peau épaisse et à la texture fondante et farineuse étaient dépréciées (Cause et al, 2010). Les aspects visuels étaient tout aussi déterminants que les aspects organoleptiques. Ainsi, les tomates en aquaponie seraient potentiellement plus dépréciées que celles issues de pleine terre dans notre cas de figure, du fait de leur texture farineuse et la fermeté de leur peau. Cette qualité organoleptique pourrait être améliorée en réalisant un apport plus important de potassium et en choisissant une variété plus adaptée à la culture hors sol. De plus, les fruits de la modalité Aquaponie 4L/h étaient moins riches en NPK. Un test organoleptique différenciant les deux modalités d'irrigation mettrait peut-être en avant un goût d'eau plus prononcé et un manque de saveur du fait du stress hydrique moindre, ou encore un aspect plus juteux pour la modalité 4L/h, aspect préférentiel du consommateur comme expliqué tantôt.

D. Conclusion sur la qualité des plantes en aquaponie

Le recueil des données phytoépuratoires de nombreuses plantes, dont des plantes aux besoins en nutriments plus complexes, devrait permettre de dimensionner et modéliser des installations afin d'optimiser la phytoépuration selon les besoins respectifs des plantes. La qualité de ces plants reste un critère de première importance. La technique innovante de culture de tomates en goutte-à-goutte sur perlite en aquaponie a offert des tomates légèrement moins satisfaisantes gustativement parlant que la pleine terre et l'hydroponie. De plus les conditions de cultures ont favorisé le développement de nécroses du fait d'un stress abiotique sur les plantes. Toutefois, la valeur nutritionnelle des tomates en aquaponie, donnée assez attendue, a été satisfaisante car égalant, voire surpassant celle des tomates en pleine terre concernant les vitamines. Le principal bémol était la faiblesse en caroténoïdes due à une faible coloration des fruits. Les concentrations des métabolites secondaires dans une espèce sont fortement liés à la génétique mais aussi à l'environnement (mode de culture, lumière, stress hydrique/salin…). Dans notre cas, la carence en potassium et l'irrigation étaient les principales pistes expliquant les différences nutritionnelles et organoleptiques entre les fruits issus d'aquaponie et ceux cultivés en pleine terre.

Il restait envisageable que les nutriments rejetés du RAS puissent être exploités comme source de nutriments pour une production innovante en aquaponie de tomates à la qualité nutritionnelle compétitive par rapport à d'autres modes de culture, et ce dans un contexte de polyculture. Notre seconde hypothèse restait encore à confirmer dans son ensemble, mais ne peut pas être infirmée : « Les nutriments issus du RAS peuvent suffire pour cultiver des plantes à fruits comme les tomates, avec une qualité nutritionnelle du produit final comparable à des modes de culture conventionnels ».

Malgré ce système de double recirculation demeuraient des effluents et des rejets. Le bilan de masse a fait ressortir que la surverse de la fosse horticole est toujours chargée en azote. On pouvait donc se demander si l'on ne pouvait pas traiter ces effluents afin de compléter ce bilan de masse et d'optimiser l'azote. Une piste intéressante semblait être la production de spiruline.

IV. Utilisation des eaux de surverse du compartiment végétal pour la production de spiruline (*Arthospira platensis*)

Le bilan de masse montrait que malgré l'abattement important permis par le compartiment végétal, le pilote avait un effluent de sortie et rejetait un volume d'eau non négligeable à l'égout à raison de **600 à 1000 litres par jour.** La fraction d'azote résiduelle de cette eau partiellement épurée en azote et presque totalement en phosphore pouvait être valorisée pour alimenter un autre type de culture, celui de la spiruline. Cela permettrait d'aller plus loin dans la phytoépuration et le bouclage du cycle de l'azote, tout en évitant tout rejet d'effluent dans l'environnement naturel. Une finalité serait d'en déduire la surface de culture nécessaire pour traiter le volume d'eau journalier rejeté par le système piscicole, et d'évaluer la faisabilité technique à une échelle de production commerciale de spiruline. Cette expérimentation a été employée pour confirmer ou infirmer notre troisième et dernière hypothèse : « Il est possible d'optimiser davantage le bilan azoté de l'aquaponie en complétant la bioremédiation des rejets du compartiment végétal, chargées en nutriments, dans la production de cyanobactéries valorisables notamment en alimentation humaine, avec une qualité de produit sanitaire et nutritionnelle comparables aux produits conventionnels. »

La spiruline est une cyanobactérie de forme hélicoïdale capable de fixer l'azote et contenant de la chlorophylle a, de la phycocyanine (élément d'intérêt nutritionnel et puissant oxydant lui offrant sa couleur bleue) et des caroténoïdes. Ce microorganisme bleu-vert multicellulaire photo autotrophe se trouve à l'état naturel dans de nombreux lacs aux eaux salines et alcalines, au pH élevé, et est présent sur tous les continents. Décrite pour la première fois comme un produit de consommation des aztèques, redécouverte depuis les années 40, elle n'a été que peu étudiée depuis (Fox 1999 ; Habib et al, 2008). Toutefois, la spiruline fait face à un regain de popularité depuis une vingtaine d'années car elle est considérée comme un des meilleurs compléments alimentaires existants (Soni et al, 2017). Sa richesse en protéines (60 à 70% de son poids sec), en vitamines et minéraux (notamment en fer) et en acides gras essentiels font *d'Arthrospira platensis* une candidate idéale pour l'aide au rétablissement des enfants en état de malnutrition dans le cadre d'actions humanitaires, mais aussi en tant que complément de l'alimentation humaine et animale, fertilisant, colorant, et de nombreux usages médicaux (Habib et al, 2008 ; Soni et al, 2017).

Un partenariat entre l'ITAVI et la fédération des spiruliniers de France, élargi à l'ASTREDHOR et à d'autres partenaires de recherche, a abouti à la mise en place d'un projet de recherche et développement portant sur la culture de spiruline afin de 1) créer un GBPH (guide de bonnes pratiques d'hygiène) ayant pour finalités la définition, l'encadrement et la normalisation des pratiques, 2) élaborer un référentiel de production artisanale française. La création d'un cahier des charges « biologique » était également envisagé à la suite de différents tests sur des intrants alternatifs aux fertilisants conventionnels. La revue de la FAO (Habib et al, 2008) mentionne notamment l'usage d'intrant résiduels dans le cadre de la culture de spiruline. Cette information poussait à tester l'aspect phytoépuratoire de la spiruline qui pourrait être exploitée dans le cadre de la gestion des effluents aquacole.

A. Matériel et méthodes

1. Dispositif expérimental

L'expérience s'est déroulée du 2 Mai au 11 Juillet 2019, soit pour une durée totale de 70 jours dans la station horticole RATHO sous une serre en verre à simple paroi, avec gestion des paramètres climatiques. Les volets de la serre avaient pour consigne de s'ouvrir si la température de l'air dans la serre dépassait 22°C. Les écrans d'ombrage se fermaient pour un rayonnement supérieur à 850W/m² ou une température nocturne inférieure à 12°C.

Pour la culture de spiruline, les bassins à ciel ouvert présentaient l'avantage d'être peu onéreux et faciles à construire mais employaient une surface importante, étaient plus sujets à l'évaporation et à une contamination du milieu de culture en particulier en extérieur (Soni et al, 2017). Toutefois le milieu de culture de spiruline est défavorable au développement des bactéries pathogènes les plus problématiques pour l'homme étant donné le pH variant en général autour de 9.8-10.5. Ce point a été réduit dans cette expérience étant donné la serre qui a évité la contamination du milieu par des oiseaux ou mammifères. 16 bacs de structure en bois de dimensions 120x100 cm recouverts d'une bâche EPDM ont été disposés en deux lignes parallèles d'orientation Nord-Sud. L'expérimentation occupait donc 22 m². Les bacs ont tous été remplis de 150 litres d'eau, soit une hauteur d'eau de 14 cm. Une agitation du milieu a été nécessaire afin d'optimiser la production en permettant une bonne distribution de la lumière, en rendant possible le maintien en suspension des cellules, en évacuant l'oxygène qui pouvait inhiber leur croissance, et en limitant la photolyse des cellules (Soni et al, 2017). Chaque bac était donc muni d'une pompe de la marque Wiltec au débit théorique de brassage de 3000 L/h fonctionnant un quart d'heure toutes les 15 minutes. Chaque semaine l'évaporation des bacs était compensée par l'ajout d'eau claire, sauf pour la modalité Aquaponie, où l'idée était de substituer l'eau claire par de l'eau issue de la surverse du compartiment végétal du pilote d'aquaponie. L'ajout était mesuré afin de connaitre les apports azotés potentiellement effectués.

2. Modalités mises en place

Les bacs comprenaient 5 modalités avec trois répétitions ainsi qu'une modalité « guano » sans répétition dont l'objectif est d'effectuer une première approche de cette potentielle source d'azote (Figure 18).

Modalités « Conventionnel » : Les bacs représentant ces modalités avaient pour milieu de base de l'urée comme source d'azote et du phosphate mono-ammoniaque en plus des autres composants conventionnels de milieu de culture de spiruline. Les tests étaient :

- **Modalité 1 – Témoin conventionnel batch**
  L'apport azoté était effectué via l'urée lors des récoltes à raison de 45g par kilogramme de spiruline récoltée.
- **Modalité 2 – Témoin conventionnel urée fractionné**
  L'azote était apporté via l'urée à raison de l'ajout de 3g d'urée tous les jours. Aucun apport de compensation en urée n'était fait suite à la récolte. Cet apport journalier avait pour objectif d'atteindre la valeur de 10 mg d'azote par jour et par litre. Cette concentration a été déterminée comme optimale des suites des expérimentations précédentes.
- **Modalité 6 – Guano marin**
  Le milieu a reçu en début d'expérimentation un apport en batch de guano marin, avec un taux d'azote total identique aux modalités précédentes.

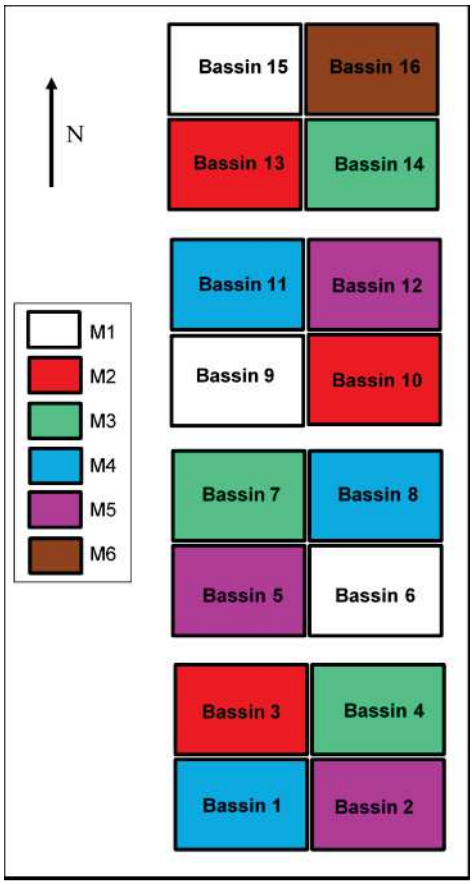


Figure 18 : Schéma de l'installation de l'expérimentation « Spiruline – Essai BIO3 »

Modalités « Biologique » : La source de phosphore des modalités 1 et 2 ne pouvait pas être reprise car le phosphate mono-ammoniaque ne répondait pas aux critères biologiques. De l'acide phosphorique laminaire (fabriqué à partir de microalgues) a donc été utilisé à la place. Pour des raisons identiques le nitrate de potassium a été remplacé par du sulfate de potassium, et il n'y a pas eu d'apport d'azote initial. L'urée étant dans le même cas de figure, un apport d'azote journalier était réalisé avec des produits utilisables en AB, pour atteindre la valeur de 10 mg d'azote par litre de milieu de culture et par jour .

- **Modalité 3 – Sulfate d'ammonium**
  L'azote ajouté quotidiennement, d'origine minérale, s'élevait à 10.5 mL de sulfate d'ammonium dans chaque bac de culture. Cet azote ammoniacal était issu de la valorisation d'effluents de méthanisation.
- **Modalité 4 – Isotonic Bio3G**
  Ici, la source d'azote fut quant à elle de nature organique via l'ajout quotidien de 46mL d'un produit commercial, l'Isotonic B de l'entreprise BIO3G.

Modalité 5 – Aquaponie : Le milieu de base de ces bacs de culture était de la même composition que ceux des modalités 1 et 2. Etant donné les faibles concentrations en azote des eaux de la surverse horticole du système aquaponique, un ajout initial de 300g de nitrate de potasse (41g d'azote) a été réalisé ; l'idée étant de se passer des apports ultérieurs d'urée, source d'azote classiquement utilisée en culture de spiruline. Les apports de compensation lors des récoltes étaient identiques aux modalités 3 et 4. L'apport d'azote était réalisé via l'ajout d'eau non traitée et non filtrée de la fosse horticole du système pilote d'aquaponie. Le volume d'eau apporté correspondait au volume d'eau évaporé dans les bacs de culture.

Les compositions de base, ajouts journaliers et post-récoltes sont disponible en annexe.

3. Mesures effectuées

Trois fois par semaine les paramètres du milieu de culture étaient suivis (Tableau 10) :

- **pH.** Selon la bibliographie ce paramètre était optimal pour la spiruline s'il est voisin de 9.5, plus largement s'il est compris entre 8,5 et 11. (Fox, 1999)
- **Température**, en degrés Celsius. L'optimum était de 35°C. (Habib et al, 2008)
- **Secchi,** en centimètres **:** profondeur à partir de laquelle les parties noires et blanches du disque utilisé, (disque de Secchi, en figure 19), ne sont plus discernables l'une de l'autre.
- **Concentration en oxygène (DO),** en milligrammes par litre : permettait de refléter l'état de santé de la spiruline. Une spiruline en plein croissance rejette de l'oxygène jusqu'à sursaturer le milieu de culture (de 100 à 250% de saturation)

Tableau 10 : Description des paramètres suivis de la spiruline

Paramètre	Fréquence	Optimum (bibliographie)
pH	Trois fois par semaine	8,5 - 11
Température		35°C
DO		Saturation
Secchi	Suivi journalier, relevé trois fois par semaines	/

Figure 19 : Outils de mesure du Secchi avec disque de Secchi en fond. RATHO. 13/06/2019. Lucile Delorme

4. Protocole de récolte

Les récoltes des bassins étaient effectuées une fois que ceux-ci présentaient un Secchi inférieur ou égal à 2.2. La veille au soir des récoltes les pompes étaient coupées afin d'arrêter

le brassage et de permettre à la spiruline de se retrouver en surface. Chaque bac était récolté à raison des deux tiers de sa surface afin d'obtenir un secchi autour de 3 une fois la récolte terminée. Ces valeurs étaient un bon compromis entre une récolte conséquente et un réamorcement efficace de la croissance de la spiruline. La crème était récoltée et disposée dans un tamis fait d'un filtre de maille 20µm. La spiruline y était brassée afin d'évacuer un maximum d'eau, puis pressée avant d'être pesée et extrudée. La masse fraîche de la spiruline récoltée était annotée, et une partie était disposée à l'étuve à 45°C sous forme de spaghettis durant 10 heures. Les paillettes ainsi obtenues, une fois pesées, permettaient de déterminer le taux de siccité de la spiruline, et ainsi d'aboutir à la masse totale de spiruline récoltée en poids sec en appliquant le taux de siccité à l'ensemble de la masse fraîche récoltée par bassin.

5. Analyse de la qualité de la spiruline récoltée et séchée

Le taux de protéine final a été étudié afin d'évaluer la quantité d'azote présente dans le produit fini. Selon la FAO, le taux de conversion entre les protéines et l'azote contenu varie entre 5.26 et 7.69. La valeur de 6.25 est communément utilisée (FAO, 2002). Ainsi,

$$Quantité\ d'azote\ (g/100g) = \frac{Quantité\ de\ protéines\ brutes\ (g/100g)}{6.25}$$

Les échantillons de chaque modalité ont été envoyés au laboratoire Eurofins, non seulement pour l'analyse nutritionnelle des produits, mais également pour mesurer et comparer leur qualité sanitaire selon la microbiologie et la limnologie, telles que définies dans le GBPH développé par la filière en France. L'objectif était de vérifier la potentielle contamination du milieu dû à l'apport d'effluents aquaponiques non traités.

- Les analyses microbiologiques comprenaient les paramètres suivants : microorganismes aérobies à 30°C, coliformes thermotolérants à 44°C, anaérobies sulfito-réducteur à 46°C, clostridium perfringens, staphylocoques à coagulase positive, salmonella, listeria monocytogènes.
- Les analyses limnologiques consistaient en 1) des observations microscopiques et une quantification relative de la flore présente dans le milieu de culture et dans le produit fini (paillettes sèches), 2) des mesures de la concentration en microcystines, cyanotoxine pouvant potentiellement et dans certaines conditions être rejetées par certaines microalgues ou cyanobactéries « parasite » ou « compagne » de la spiruline. Elles peuvent notamment provoquer des troubles digestifs et hépatiques, des insuffisances rénales et des troubles neurologiques (ANSES, 2017)

B. Résultats

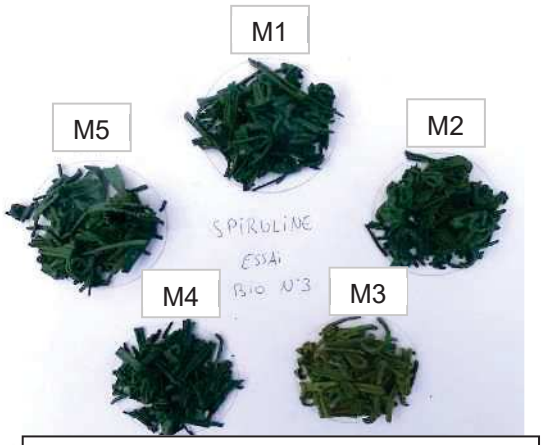


Figure 20 : Photographie des paillettes obtenues pour les différentes modalités. RATHO. 16/07/2019. Lucile Delorme

Le milieu guano, conduit en « batch », est mort un mois après le début de l'expérimentation. Il serait sans doute plus pertinent de mettre au point une conduite de culture en fractionné : le guano une fois en solution s'est transformé rapidement en ammoniaque, forme azotée préférentielle de la spiruline, mais rapidement toxique en trop forte concentration. Les trois bassins conduits selon la modalité M3 - sulfate de NH_4 ont pris une couleur jaune/verte en semaine 25 sans qu'il soit possible de contrecarrer cet effet, et ce malgré de bons résultats obtenus les années précédentes avec cet intrant (figure 20).

- Milieu physico-chimique

La température a varié dans les trois bassins de 18°C le 7/05/2019 à 27°C le 28/06/2019. Le pH des trois bassins, initialement à 9.5, s'est stabilisé durant la seconde moitié de l'expérimentation à 10.1. Des variations importantes dans les mesures de DO ont été remarquées, mais étant donné que les valeurs relatives restaient faibles il en a été déduit qu'il s'agissait d'une erreur de l'appareil de mesure.

- Rendement

Le meilleur rendement est obtenu avec la modalité M3 – Sulfate d'ammonium à raison de 3.61 grammes de matière sèche par mètre carré et par jour (Tableau 11). Venaient ensuite respectivement la modalité M2 – Conventionnel fractionné et la modalité M5 – Aquaponie, suivis par la modalité M1 – Conventionnel Batch. La modalité utilisant l'Isotonique 3G a offert le moins bon rendement durant l'expérimentation.

Tableau 11 : Présentation des rendements obtenus aux termes de l'expérimentation

Résultat / ***Modalité***	Biomasse sèche totale récoltée (g)	Moyenne bassin	Ecart-type	Rendement moyen bassins (g/m²/j)	Ecart-type
M1 – Conventionnel Batch	764.88	*254,96*	*37,57*	3.04	*0,45*
M2 – Conventionnel fractionné	863.81	*287,94*	*1,61*	3.43	*0,02*
M3 – Bio (Sulfate de NH_4)	910.15	*303,38*	*27,88*	3.61	*0,33*
M4 – Bio (Isotonic Bio3G)	510.07	*170,02*	*20,03*	2.02	*0,24*
M5 - Aquaponie	844.85	*281,62*	*9,75*	3.35	*0,12*

- Bilan sanitaire/analyses microbiologiques

Le bilan sanitaire a été réalisé par les laboratoires AQMC (Analyses Qualité Microbiologie Conseil). Toutes les modalités montraient des résultats inférieurs au seuil concernant les Coliformes thermotolérants, les anaérobie sulfito-réducteurs, les clostridiums perfringens, les staphylocoques à coagulase positive, Salmonella et Listeria monocytogènes (Tableau 12). Concernant les microorganismes aérobies 30°C, les modalités 1 et 4 présentaient une valeur plus élevée mais restaient tout de même acceptables.

Tableau 12 : Présentation du bilan sanitaire des échantillons de spiruline

			Echantillon du 1° Juillet 2019 (Spiruline sèche)				
			M1 - Conv Batch	**M2 - Conv Fractionné**	**M3 - Bio NH4**	**M4 - Bio Isotonic BIO3G**	**M5 - Aquaponie**
Paramètres recherché	**Unités**	**Critères**	**Résultats**				
Micro organismes aérobies 30°C	UFC/g	<100 000	150 000	100 000	68 000	220 000	63 000
Coliformes thérmotolérants 44°C	UFC/g	<100	<10	<10	<10	<10	<10
Anaérobie sulfito réducteurs 46°C	UFC/g	<100	<10	<10	<10	<10	<10
Clostridium perfringens	UFC/g	<10	<5	<5	<5	<5	<5
Staphylocoques à coagulase positive	UFC/g	<100	<10	<10	<10	<10	<10
Salmonella	/25g	Absence	ND	ND	ND	ND	ND
Listeria monocytogènes	UFC/g	<100	<10	<10	<10	<10	<10
			Acceptable	Satisfaisant	Satisfaisant	Acceptable	Satisfaisant

- Bilan nutritionnel

La modalité 3 présentait le bilan nutritionnel le moins intéressant. La modalité 1 présentait le bilan nutritionnel le plus intéressant. Pour un même taux de protéines brutes, les modalités M1-Conventionnel Batch et M5-Aquaponie avaient des taux de fer plus importants. La modalité M3-Sulfate d'ammonium a eu la quantité en protéines brutes la plus faible (Tableau 13).

Tableau 13 : Bilan nutritionnel des différentes modalités

	Laboratoire	Unité	M1 - Conv Batch	M2 - Conv Fractionné	M3 - Bio NH4	M4 - Bio Isotonic BIO3G	M5 - Aquaponie
Oligoéléments - fer	AQMC	mg/100g	61,0	53,9	46,3	54,8	55,9
protéines brutes	AQMC	g/100g	63,9	66,0	58,5	67,8	63,1
taux d'azote	AQMC	g/100g	10,2	10,6	9,4	10,8	10,1
phycocyanines brutes	AQMC	mg/100g	24447,0	22922,0	19229,0	24484,0	20623,0
C-Phycocyanine	AQMC	mg/100g	12947,0	12245,0	10178,0	13020,0	10963,0

- Analyse de la composition floristique

Réalisée par Limnologie SARL, l'analyse a présenté le «nombre de colonies» et «biovolumes» du milieu de culture et de la récolte de spiruline. Le pourcentage de colonies reflétait la diversité des cyanobactéries présentes dans le milieu tandis que le biovolume quantifiait la prépondérance de telle ou telle cyanobactérie par rapport aux autres. Les modalités M1, M2 et M3 ont eu une diversité plus élevée que les modalités M4 et M5 qui elles semblaient davantage favoriser la spiruline (Tableau 14). En termes de biovolume, *Arthrospira* était présente à hauteur de 97% pour chaque modalité dans les milieux et au-delà de 99% dans les paillettes. La modalité M2 présentait du phormidium, cyanobactérie parasite bien connue des producteurs de spiruline. Les autres modalités n'en présentaient pas, le résultat étant inférieur au seuil de détection. Les paillettes des modalités M1 et M4 présentaient pour 0.25% des colonies de microcystines. Ce chiffre s'élevait à 0.21% pour les modalités M2 et M5, et 0.27% pour la modalité M3.

Tableau 14 : Résumé de l'analyse floristique des milieux de culture et du produit fini

	Milieux de culture 28/06/2019									
	M1 - Conv Batch		M2 - Conv Fractionné		M3 - Bio NH4		M4 - Bio Isotonic BIO3G		M5 - Aquaponie	
	% colonies	*% biomasse*	*% colonies*	*% biomasse*	*% colonies*	*% biomasse*	*% colonies*	*% biomasse*	*% colonies*	*% biomasse*
Total Arthrospira	**4,0**	**99,2**	**2,9**	**97,7**	**4,3**	**99,1**	**13,6**	**99,4**	**13,3**	**99,7**
Autres cyanobactéries	**95,4**	**0,8**	**96,7**	**2,3**	**95,4**	**0,9**	**86,4**	**0,6**	**85,8**	**0,3**
Autres embranchements	0,6	<0,1	0,5	<0,1	0,4	<0,1	<0,1	<0,1	0,9	<0,1
Microcystines (eq-LR, µg/litre)	0,18		0,15		0,22		<LQ		0,22	
	Paillettes 28/06/2019									
Total Arthrospira	**95,7**	**99,9**	**85,5**	**99,8**	**96,7**	**99,9**	**95,6**	**99,9**	**94,6**	**99,9**
Autres cyanobactéries	**4,3**	**<0,1**	**14,5**	**0,2**	**3,3**	**<0,1**	**4,4**	**<0,1**	**5,4**	**<0,1**
Autres embranchements	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Microcystines (eq-LR, µg/g P Sec)	0,25		0,21		0,27		0,25		0,21	

- Ajout d'eau du compartiment horticole dans la modalité M5 – Aquaponie

Afin de compenser l'évaporation, 8 ajouts ont été faits dans les bassins 2, 5 et 12 les 10, 17, 22 et 29 Mai, les 17, 21 et 28 Juin ainsi que le 4 Juillet 2019. Cet apport était légèrement variable chaque semaine puisqu'il correspondait au volume d'eau évaporé dans les bacs de culture de spiruline, volume directement lié à la température atmosphérique et à l'humidité relative de l'air. Les résultats sont résumés dans le tableau 15. En termes d'apport d'azote journalier, les bassins 2 et 5 ont reçu 0.28 mg/L/j, et le bassin 12 a reçu 0.27 mg/L/j.

Tableau 15 : Volume d'eau du système aquaponique apporté et équivalent en azote

	Volume apporté (L)			[N-NO_3^-] effluent aquaponique (mg/L)	Azote apporté (mg)		
	B2	**B5**	**B12**		**B2**	**B5**	**B12**
Somme	201 ,00	186,00	231,00		3952,44	3703,04	4441,28
Moyenne	25,13	23,25	28,88	19,93	494,06	462,88	555,16
Ecart-type	9,49	8,40	13,64	6,26	202,06	200,20	225,78

C. Analyse et discussion

- Rendements

En comparaison avec les autres modalités, la modalité Aquaponie a obtenu des rendements dans l'ordre de grandeur des modalités conventionnelles. Les rendements entre 2.024 g/m²/j (M4) et 3.612 g/m²/j (M3) étaient inférieurs à ceux de la bibliographie : 5-10g de spiruline par m² par jour selon Fox (1999), et entre 20 et 30 g/m²/j selon Soni et al (2017). Mais c'était aussi dû aux pertes importantes durant la récolte qui sont plus impactantes lorsque la taille des bacs diminue. Des résultats différents ont été obtenus lors d'expérimentations précédentes, il serait intéressant de confirmer avec des bassins plus représentatifs d'une production professionnelle de spiruline. De plus, le nombre important de modalités n'a pas permis des récoltes aux secchis optimaux pour chaque bassin par manque de temps. Une piste d'amélioration serait soit de diminuer le nombre de modalités et donc de bassins, soit d'ajouter du personnel.

- Bilan sanitaire

Les critères hygiène (CH) des modalités M2, M3 et M5 étaient satisfaisants. Les deux autres modalités (Conventionnel batch et BIO aves un azote d'origine organique) présentaient une concentration en microorganismes aérobies plus importantes que le seuil recommandé. Ceci pouvait facilement s'expliquer pour la modalité M4, puisque l'intrant principal était sous forme organique et favorisait donc le développement de bactéries hétérotrophes. Cette hypothèse a été corroborée par les quantités d'oxygène plus faibles observée dans cette modalité, les bactéries hétérotrophes étant très demandeuses en oxygène. Un CH acceptable permet d'alerter le producteur afin que le produit ne devienne pas non satisfaisant, mais le produit reste commercialisable. Un CH non satisfaisant impose la mise en place d'actions correctives, c'est-à-dire la mise en place d'actions permettant de remédier à ces valeurs, car le produit n'est pas exploitable en l'état actuel. Les actions correctives conseillées par la filière sont les suivantes : écumage des milieux de culture pour nettoyer le milieu de culture (spiruline morte, corps étrangers en décomposition, particules organiques fines…), augmentation du pH. Les eaux brutes du compartiment végétal ne semblaient pas avoir contaminé les milieux de culture pour la modalité aquaponie qui présentaient plus de colonies et de biomasse *Arthrospira* que les autres modalités.

- Bilan nutritionnel

La modalité M3-Sulfatre d'ammonium présentait un taux de protéines inférieur aux autres. Il était possible que les bassins aient manqué d'azote, ce qui aurait entraîné leur décoloration. Cet effet n'avait pas été observé durant des expérimentations précédentes. Etant donné la décoloration simultanée de tous les triplicats, il était aussi possible que ce dépérissement soit dû à une erreur technique lors de l'ajout de l'azote. Un dégagement de l'azote par dénitrification était envisageable. La forme volatile de l'ammonium – NH_3 – prend des proportions variées en fonction du pH et de la température et est importante dans nos conditions (figure 21).

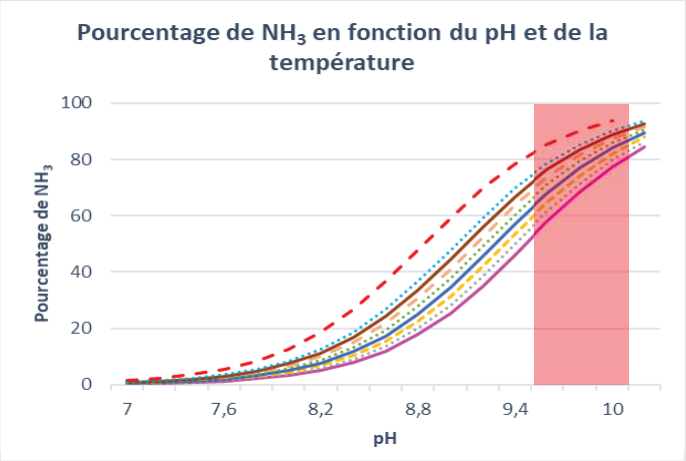


Figure 21 : Pourcentage de NH_3 en fonction du pH et de la température (source : Hach, 2017)

- Bilan floristique

Il est intéressant de voir que les modalités M1, M2, et M3 ont eu une diversité de cyanobactéries plus élevées que M4 et M5 qui elles semblaient davantage favoriser la spiruline. Toutefois en termes de biovolume les valeurs au-delà de 97% de spiruline pour chaque modalité dans les milieux et au-delà de 99% dans les paillettes sont considérées comme correctes. Le GBPH de la filière française fixe comme limite 1 µg/g de microcystines dans le produit fini. Les valeurs obtenues respectaient donc ce critère.

- Utilisation de l'eau de surverse du compartiment horticole comme milieu de culture

La spiruline de la modalité M5 – Aquaponie se trouvait dans un milieu riche en azote du fait de l'ajout initial de 300g de nitrate de potasse à 277.23 mg/L, soit 41g d'azote dans chaque compartiment et 123g d'azote total. Le taux de protéines brutes dans le produit fini de la modalité M5, convertis en azote, nous indiquait que 85.3g d'azote ont été exportés au total des bassins via les récoltes. Or, l'apport azoté total par les 618 litres d'eau de l'aquaponie afin de compenser l'évaporation s'élevait à 12.1g. La concentration en azote n'était donc pas assez élevée, et aurait dû être sept fois plus importante afin d'avoir une production optimale sans nécessiter d'ajout de nitrate de potasse initial (tableau 16). Ce manque d'azote était en partie dû à la phytoépuration du compartiment végétal du système expérimental aquaponique. En écartant la phytoépuration et en exploitant les concentrations du compartiment aquacole, l'azote journalier moyen apporté par l'eau pouvait être trois fois plus important et s'élever à 1.05 mg/L/j. Malgré cela, ce n'aurait pas été suffisant : selon ces calculs, avec une même évaporation mais un objectif final d'apport de 85.3g d'azote durant l'expérimentation, 2 mg/L/j seraient nécessaires. Toutefois, le système a fonctionné avec une charge moyenne globale de 10 kg/m^3. Ce chiffre pouvait être doublé. En novembre 2015 le système était au maximum de sa capacité d'accueil en poissons avec des densités d'élevage avoisinant les 40-45 kg/m3, et la concentration en N-NO_3^- a atteint 130 mg/L. Bien entendu, ces valeurs dépendent de l'espèce piscicole en charge, du stade du poisson, etc.

Tableau 16 : Calcul de l'apport journalier azoté théorique nécessaire pour fournir en azote la spiruline produite durant l'expérimentation.

	Volume d'évaporation (L)	Azote ajouté (g)	Concentration de l'eau en N nitrique (g/L)	Concentration de l'eau en N nitrique (mg/L)	Apport azoté journalier moyen (mg/L/j)
Aquaponie	618	12,1	0,02	19,58	0,28
RAS seul	618			73,41	1,05
Objectif	618	**85,3**	**0,14**	**138,03**	**1,97**

Les apports journaliers d'azote – 0.28 ; 0.28 ; 0.7 mg/L/j – étaient bien inférieurs à ceux des autres modalités qui s'élèvaient à 10mg d'azote par litre et par jour. 2 mg/L/j d'apport azoté seraient suffisants selon les calculs, alors que dans les autres modalités on ajoute un équivalent de 10 mg/L/j : ce chiffre plus élevé prenait en compte l'évaporation de l'ammoniac évoquée plus haut. Or, les effluents aquaponiques et du RAS ayant leur azote sous forme de nitrates, la transformation en forme $N\text{-}NH_3$ était très improbable en raison du caractère très oxygéné du milieu qui n'était pas en faveur du processus d'ammonification des nitrates. Concernant le phosphore, le milieu de culture de la spiruline en contenait 53 mg/L. Il n'y en aurait donc pas suffisamment dans l'eau du RAS non plus, mais il serait possible d'aller vers un itinéraire technique de complémentation du phosphore.

En se basant sur le volume ajouté dans les bassins, il a été possible de déduire la surface minimale de culture nécessaire pour passer toute l'eau de surverse dans l'itinéraire technique de la spiruline. Si on se fie aux quantités évaporées, il y a ajout de 2,9 litres par jour pour 1.2m², soit 2.42 L/m²/j. Ainsi, pour passer toute l'eau du système (entre 600 et 1000L/j) il faudrait une surface de production de spiruline d'au moins de l'ordre de 247.93 à 413.22 m². Ce chiffre n'est pas inenvisageable, la surface des productions commerciales de spirulines pouvant dépasser les 5 000m².

D. Conclusion

L'utilisation de l'eau de sortie d'un système aquaponique comme eau de compensation et unique intrant azoté dans une culture de spiruline peut permettre la production d'un produit correcte sanitairement et microbiologiquement. De fortes concentrations en azote dans cette eau doivent tout de même être atteintes afin de se passer de tout intrant azoté initial. Il est possible d'utiliser l'eau d'un RAS comme unique source d'azote sans avoir à combiner aquaculture, phytoépuration végétale et culture de spiruline si l'on veut se passer d'intrants azotés. Mais même si l'eau n'est pas assez chargée en azote pour se passer de cet intrant, les effluents aquaponiques offrent une source supplémentaire et permettraient tout de même de diminuer les intrants, et surtout d'éviter tout rejet d'effluent dans le milieu aquatique autrement que par la voie de l'évaporation de molécules d'eau. De plus, la forme azotée (nitrates), plus stable que l'ammonium, permettrait de diminuer la quantité d'intrants.

Le bilan nutritionnel, tout comme le bilan sanitaire, reste correct et les rendements sont honorables en comparaison aux modalités conventionnelles. Bien que ces résultats doivent être approfondis avec des bassins plus représentatifs des productions professionnelles, nous avons pu confirmer notre troisième et dernière hypothèse : « Il est possible d'optimiser davantage le bilan azoté de l'aquaponie en complétant la bioremédiation des rejets du compartiment végétal, chargées en nutriments, dans la production de cyanobactéries valorisables notamment en alimentation humaine, avec une qualité de produit sanitaire et nutritionnelle comparables aux produits conventionnels».

Conclusion générale de la problématique

L'amélioration de la qualité de rejet des systèmes piscicoles présente un enjeu réglementaire vis-à-vis du développement de ces systèmes. L'aquaponie est un système tendant à être installé en zone urbaine ou péri-urbaine. La gestion des effluents est d'autant plus importante dans ces zones. Le développement des systèmes piscicoles recirculés permet une diminution des volumes d'eau nécessaires et des volumes d'eau rejetés. Le système expérimental aquaponique basé au RATHO a permis de démontrer que **le bilan du rejet d'effluents azotés et phosphorés de la partie RAS du système aquaponique est amélioré du fait de la capacité phytoépuratoire du compartiment végétal.** Le potassium étant un élément limitant dans le système, il faudrait aller vers un modèle d'ajout du potassium en augmentant la surface maraîchère pour une même production piscicole. Les données sur la phytoépuration, notamment les légumes-fruits, manquent encore cruellement, de plus la bibliographie ne mentionne que très peu des bilans de masse exploitant des couples d'espèces autres que le traditionnel tilapias/laitues. L'acquisition de données diversifiées grâce à des larges palettes végétales permettra une modélisation des installations, facilitant les débuts des producteurs. Les nutriments issus du RAS d'un système aquaponique pourraient suffire pour cultiver des plantes à fruits comme les tomates, avec une qualité nutritionnelle du produit final comparable à des modes de culture conventionnels, mais les carences en phosphore, calcium et potassium doivent être évitées. Des pistes restent encore à explorer. Une grande quantité de phosphore pourrait être extraite des boues piscicoles (par minéralisation aérobie par exemple) et réintroduite dans le système. Ceci permettrait de combler les besoins plus importants des cultures exigeantes, ou de complémenter certains besoins pour certains stades de croissance (fructification).

Le bilan azoté d'un système aquaponique, et plus particulièrement du RAS, peut encore être optimisé en permettant la bioremédiation des eaux de sortie chargées en nutriments dans la production de spiruline. Une production de cette cyanobactérie valorisables en alimentation humaine permettrait d'exploiter tout ou partie de l'eau de sortie. Il en résulterait en plus une qualité sanitaire et nutritionnelle compétitive par rapport à celles des produits conventionnels. Les rejets d'effluents dans l'environnement s'en retrouveraient grandement limités. Une production de spiruline biologique est envisageable, notamment dans les écloseries qui peuvent porter ce label en Europe.

L'aquaponie présente donc de nombreux potentiels environnementaux, mais l'équilibre des nutriments et, par extension, la qualité organoleptique sont des sujets de préoccupation importants. L'aquaponie a toutefois prouvé être une AMTI permettant de limiter les rejets des eaux du système grâce à la phytoépuration, et est ainsi une réponse à la problématique du rejet des effluents piscicoles dans l'environnement.

BIBLIOGRAPHIE

20 minutes, 2019. La perche commune, poisson de l'année 2019 [en ligne] Disponible sur : https://www.20min.ch/ro/news/suisse/story/La-perche-commune--poisson-de-l-annee-2019-22745659. (Consulté le 10 Juin 2019)

Agarwal S, Rao AV. 2000. Tomato lycopene and its role in human health and chronic diseases. CMAJ. 163(6). 739–744.

ANSES, 2017. AVIS de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif aux « risques liés à la consommation de compléments alimentaires contenant de la spiruline ». Saisine n° 2014-SA-0096.

Ashkenazi, Y. D. ; Israel, A. ; Abelson, A. 2018. A novel two-stage seaweed integrated multi-trophic aquaculture. Reviews in Aquaculture. 11. 246-262.

Bailey, D.S.; Ferrarezi, R.S. 2017. Valuation of vegetable crops produced in the UVI commercial aquaponic system. Aquaculture Reports. 7. 77-82

Blancard, D. 2013a. *Colletotrichum spp.* (Anthracnose). INRA. [en ligne]. Disponible sur : http://ephytia.inra.fr/fr/C/5163/Tomate-Colletotrichum-spp-anthracnose (consulté le 18 Août 2019)

Blancard, D. 2013b. Collet vert ou jaune sur fruits (green or yellow shoulder, greenback). INRA. [en ligne]. Disponible sur : http://ephytia.inra.fr/fr/C/5146/Tomate-Collet-vert-ou-jaune-sur-fruits (Consulté le 14 Août 2019)

Blancard, D. 2013c. Trames fibreuses internes blanches sur fruits (internal white tissue). INRA. [en ligne]. Disponible sur : http://ephytia.inra.fr/fr/C/5351/Tomate-Trames-fibreuses-blanches-internes-sur-fruits (Consulté le 14 Août 2019).

Causse, M. ; Chervin, C. ; Mauget ; J.C. ; Renard, C. 2007. Les sources de variabilité des qualités nutritionnelles des fruits et légumes. IN : Combris, P. ; Amiot-Carlin, M.J. ; Caillavet, F. ; Causse, M. ; Dallongeville, J. ; Padilla, M. ; Renard, C. Soler, L.G. 2007. Les fruits et légumes dans l'alimentation - Enjeux et déterminants de la consommation. Expertise scientifique collective INRA. 173-235.

Causse, M. ; Friguet, C. ; Coiret, C. ; Lépicier, M. ; Navez, B. ; Lee, M. ; Holthuysen, N. ; Sinesio, F. ; Moneta, E.. ; Grandillo, S. 2010. Consumer Preferences for Fresh Tomato at the European Scale: A Common Segmentation on Taste and Firmness. Journal of food science. 75. 531-541

Cerozi, B.B. ; Fitzsimmons, K. 2017. Phosphorus dynamics modeling and mass balance in an aquaponics system. Agriculture Systems. 153. 94-100.

Davidson, J. ; Good, C. ; Williams, C. ; Summerfelt, S. 2017. Evaluating the chronic effects of nitrate on the health and performance of post-smolt Atlantic salmon Salmo salar in freshwater recirculation aquaculture systems. Aquacultural Engineering. 79. 1-8.

Edwards P. 2015. Aquaculture environment interactions : past, present and likely future trends. Aquaculture. 447. 2-14.

Endut, A. ; Jusoh, A. ; Ali, N. 2014. Nitrogen budget and effluent nitrogen components in aquaponics recirculation system. Desalination and Water Treatment. 52. 744-752.

Estim, A., Saufie, S., Mustafa, S. 2018. Water quality remediation using aquaponics sub-systems as biological and mechanical filters in aquaculture. Journal of Water Process Engineering. 30. 100566.

FAO. 2002. FAO FOOD AND NUTRITION PAPER 77 - Food energy - methods of analysis and conversion factors. Report of a Technical Workshop. Rome. [en ligne]. Disponible sur : http://www.fao.org/3/Y5022E/y5022e03.htm (Consulté le 1 Août 2019)

FAO. 2016. La situation mondiale des pêches et de l'aquaculture 2016. Contribuer à la sécurité alimentaire et à la nutrition de tous. Rome. 224 pages.

FAO. 2019. Food Outlook - Biannual Report on Global Food Markets. Rome. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

Foucard P. ; Tocqueville A. 2019. Aquaponie – Associer aquaculture et production végétale. Quae. 209 pages.

Fox D. R. 1999. Spiruline - Technique pratique et promesse. Edisud. 246 pages.

Gichana, Z. ; Liti, D. ; Waidbacher, H. ; Zollitsch, W. ; Drexler, S.S. ; Waikibia, J. 2018. Waste management in recirculating aquaculture system through bacteria dissimilation and plant assimilation. Aquaculture International. 26. 1541-1572.

Graber, A., Junge, R., 2008. Aquaponic systems: nutrient recycling from fishwastewater by vegetable production. Desalination. 246. 147-156.

Habib, M.A.B.; Parvin, M.; Huntington, T.C.; Hasan, M.R. 2008. A review on culture, production and use of spirulina as food for humans and feeds for domestic animals. FAO Fisheries and Aquaculture Circular. 1034. 33 pages.

Hach. 2017. What is the difference between the Intellical™ ammonia and ammonium ion selective electrodes? [en ligne]. Disponible sur : https://support.hach.com/app/answers/answer_view/a_id/1003686/~/what-is-the-difference-between-the-intellical%E2%84%A2-ammonia-and-ammonium-ion (Consulté le 6 Août 2019)

Hinshaw, J.M. 2006. Species profils: yellow perch, Perca flavescens. SRAC (Southern Regional Aquaculture Center, Stoneville, Mississippi). 7204.

IFREMER, Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer. 2009. Les systèmes en circuit recirculé : intérêt et cas d'utilisation [en ligne]. https://aquaculture.ifremer.fr/Fiches-d-information/Filiere-Poissons/Les-systemes-en-circuit-recircule-interet-et-cas-d-utilisation (Consulté le 24 Juin 2019)

Jaeger, C. ; Foucard, P. ; Tocqueville, A. ; Nahon, S. ; Aubin, J. 2018. Mass balanced based LCA of a common carp-lettuce aquaponics system. Aquacultural Engineering. 84. 29-41.

Jegatheesan, V.; Zeng, C.; Shu, L.; Manicom, C.; Steicke, C. 2007. Technological advances in aquaculture farms for minimal effluent discharge to oceans. 2007. Journal of Cleaner Production. 15. 1535–1544.

Jones, J. B. 2014. Complete Guide for Growing Plants Hydroponically. CRC Press. 183 pages.

Khater, E. ; Bahnasawy, A. ; El-Hakeem S. ; Sham, A. ; Hassaan S. ; Yasmin A. ; Hassan, M. 2015. Utilization of Effluent Fish Farms in Tomato Cultivation. Ecological Engineering. 83. 199-207.

Khiari, Z. ; Kaluthota, S. ; Savidov, N. 2018. Aerobic bioconversion of aquaculture solid waste into liquid fertilizer: Effects of bioprocess parameters on kinetics of nitrogen mineralization. Aquaculture. 500. 492-499.

Kloas, W. ; Groß, R. ; Baganz, D. ; Graupner, J. ; Monsees, H. ; Schmidt, U. ; Staaks, G. ; Suhl, J. ; Tschirner, M. ; Wittstock, B. ; Wuertz, S. ; Zikova, A. ; Rennert, B. 2015. A

new concept for aquaponic systems to improve sustainability, increase productivity, and to reduce environmental impacts. Aquac. Environ. Interact. 7. 179-192.

Lewis W.M, Yopp J.H, Schramm H.L, Brandenburg A.M. 1978. Use of hydroponics to maintain quality of recirculated water in a fish culture system. Transactions of the American Fisheries Society. 107. 92–99

Li, M. ; Callier M.D. ; Blancheton J.P.; Galès A. ; Nahon S. ; Triplet S. ; Geoffroy T. ; Menniti C. ; Fouilland E. ; Roque d'orbcastel E. 2019. Bioremediation of fishpond effluent and production of microalgae for an oyster farm in an innovative recirculating integrated multi-trophic aquaculture system. Aquaculture. 504. 314-325.

Love D.C.; Fry J.P.; Genello L.; Hill E.S.; Frederick J.A.; Li X., et al. 2014. An International Survey of Aquaponics Practitioners. PLoS ONE 9(7): e102662 [en ligne]. Disponible sur : https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102662 (Consulté le 29 Mars 2019)

Lv, H. ; Hu, W. ; Xiong, S. ; You, J. ; Fan, Q. 2018. Depuration and starvation improves flesh quality of grass carp (Ctenopharyngodon idella). Aquaculture Research. 49. 3196-3206.

Malundo, T.M.M.; Shewfelt, R.L.; Scott, J.W. 1995. Flavor quality of fresh tomato (Lycopersicon esculentumMill.) as affected by sugar and acid levels. Postharvest Biol Technol. 6.103–110.

Meriac A. ; Eding EH. ; Schrama J. ; Kamstra A. ; Verreth J.A. 2014. Dietary carbohydrate composition can change waste production and biofilter load in recirculating aquaculture systems. Aquaculture. 420. 254–261

Miličić, V.; Thorarinsdottir, R.; Santos, M.D.; Hančič, M.T. 2017. Commercial Aquaponics Approaching the European Market: To Consumers' Perceptions of Aquaponics Products in Europe. Water. 9. 80.

Mozos, I. ; Stoian, D. ; Caraba, A. ; Malainer, C. ; Horbańczuk, J. O. ; Atanasov, A.G. 2018. Lycopene and Vascular Health. Frontiers in pharmacology. 9. 521.

Niebur, A. ; Short, P. ; Griffin, J. 2015. A literature review of management approaches based on rate functions associated with yellow perch populations. Wisconsin Department of Natural Resources. Fisheries Management Administrative Report. 81.

Poiroux-Gonord, F. ; P.R. Bidel, L. ; Fanciullino, A.L. ; Gautier, H. ;Lauri-Lopez, F. ; Urban, L. 2010. Health Benefits of Vitamins and Secondary Metabolites of Fruits and Vegetables and Prospects To Increase Their Concentrations by Agronomic Approaches. Journal of agricultural and food chemistry. 58. 12065-12082

Pollard, G. ; Koth, B. ; D Ward, J. 2017. Aquaponics in Urban Agriculture: Social Acceptance and Urban Food Planning. Horticulturae. 3. 39.

Rakocy, J.E. ; Bailey, D.S. ; Shultz, R.C. ; Thoman, E.S. 2010. Update on tilapia and vegetable production in the UVI aquaponic system. Proceedings from the 6th International Symposium on Tilapia in Aquaculture. 1-15.

RÈGLEMENT (CE) No 889/2008 De La Commission, 2018. [en ligne] Disponible sur : https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:02008R0889-20181112&from=EN (Consulté le 25 Mars 2019)

Saure, M.C. 2001. Blossom-end rot of tomato (Lycopersicon esculentum Mill.) — a calcium- or a stress-related disorder? Horticulturae. 90. 193-208.

Saure, M.C. 2014. Why calcium deficiency is not the cause of blossom-end rot in tomato and pepper fruit – a reappraisal. Horticulturae. 174. 151-154.

Schmautz, Z.; Loeu, F.; Liebisch, F.; Graber, A.; Mathis, A.; Griessler Bulc, T.; Junge, R. 2016. Tomato Productivity and Quality in Aquaponics: Comparison of Three Hydroponic Methods. Water 2016. 8. 533.

Silva, L., Valdées-Lozano, D., Escalante, E., Gasca-Leyva, E. 2018. Dynamic root floating technique: an option to reduce electric power consumption in aquaponic systems. J. Clean. Prod. 183. 132-142.

Sinesio, F. ; Cammareri, M. ; Moneta, E. ; Navez, B. ; Peparaio, M. ; Causse, M. ; Grandillo, S. 2010. Sensory Quality of Fresh French and Dutch Market Tomatoes: A Preference Mapping Study with Italian Consumers. Journal of food science. 75. 55-67.

Somerville C.; Moti C.; Edoardo P.; Austin S.; Alessandro L. 2014. Small-Scale aquaponic food production - integrated fish and plant farming. FAO. Italy: Fisheries and Aquaculture Technical Paper Rome. 589.

Soni, R. A. ; Sudhakar, K. ; Rana, R. S. 2017. *Spirulina* – From growth to nutritional product: A review. Trends in Food Science & Technology. 69. 157-171.

Story E.N. ; Kopec R.E. ; Schwartz S.J. ; Harris G.K. 2010. An update on the health effects of tomato lycopene. Food science technology. 1. 189-210.

Suhl, J. ; Dannehl, D. ; Kloas, W. ; Baganz, D. ; Jobs, S. ; Scheibe, G. ; Schmidt, U. 2016. Advanced aquaponics: Evaluation of intensive tomato production in aquaponics vs. conventional hydroponics. Agricultural Water Management. 178. 335–344

TAMAZOUZT, L. 1995. L'alimentation artificielle de la perche *Perca fluviatilis* en milieux confinés (eau recyclée, cage flottante) : incidence sur la survie, la croissance et la composition corporelle. Thèse de doctorat en biologie des organismes: Université de Nancy-I. 131 p. [en ligne] Disponible sur : http://docnum.univ-lorraine.fr/public/SCD_T_1995_0399_TAMAZOUZT.pdf (Consulté le 13 Avril 2019)

Tanguy, H. ; Ferlin, P. ; Suche, J.M. 2008. Rapport final de la mission sur le développement de l'aquaculture, Ministère de l'agriculture et de la pêche, Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du Territoire.

Thorarinsdottir, R.I. 2015. Aquaponics Guidelines. Haskolaprent, Reykjavik, Iceland. 69 pages.

Tidwell, J. ; Coyle, S. ; Evans, J. ; Weibel, C. ; McKinney, J. ; Dodson, K. ; Jones, H. 1999. Effect of Culture Temperature on Growth, Survival, and Biochemical Composition of Yellow Perch Perca fiavescens. Journal of the World Aquaculture Society. 30. 324 - 330.

Urban, L. ; Urban, I. 2010. La production sous serre – Tome 2 : L'irrigation fertilisante en culture hors-sol. Lavoisier. 223 pages.

Villarroel, Morris & Junge, Ranka & Komives, Tamas & König, Bettina & Plaza, Ignacio & Bittsánszky, András & Joly, Agnes. 2016. Survey of Aquaponics in Europe. Water. 8. 468.

Wang, H ; Seekamp, I ; Malzahn, A ; Hagemann, A ; Carvajal, A ; Slizyte, R ; Beate Standal, I ; Handå, A ; Inge Reitan, K. 2019. Growth and nutritional composition of the polychaete Hediste diversicolor (OF Müller, 1776) cultivated on waste from land-based salmon smolt aquaculture. Aquaculture. 502. 10

Yogev, U. ; Barnes, A. ; Gross, A. 2016. Nutrients and Energy Balance Analysis for a Conceptual Model of a Three Loops off Grid, Aquaponics. Water. 8. 10.

ANNEXES

Annexe I : Résumé des analyses Eurofins pour T0, Tinter et Tfinal du bilan de masse 2019

Compartiment	Eau piscicole			Eau horticole		
Mesure	Azote (mg/L)	Phosphore (mg/L)	Potassium (mg/L)	Azote (mg/L)	Phosphore (mg/L)	Potassium (mg/L)
T_0	28,8	2,8	11,3	34,0	3,9	17,1
T_{inter}	39,8	5,7	8,6	33,0	3,1	0,6
T_{final}	40,0	7,1	10,1	29,0	3,1	0,3

Annexe II : Paramètres relevés et zones de prélèvements du bilan de masse 2019

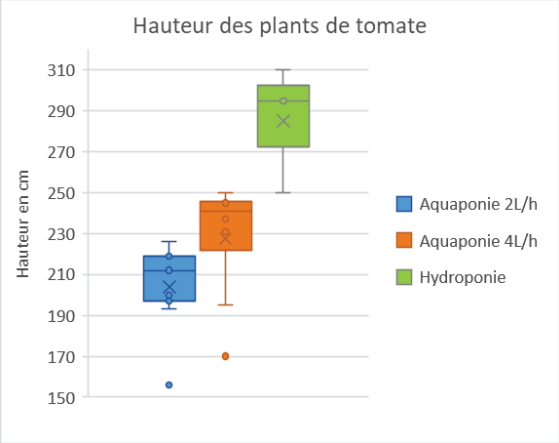
		Zones de mesure					Fréquence	
Paramètre	Outils de mesure	Compartiment piscicole le plus chargé	Amont Raft 1	Aval Raft 1	Fosse horticole	Fosse piscicole	1 fois par semaine	Tous les matins
pH	Sonde Hach	✓	✓	✓				✓
	Sonde Hoogendoorn	✓					✓	
Température	Sonde Hach	✓	✓	✓				✓
	Sonde Hoogendoorn	✓					✓	
Concentration en oxygène	Sonde Hach	✓	✓	✓				✓
	Sonde Hoogendoorn	✓					✓	
Conductivité	Sonde Hach	✓	✓	✓				✓
Potentiel Redox	Sonde Hach	✓	✓	✓				✓
NH4	Microméthode Hach (spectro -photomètre)					✓	✓	
NO2						✓		
NO3					✓	✓		
PO4					✓	✓		

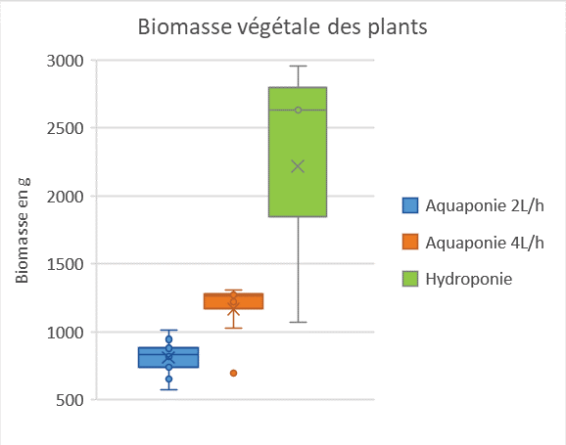
Annexe III : Paramètres relevés et zones de prélèvements de l'expérimentation sur les tomates, 2019

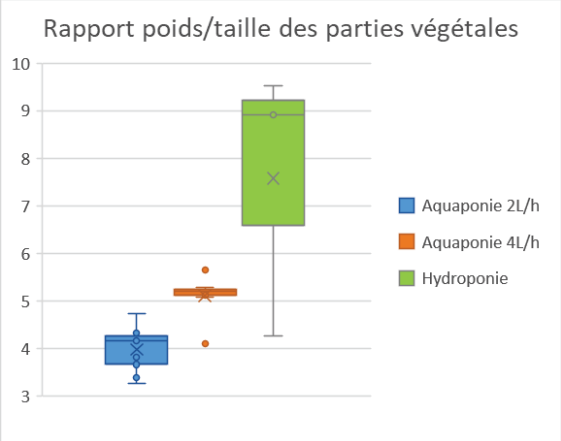
		Zones de mesure					Fréquence	
Paramètre	Outils de mesure	Bac piscicole le plus chargé	Amont Raft 1	Aval Raft 1	Fosse horticole	Fosse piscicole	1 fois par semaine	Tous les matins
pH	Sonde Hach	✓	✓	✓				✓
	Sonde Hoogendoorn	✓					✓	
Température	Sonde Hach	✓	✓	✓				✓
	Sonde Hoogendoorn	✓					✓	
Concentration en oxygène	Sonde Hach	✓	✓	✓				✓
	Sonde Hoogendoorn	✓					✓	
Conductivité	Sonde Hach	✓	✓	✓				✓
Potentiel Redox	Sonde Hach	✓	✓	✓				✓
NH4	Microméthode Hach (spectro - photomètre)					✓	✓	
NO2						✓		
NO3					✓	✓		
PO4					✓	✓		
Mg					✓	✓		
Fe	Microméthode Macherey-Nagel (spectrophotomètre)				✓			
K					✓	✓		

Annexe IV : Résultats des récoltes de l'expérimentation des tomates « Cobra » en hydroponie et aquaponie

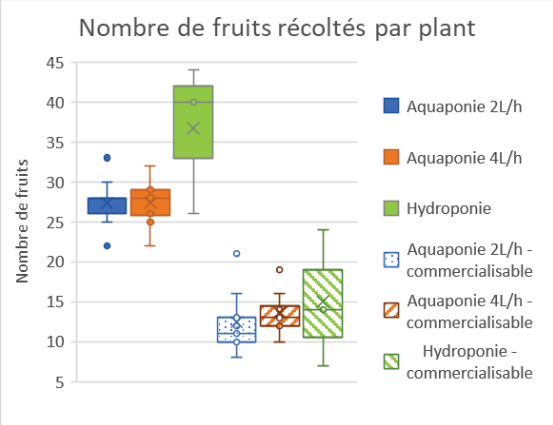
- **Résultats des récoltes des parties végétatives à Tf_{inal}**

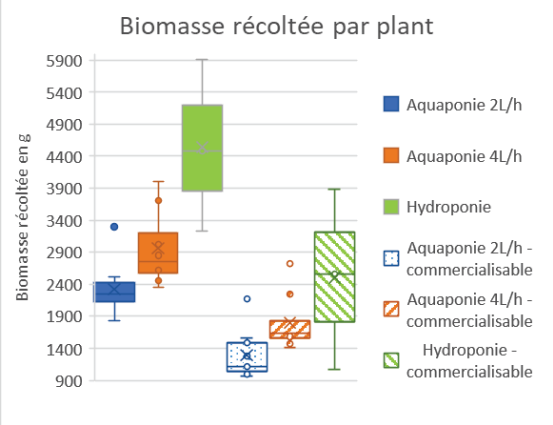






- **Résultats des récoltes des fruits**

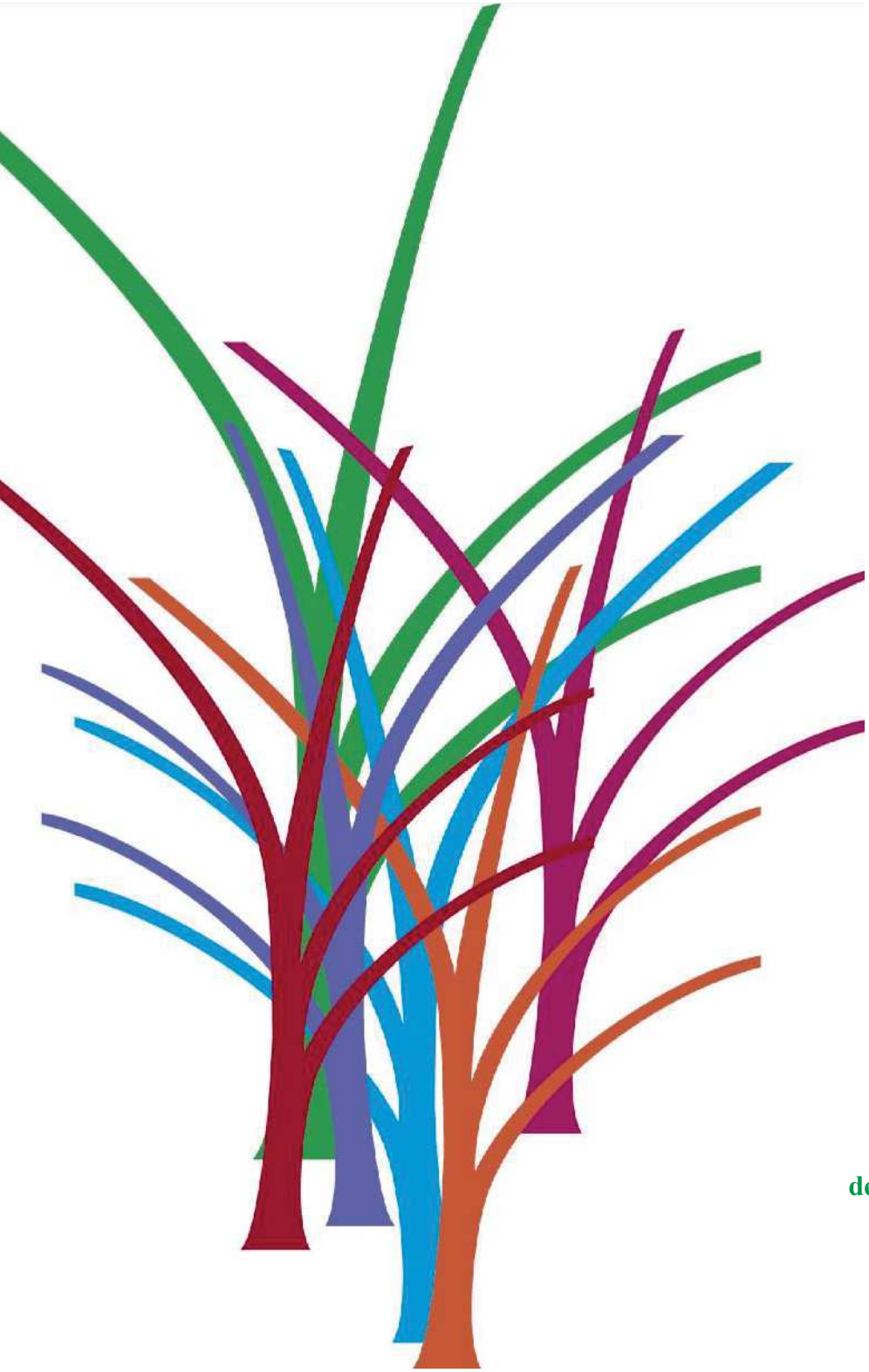




Annexe V : Bilan du CTIFL pour la caractérisation sensorielle et nutritionnelle des lots de tomates (modalités hydroponie, aquaponie et pleine terre

CARACTERISATION SENSORIELLE DE 3 LOTS DE TOMATE SELON MODE DE CULTURE

Essai réalisé du 12 au 30 juillet 2019 - Date d'émission du rapport : 06 août 2019
Responsable essai : Valentine Cottet,Christophe Aubert
Participants : Valentine Cottet, Aline Chagnard, (CTIFL Centre de Balandran) ; Christophe AUBERT, Guillaume CHALOT *(CTIFL Centre de Saint-Remy de Provence)*



Valentine Cottet
Laboratoire d'évaluation sensorielle
Centre de Balandran
751 Chemin de Balandran
30127 Bellegarde
Tel : 04 66 01 10 54
Email : cottet@ctifl.fr

Ctifl

Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes

SOMMAIRE

But de l'essai VIII

Partie 1 : Mesures sensorielles VIII

1. Matériel et méthode VIII

1.1. Analyse descriptive quantitative.....VIII

1.2. Le panel VIII

1.3. Les séances de dégustations.....VIII

1.4. La liste de termes VIII

1.5. Les produits étudiés.....IX

2. Résultats des mesures sensorielles IX

1.1. Moyennes et écart-types IX

1.2. Profils sensoriels X

1.3. Comparaison des modalité deux à deux – Profil et test de Student XI

1.4. Caractérisation des commentaires d'arômes et de texture XII

3. Conclusion XIII

Partie 2 : Analyses des composés d'intérêts nutritionnels..... XIV

1. Objectif..... XIV

2. Matériel et méthodes..... XIV

1.1. Matériel végétal XIV

1.2. Méthodes XIV

3. Résultats et discussion XIV

4. Conclusion XV

But de l'essai

Dans le cadre d'un projet sur l'aquaponie, l'Itavi souhaite réaliser la caractérisation sensorielle et nutritionnelle d'une variété de tomate issue de 3 modes de culture : aquaponie, hydroponie et pleine terre. Ce rapport présente en partie 1, les résultats des mesures sensorielles pour les trois modalités (aquaponie, hydroponie et pleine terre).
Ce rapport présente en partie 2, les résultats des analyses des composés d'intérêt nutritionnel pour deux modalités (aquaponie et pleine terre).

Partie 1 : Mesures sensorielles

Rédacteur : Valentine Cottet

1. Matériel et méthode

1.1. Analyse descriptive quantitative

Cette méthodologie est basée sur la recherche et la quantification de descripteurs appropriés à l'espèce tomate. Elle permet d'élaborer des profils sensoriels. Les dégustations ont lieu dans le laboratoire d'analyse sensorielle du centre Ctifl de Balandran qui répond à la norme ISO 13299 et les profils sensoriels sont réalisés dans le respect de la norme NF V09-105.

1.2. Le panel

Le panel Tomate est constitué de 13 juges, entraînés au cours de 6 séances afin de :

- se familiariser au vocabulaire de l'univers tomate,
- comparer la perception de chacun avec celle des autres,
- mémoriser les textures, les saveurs et les arômes des produits et les comparer à des références.

Le contrôle des performances du panel a eu lieu pour mesurer la répétabilité, la discrimination et l'accord.

1.3. Les séances de dégustations

1 séance de dégustation a été dédiée à cet essai le 12 juillet 2019.
Les produits sont présentés en aveugle aux dégustateurs (identifiés par un code aléatoire à 3 chiffres), en monadique (l'un après l'autre) et dans un ordre différent d'un dégustateur à l'autre (plan d'expérience complet équilibré). Le choix des ordres de présentation permet de limiter les effets d'ordre (équilibrer le nombre de fois où chaque échantillon est dégusté à un rang donné).

1.4. La liste de termes

Le lexique des termes utilisés par les dégustateurs comprend 12 descripteurs qui sont évalués sur une échelle de 0 à 10 (Tableau 1). Des termes complémentaires peuvent être cochés (si le terme s'applique au produit, la notation se fait en binaire, absence = 0 ou présence = 1).

Tableau 1 : Liste des termes évalués et échelle de notation.

	Descripteurs	Echelle
Aspect	Couleur	0 - 10
	Taille	0 - 10
	Caractère côtelé	0 - 10
Texture	Fermeté à la coupe	0 - 10
	Croquant	0 - 10
	Juteux	0 - 10
	Ferme	0 - 10
	Fondant	0 - 10
	Farineux	0 - 10
	Persistance du croquant	0-1
	Epaisseur de la peau	0-1
	Persistance de la peau	0-1
Saveur	Sucré	0 - 10
	Acidité	0 - 10
Arôme	Arôme global	0 - 10

1.5. Les produits étudiés

Les produits (Figure 1) ont été fournis par Itavi. Une même variété (Cobra) a été cultivée selon 3 itinéraires techniques spécifiques : Aquaponie, Hydroponie, Pleine terre.

Figure 1 : Photo des produits évalués pour les mesures sensorielles.

Hydroponie

Aquaponie

Pleine Terre

L'échantillonnage a été réalisé au mieux afin d'obtenir un lot homogène en couleur et calibre pour les mesures sensorielles et les mesures biochimiques.
La modalité Aquaponie présentait du collet jaune important et était hétérogène en calibre. Il y avait peu de fruit dans la modalité Hydroponie qui a donc était caractérisée uniquement en sensorielle.

2. Résultats des mesures sensorielles

1.1. Moyennes et écart-types

La moyenne (M) des notes de chaque juge du panel et les écarts-types (ET) des notes de chaque descripteur figurent dans le **Tableau 2.**

Les écart-types élevés (>2,4), figurent en rouge dans le tableau. Ils peuvent soit être le signe d'une hétérogénéité du lot, soit indiquer une dispersion des notes des juges.

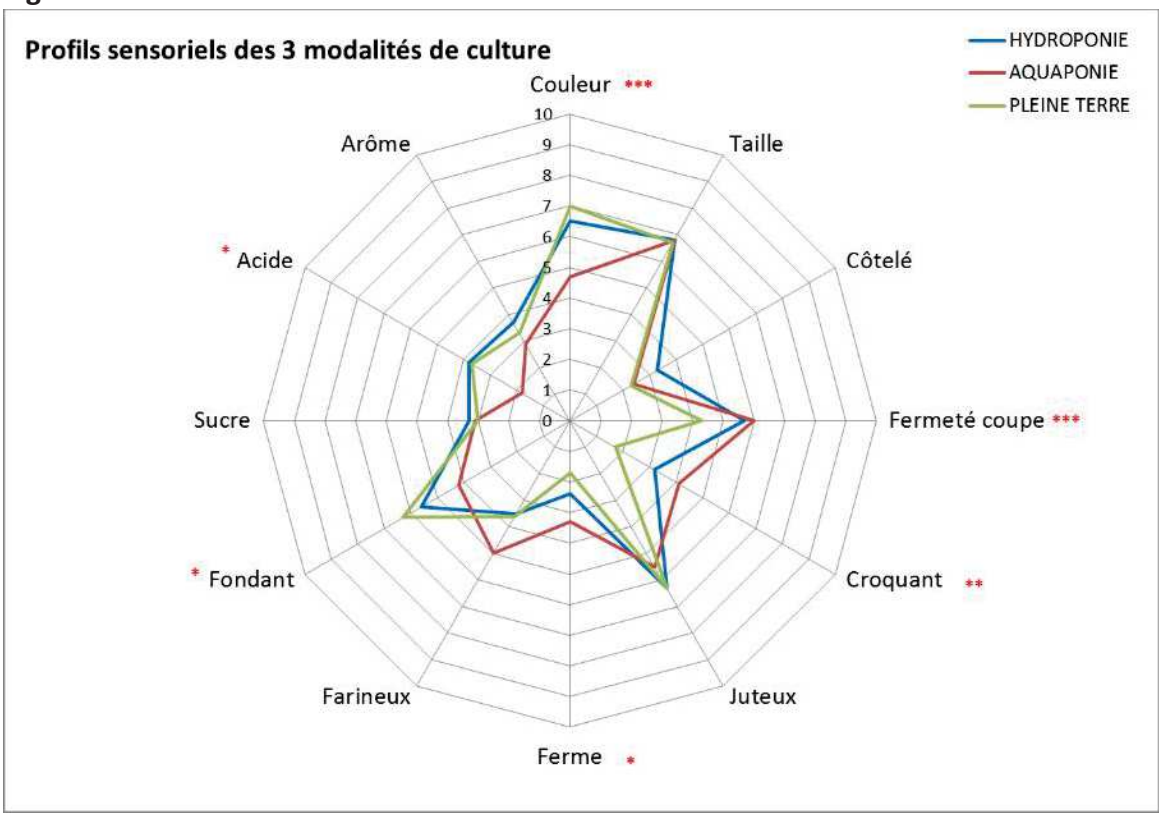
Tableau 2 : Moyennes des notes de chaque descripteur pour les 3 modalités.

	HYDROPONIE		AQUAPONIE		PLEINE TERRE	
	M	*ET*	M	*ET*	M	*ET*
Couleur	6,5	*2,3*	4,7	*1,6*	7,0	*2,1*
Taille	6,8	*1,3*	6,8	*0,9*	6,7	*1,2*
Côtelé	3,3	*2,1*	2,4	*1,4*	2,3	*1,8*
Fermeté coupe	5,7	*1,0*	6,0	*0,9*	4,3	*0,9*
Croquant	3,2	*1,6*	4,1	*2,1*	1,7	*1,7*
Juteux	6,3	*1,2*	5,5	*1,5*	6,3	*1,4*
Ferme	2,4	*1,4*	3,3	*1,6*	1,7	*1,3*
Farineux	3,5	*3,0*	5,0	*3,2*	3,6	*3,0*
Fondant	5,6	*2,7*	4,2	*3,3*	6,3	*3,1*
Sucre	3,3	*2,0*	3,1	*2,0*	3,0	*2,1*
Acide	3,8	*2,2*	1,8	*2,2*	3,7	*2,3*
Arôme	3,7	*2,3*	2,9	*2,3*	3,3	*2,3*

1.2. Profils sensoriels

Les profils sensoriels des 3 modalités sont construits à partir des notes moyennes de chaque descripteur (**Figure 2**).

Figure 2 : Profils sensoriels des 3 modes de culture.



Les profils des 3 modalités se différencient sur plusieurs critères et principalement sur l'aspect et la texture (Tableau 3). Ce sont principalement les modalités aquaponie et pleine terre qui se différencient. Les profils de la modalité hydroponie et pleine terre sont proches et ne sont pas significativement différents.

Tableau 3 : P-value de l'analyse de variance et test de Newman Keuls pour chaque descripteur.

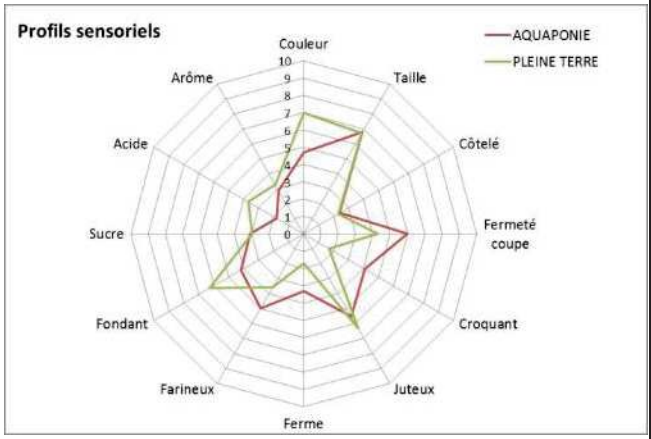
	HYDROPONIE		AQUAPONIE		PLEINE TERRE		Proba. Produits	Sign
Couleur	6,5	*a*	4,7	*b*	7,0	*a*	<0,0001	***
Taille	6,8		6,8		6,7		0,9615	
Cotele	3,3		2,4		2,3		0,0726	
Fermete coupe	5,7	*a*	6,0	*a*	4,3	*b*	0,0010	***
Croquant	3,2	*a*	4,1	*a*	1,7	*b*	0,0046	**
Juteux	6,3		5,5		6,3		0,1342	
Ferme	2,4	*ab*	3,3	*a*	1,7	*b*	0,0445	*
Farineux	3,5		5,0		3,6		0,2919	
Fondant	5,6	*ab*	4,2	*b*	6,3	*a*	0,0440	*
Sucre	3,3		3,1		3,0		0,8852	
Acide	3,8	*a*	1,8	*b*	3,7	*a*	0,0173	*
Arome	3,7		2,9		3,3		0,4842	

Les modalités ayant la même lettre appartiennent au même groupe et ne sont donc pas significativement différentes

Il y a une différence significative entre les modalités pour les critères couleur, fermeté à la coupe, croquant, ferme, fondant et acide (différence significative à 5%). La modalité aquaponie a été perçue significativement moins colorée et moins acide que les 2 autres modalités. Elle a été perçue plus ferme et moins fondante que la modalité pleine terre. Elle a une valeur moyenne pour le critère farineux également plus élevée mais la différence n'est pas significative (tous les fruits n'étaient pas farineux).
La modalité pleine terre a été perçue significativement moins ferme et moins croquante que les 2 autres modalités.

1.3. Comparaison des modalités deux à deux – Profil et test de Student

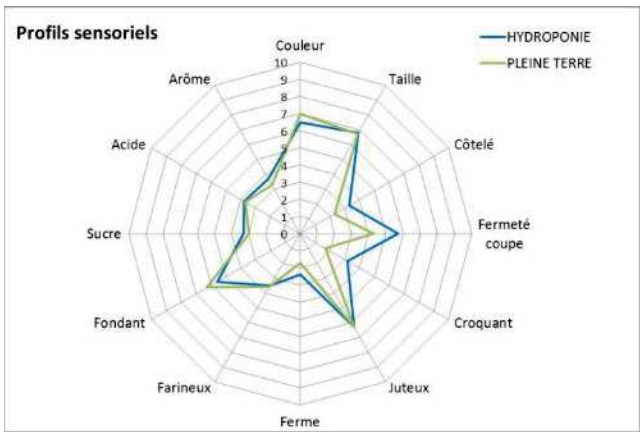
Figure 4 : Profils des modalités Aquaponie et Pleine terre et tests de Student associés.



Attribut	AQUAPONIE	PLEINE TERRE	T calc.	Proba.	Sign
Couleur	4,7	7	6,27	0,0001	***
Taille	6,8	6,7	0,23	0,8227	NS
Côtelé	2,4	2,3	0,32	0,7577	NS
Fermeté coupe	6	4,3	4,64	0,0012	**
Croquant	4,1	1,7	3,67	0,0051	**
Juteux	5,5	6,3	2,06	0,0697	NS
Ferme	3,3	1,7	2,67	0,0258	*
Farineux	5	3,6	1,37	0,2048	NS
Fondant	4,2	6,3	2,97	0,0156	*
Sucre	3,1	3	0,15	0,8825	NS
Acide	1,8	3,7	2,53	0,0324	*
Arôme	2,9	3,3	0,48	0,6424	NS

La modalité aquaponie a été perçue significativement moins colorée, plus ferme et plus croquante que la modalité pleine terre.

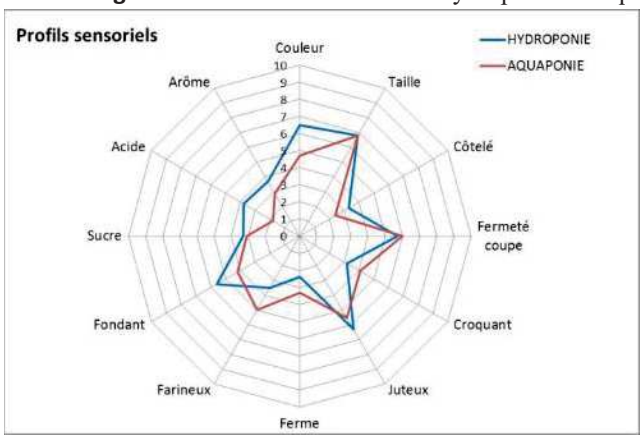
Figure 5 : Profils des modalités Hydroponie et Pleine terre et tests de Student associés.



Attribut	HYDROPONIE	PLEINE TERRE	T calc.	Proba.	
Couleur	6,5	7	1,25	0,2443	NS
Taille	6,8	6,7	0,23	0,8227	NS
Côtelé	3,3	2,3	1,94	0,0848	NS
Fermeté coupe	5,7	4,3	3,5	0,0067	**
Croquant	3,2	1,7	2,36	0,0429	*
Juteux	6,3	6,3	0	>0,9999	NS
Ferme	2,4	1,7	1,77	0,1108	NS
Farineux	3,5	3,6	0,08	0,9376	NS
Fondant	5,6	6,3	0,9	0,3901	NS
Sucre	3,3	3	0,56	0,5911	NS
Acide	3,8	3,7	0,14	0,8929	NS
Arôme	3,7	3,3	0,71	0,4945	NS

La modalité pleine terre, a été perçue significativement moins ferme à la coupe et moins croquante que la modalité hydroponie.

Figure 6 : Profils des modalités Hydroponie et Aquaponie et tests de Student associés.



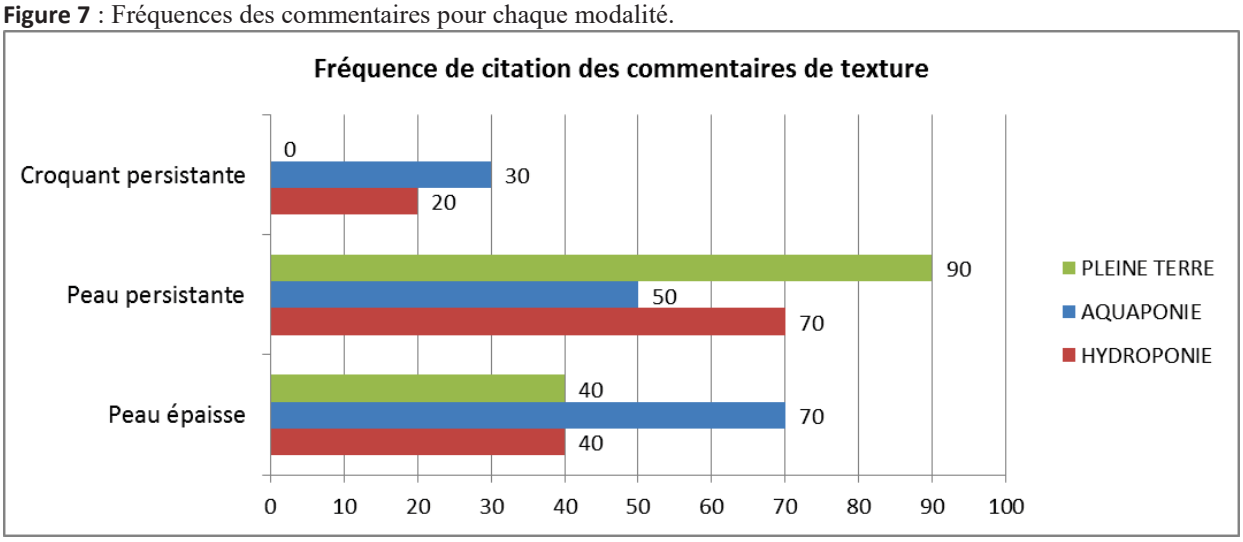
Attribut	HYDROPONIE	AQUAPONIE	T calc.	Proba.	Sign
Couleur	6,5	4,7	4,63	0,0012	**
Taille	6,8	6,8	0	>0,9999	NS
Côtelé	3,3	2,4	1,87	0,0947	NS
Fermeté coupe	5,7	6	0,71	0,4961	NS
Croquant	3,2	4,1	1,49	0,1708	NS
Juteux	6,3	5,5	1,56	0,1527	NS
Ferme	2,4	3,3	1,25	0,244	NS
Farineux	3,5	5	1,93	0,086	NS
Fondant	5,6	4,2	1,63	0,1376	NS
Sucre	3,3	3,1	0,31	0,764	NS
Acide	3,8	1,8	3,16	0,0115	*
Arôme	3,7	2,9	1,56	0,1527	NS

La modalité Aquaponie a été perçue plus claire et moins acide que la modalité Hydroponie.

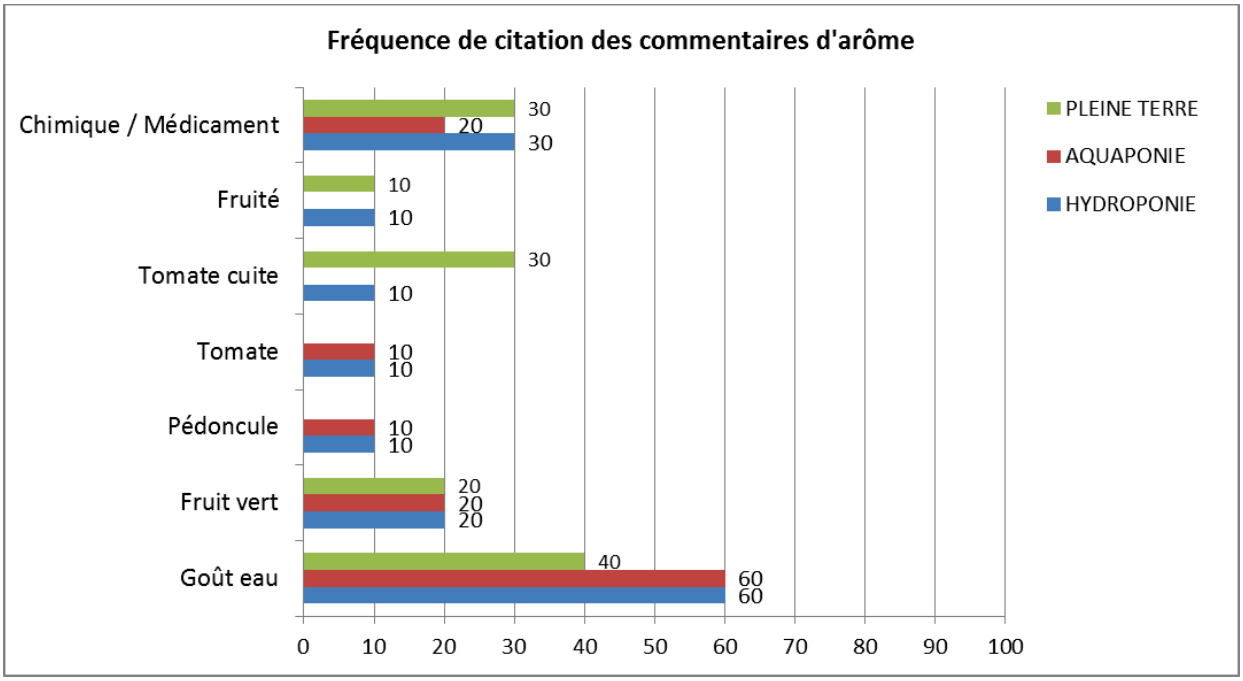
1.4. Caractérisation des commentaires d'arômes et de texture

Une liste pré-établie de commentaires d'arômes et de texture sont proposés au dégustateurs. Cette approche permet d'apporter des informations supplémentaires à la caractérisation des modalités. Pour chacun des lots, les fréquences d'apparition de ces commentaires sont présentées **Figure 7**.

Figure 7 : Fréquences des commentaires pour chaque modalité.



La modalité pleine terre a été caractérisée avec une peau persistante.
La modalité aquaponie a été caractérisée avec une peau épaisse.



Les modalités hydroponie et aquaponie ont été caractérisées avec un arôme goût eau.

3. Conclusion

Les profils des 3 modalités se différencient principalement sur l'aspect (la couleur) et la texture. C'est la modalité aquaponie qui se différencie davantage des deux autres modalités. Elle a été perçue significativement moins colorée et moins acide. Elle a également été perçue plus ferme et plus croquante que la modalité pleine terre. La présence de collet jaune important est surement en lien avec la perception de la texture ferme.
La modalité pleine terre a été perçue significativement moins ferme et moins croquante que les 2 autres modalités et avec une peau persistante.

****

Partie 2 : Analyses des composés d'intérêts nutritionnels

Responsable essai et rédacteur : Christophe AUBERT

1. Objectif

A la demande de l'ITAVI, l'objectif de cette étude était de déterminer pour une variété de tomate (Cobra) produite selon deux modes de culture (aquaponie / sol), les valeurs de matière sèche, d'indice réfractométrique, d'acidité titrable ainsi que les teneurs en sucres (saccharose, glucose, fructose) et en acides organiques (acide malique, citrique). Au niveau des composés d'intérêt nutritionnel, les teneurs en vitamine C (acide ascorbique et déhydroascorbique), ainsi que celles des principaux caroténoïdes (lycopène, bêta-carotène, phytoène, et lutéine) et des principaux composés polyphénoliques (flavonoïdes et acides phénoliques) ont également été déterminées. Des photos des différents lots ainsi que des mesures de fermeté et de colorimétrie ont également été réalisées à titre commercial.

2. Matériel et méthodes

1.1. Matériel végétal

A réception, les différentes modalités de tomate constituées de 30 fruits ont été conservées 24h à 18°C puis photographiées (**Figure 8**). Trois fois 10 fruits ont ensuite été prélevés aléatoirement au sein de chaque modalité afin de constituer trois répétitions agronomiques de 10 fruits.

1.2. Méthodes

Pour chaque répétition agronomique, des mesures de fermeté (Durofel 25) ont été réalisées à raison de 2 mesures diamétralement opposées dans le plan équatorial de chaque fruit, et des mesures colorimétriques (Minolta L*a*b*) ont été réalisées à raison d'une mesure faite à l'opposé de la cavité pédonculaire. Les fruits de chaque répétition ont ensuite été coupés en quatre et deux quarts opposés de chaque fruit ont été broyés sous azote liquide (-196 °C), réduits en poudre cryogénique et conservés au congélateur à -80°C avant analyse. Toutes les méthodes utilisées dans le cadre de cette étude pour les analyses biochimiques sont adaptées de celles précédemment décrites par Aubert et al. (2018)[1]. Une analyse de variance à un facteur a été réalisée entre les différents lots. Les résultats donnés en Tableau 1 sont exprimés en poids frais.

3. Résultats et discussion

Comme observé **Figure 8**, des différences de couleur notables ont été notées entre les deux échantillons ainsi que la présence de collets jaunes importants autour de la cavité pédonculaire pour les échantillons aquaponie. Ces observations sont confirmées par des valeurs d'angle de teinte (H) plus faibles pour ces derniers (**Tableau 4**). Au toucher, ces mêmes échantillons étaient bien plus fermes que les échantillons sol ce qui est également confirmé par les mesures de fermeté Durofel (**Tableau 4**). Comme indiqué **Tableau 4**, si aucune différence significative n'a été observé entre les échantillons au niveau des valeurs de matière sèche et d'indice réfractométrique, les teneurs en glucose, fructose et sucres totaux étaient environ 18% significativement plus élevées dans les échantillons aquaponie ($p<0.01$). Les résultats montrent également que la valeur d'acidité titrable dans les échantillons sol était 1.8 fois plus élevée que celle observée dans les échantillons aquaponie ($p<0.01$). Ces résultats sont cohérents avec les teneurs en acide citrique significativement plus élevées

[1] Aubert C., Chalot G. Chemical composition, bioactive compounds, and volatiles of six table grape varieties (Vitis vinifera L.). Food Chemistry, 2018, 240, pp 524-533.

(+54%) dans les échantillons sol ($p<0.01$). Ces résultats sont à rapprocher de ceux obtenus en analyse sensorielle.
Concernant les composés d'intérêt nutritionnel, la teneur en acide ascorbique, qui représente plus de 90% de la vitamine C totale dans les échantillons, a été trouvée pour être 50% plus élevée dans les échantillons aquaponie que dans les échantillons sol. A contrario, les teneurs en lycopène, caroténoïde qui représente plus de 85% des caroténoïdes totaux dans les échantillons, et celle en phytoène (4-7%) étaient respectivement 2 et 3 fois plus faibles dans les échantillons aquaponie que celles observées dans les échantillons sol. Le lycopène étant responsable de la couleur rouge de la tomate, ces résultats sont cohérents avec les différences de couleur observées précédemment. Au niveau des tocophérols, si des différences significatives ont été observées pour les formes □ et □, globalement aucune différence significative n'a été mise en évidence au niveau de la teneur en vitamine E totale. Enfin, au niveau des composés polyphénoliques, les résultats montrent que les teneurs en acide chlorogénique, en acide cryptochlorogénique, en quercetine-3-rutinoside, et en acide coumarique hexoside, composés qui représentent 75 à 80% des polyphénols dans les échantillons, étaient de 2.2 à 2.7 fois plus élevées dans les échantillons aquaponie que dans les échantillons sol.

4. Conclusion

Bien que plus fermes et moins colorés, les échantillons aquaponie ont plus de sucres et moins d'acides organiques que les échantillons sol. Concernant les composés d'intérêt nutritionnel, si les échantillons aquaponie ont d'une manière générale une teneur en caroténoïdes totaux bien plus faible que celle observée dans les échantillons sol, les résultats sont inversés pour la teneur en vitamine C et en polyphénols totaux.

~.~.~.~

Tableau 4: Caractéristiques physicochimiques[a] des deux lots de tomates.

	Sol	Cobra	Aquaponie	Pb
L*	36.9 (0.4)		40.4 (1.3)	*
a*	23.4 (0.1)		26.0 (0.9)	**
b*	19.8 (0.3)		26.1 (1.5)	**
Saturation (C)	30.7 (0.3)		36.9 (1.7)	**
Angle de teinte (H)	40.4 (0.4)		44.8 (0.9)	**
Fermeté (ID 25)	49.8 (1.8)		59.0 (1.7)	**
Matière sèche (%)	5.9 (0.2)		5.9 (0.3)	ns
Indice réfractométrique (°Brix)	5.0 (0.2)		4.7 (0.1)	ns
Acidité titrable (meq/100g)	6.4 (0.6)		3.5 (0.2)	**
Sucres (g/100g)				
Saccharose	0.01 (0.00)		0.02 (0.00)	**
Glucose	1.35 (0.03)		1.60 (0.06)	**
Fructose	1.43 (0.04)		1.68 (0.07)	**
Total	**2.79 (0.06)**		**3.31 (0.13)**	****
Acides organiques (g/100g)				
Acide citrique	0.40 (0.04)		0.26 (0.02)	**
Acide malique	0.04 (0.00)		0.04 (0.00)	ns
Total	**0.43 (0.04)**		**0.30 (0.02)**	****
Vitamine C (mg/100g)				
Acide ascorbique	14.33 (0.33)		21.58 (0.76)	***
Acide déhydroascorbique	1.33 (0.73)		1.77 (0.20)	ns
Total	**15.66 (0.77)**		**23.34 (0.79)**	*****
Caroténoïdes (mg/100g)				
Phytoene	0.38 (0.02)		0.11 (0.01)	***
Lutéine	0.03 (0.00)		0.03 (0.00)	ns
Lycopène	4.23 (0.19)		2.23 (0.04)	***
-Carotène	0.18 (0.01)		0.20 (0.02)	ns
Total	**4.82 (0.18)**		**2.57 (0.01)**	*****
Vitamine E (mg/100g)				
-Tocophérol	0.014 (0.001)		0.003 (0.001)	***
-Tocophérol	0.14 (0.03)		0.10 (0.03)	ns
-Tocophérol	0.13 (0.01)		0.20 (0.01)	***
Total	**0.28 (0.02)**		**0.31 (0.04)**	**ns**
Polyphénols (mg/100g)				
Rutin pentoside	0.50 (0.05)		0.59 (0.13)	ns
Quercetin-3-rutinoside	0.66 (0.11)		1.47 (0.42)	*
Phloretin dihexoside	0.11 (0.01)		0.15 (0.03)	ns
Naringenin	0.15 (0.03)		0.06 (0.03)	*
Naringenin chalcone	0.16 (0.04)		0.09 (0.04)	ns
Flavonoïdes	**1.57 (0.20)**		**2.37 (0.64)**	**ns**
Caffeic acid hexoside I	0.68 (0.10)		0.53 (0.09)	ns
Caffeic acid hexoside II	0.57 (0.06)		0.33 (0.04)	**
Coumaric acid hexoside	0.45 (0.05)		0.97 (0.13)	**
Chrlorogenic acid	1.02 (0.17)		2.76 (0.49)	**
Cryptochlorogenic acid	0.49 (0.03)		1.01 (0.16)	**
Coumaroyl quinic acid	0.01 (0.00)		0.02 (0.01)	ns
Dicaffeoyl quinic acid	0.05 (0.01)		0.16 (0.05)	*
Tricaffeoylquinic acid	0.05 (0.01)		0.12 (0.05)	ns
Acides phénoliques	**3.32 (0.30)**		**5.90 (0.75)**	**
Total	**4.90 (0.33)**		**8.26 (1.36)**	*

[a] moyenne et écart-type entre parenthèses (n=3). [b] ns (non significatif), * (p<0.05), ** (p<0.01), *** (p<0.001)

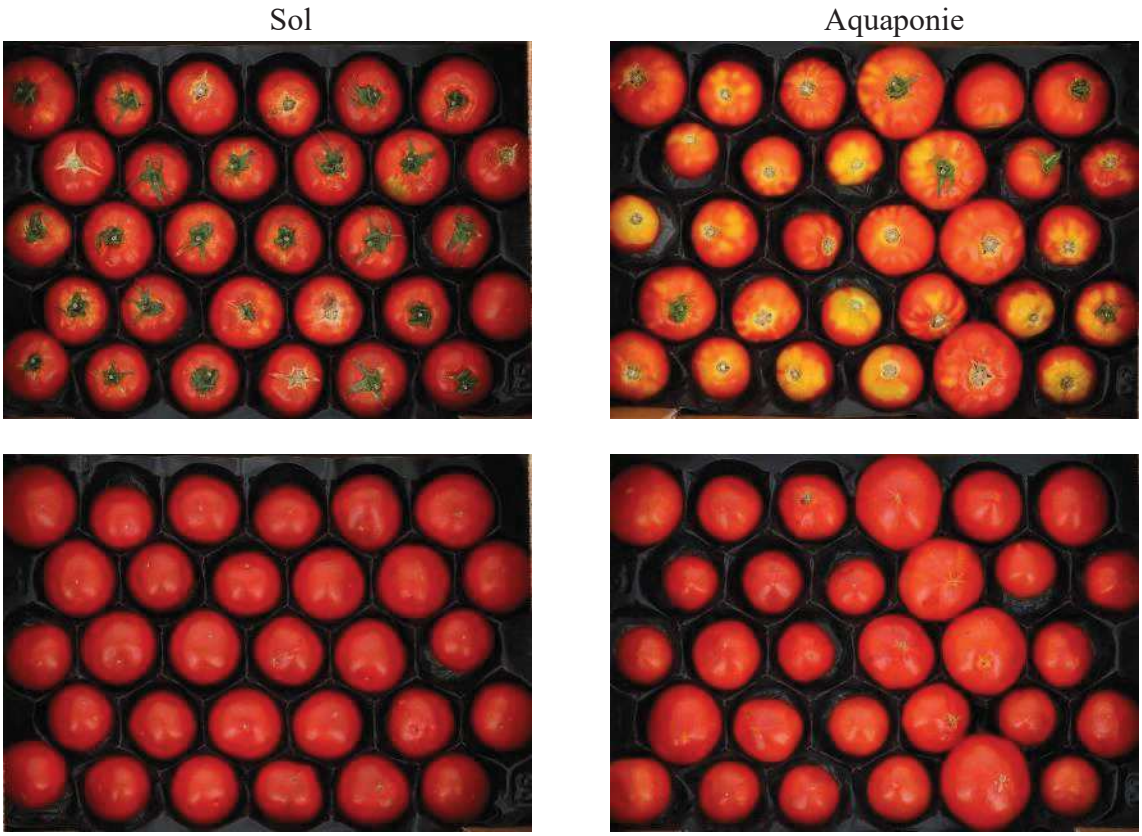
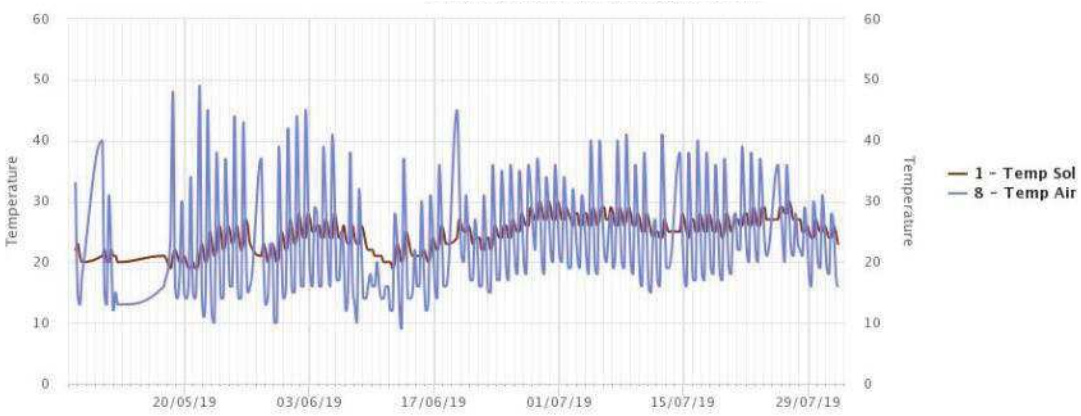


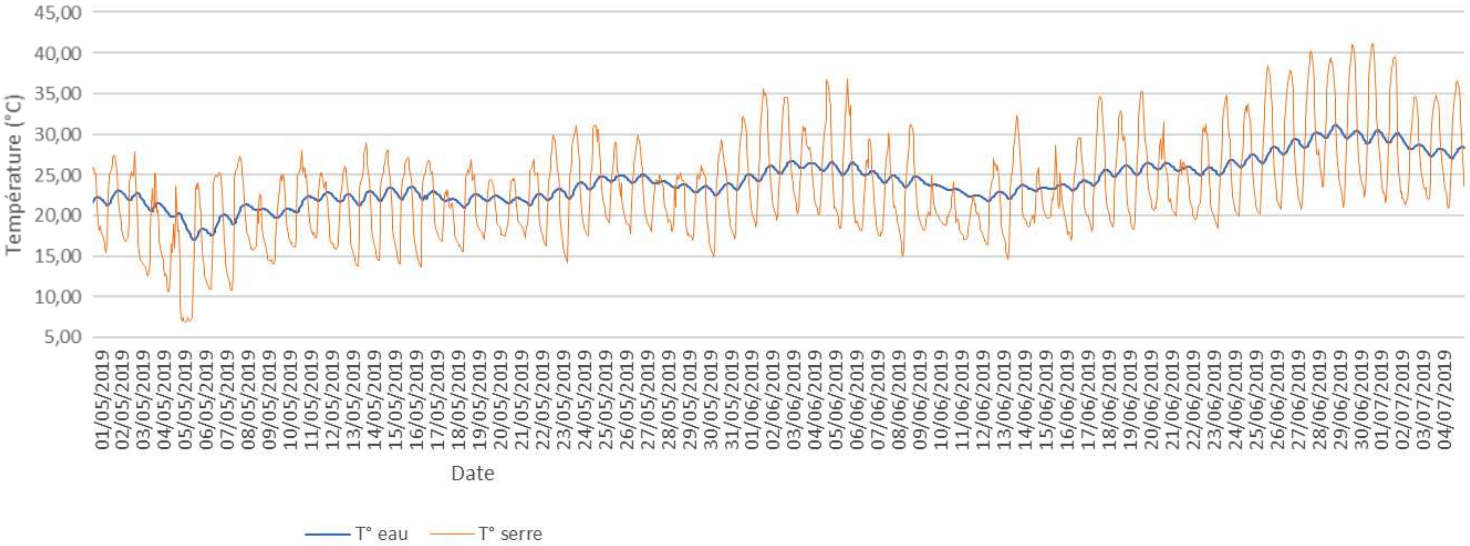
Figure 8 : Différentes vues des deux échantillons de tomates.

Annexe VI : Evolution des températures dans les serres

Evolution de la température du sol et de l'air de la serre « Pleine terre »



Evolution de la température piscicole et de la température de l'air de la serre aquaponique



Annexe VII: Bilan du screening végétal 2019

Etablissement du potentiel phyto épuratoire d'une large palette végétale

Afin d'obtenir des données d'abattement de nombreuses autres espèces végétales, une approche différente de celle du bilan de masse était à mettre en place, celui-ci étant trop spécifique. Etudier une large palette végétale afin de recueillir des informations similaires obtenues pour les salades et épinards lors du bilan de masse permettrait de recueillir des données de dimensionnement adaptées à plusieurs espèces végétales. L'objectif est donc :

- D'obtenir des données d'abattement en azote, phosphore et potassium de nombreuses plantes (en grammes par mètre carré et par jour) par le biais d'analyses de concentration dans les tissus végétaux, afin de mesurer leur potentiel phytoépuratoire, mais aussi d'observer la dynamique d'abattement entre les compartiments piscicole et végétal.
- De tester la ration « optimum » aliment-plantes (25g/m²/jour en moyenne) obtenue suite au bilan de masse, dans un contexte de polyculture.
- De recueillir des données technico-économiques (rendement, temps passés sur l'itinéraire de culture…).

I. Matériel et méthodes

A. Dispositif expérimental

L'expérimentation s'est déroulée d'Avril à Août 2019. Les plants étaient disposés dans les rafts du pilote aquaponique expérimental du RATHO. Les volets de la serre avaient pour consigne de s'ouvrir si la température de l'air dans la serre dépassait 20°C (volets à l'abri du vent) ou 24°C (volets exposés au vent). Les écrans d'ombrage se fermaient pour un rayonnement supérieur à 650W/m² ou une température nocturne inférieure à 12°C.

B. Plantes employées

De nombreux autres plants de variétés différentes ont été disposés afin d'obtenir une large palette végétale dans le système, l'objectif étant l'analyse de la capacité phytoépuratoire en NPK de nombreuses variétés :

- Herbes aromatiques (basilic, basilic grec, persil plat et persil frisé, menthe, sauge, oseille, verveine, mélisse citronnelle, citronnelle, moutarde)
- Cultures à forte valeur ajoutée (bourrache)
- Légumes feuilles (choux chinois, choux mizuna, scarole, frisée, bettes, cresson des fontaines et cresson alénois)
- Légumes bulbes (oignons jaunes)
- Légumes racines (céleri rave, betteraves)
- Rhizomes (curcuma, gingembre)
- Légumes fruits aux besoins plus importants (poivrons jaunes, poivrons violets, physalis, tomates)

Les rhizomes et une partie des betteraves ont été disposés dans des caisses remplies de billes d'argiles (substrat de type « média ») mises en place à l'extrémité avale des rafts afin de permettre une filtration mécanique des eaux sortant des bassins "rafts", riches en matière organique et débris végétaux, susceptibles de colmater la pompe de reprise de la fosse horticole. Les tomates étaient en goutte-à-goutte sur substrat de perlite, irriguées à hauteur de 2 et 4L/h.

C. Paramètres étudiés

- Rendements

Des rendements par surface étaient estimés dans les différentes cas, en termes de biomasse par mètre carré. Cette information était importante dans le contexte de recueil de données technico économiques pour le dimensionnement des systèmes aquaponiques.

- Analyse physico-chimique de la partie végétative des plants en rafts

Afin de pouvoir réalise un bilan complet de l'extraction de NPK des plants du système aquaponique, des échantillons étaient conservés pour être analysés par les laboratoires Eurofins et connaître leur composition en azote, phosphore et potassium (entre autres).
Des récoltes régulières étaient réalisées au fur et à mesure, en fonction de la maturité des plants. La biomasse récoltée était pesée et échantillonnée. Pour les plants des rafts, à chaque récolte un échantillon d'au moins 300 g était conservé et ajouté aux échantillons précédents afin de pouvoir être envoyé en analyse. Les échantillons des récoltes étaient conservés au congélateur

- Physico-chimie des compartiments

L'intégralité des paramètres de suivi physico-chimique ont été notés dans un document de suivi du système sur un Excel en ligne qui recense toutes les données physico-chimiques, végétales et piscicoles depuis le lancement du système en 2015.

Tous les matins était effectué un relevé du pH, de la température, de la conductivité, la concentration en oxygène et le potentiel Redox de l'eau à l'aide de sondes portatives. Ces mesures éteint effectuées dans un bac d'élevage piscicole, en amont et en aval d'un des deux rafts. Chaque semaine un suivi des nutriments présents dans les différents compartiments était réalisé. Les tests étaient à base de réactifs dans des microtubes, lisibles au spectrophotomètre de la marque HACH Lange GMBH ou MACHEREY-NAGEL. Les tests réalisés concernaient :

- Le $N\text{-}NH_4$, $N\text{-}NO_2$, $N\text{-}NO_3$, $P\text{-}PO_4$, K^+ pour la partie piscicole
- $N\text{-}NO_3$, $P\text{-}PO_4$, K^+ et Fe pour la partie horticole

Les analyses initiales (T_0), intermédiaires (T_{inter}) et finales (T_{final}) de l'eau du système et du réseau étaient réalisées par les laboratoires Eurofins.

Un mix d'éléments traces de la marque ICL- Micromax WS apportait les oligoéléments supplémentaires nécessaires au bon fonctionnement du système : Bore, Cuivre, Fer, Manganèse, Molybdène et Zinc. Un ajout tous les dix jours à hauteur de 660g (33g/m^3) était réalisé dans la partie végétale du fait de l'observation de carences dans les expérimentations précédentes.

II. Résultats

- Physico-chimie

La physico-chimie du compartiment végétal après le 26 Juillet n'a pas été considérée pour l'expérimentation du fait de la perte de la pompe alimentant les rafts. Pour des raisons d'analyses, les résultats ont été comptabilisés jusqu'au premier Août.

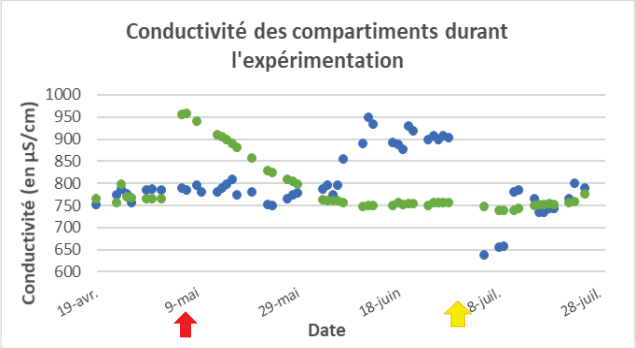


Figure 1 : Conductivité dans les différents compartiments durant l'expérimentation

Durant l'expérimentation le pH du compartiment aquacole a varié de 7.7 à 5.7. Un ajout de 1 kg de bicarbonate de potassium a été effectué les 7 et 12 Juin, les 9 et 23 Juillet afin de rétablir le niveau de pH qui était passé en-dessous de 6.2. L'oxygène a varié entre 6.0 et 8.5 mg/L. Concernant la conductivité, celle-ci s'est stabilisée autour de 900 en semaine 24. La chute observée le 28/06 figure 1 est due à la canicule ayant entraîné la décision d'augmenter l'ouverture du système afin de limiter la montée en température de l'eau piscicole, résultant ainsi à une dilution des nutriments présents.

Le pH du compartiment horticole est resté stable entre 7.7 et 8.2. L'oxygène a varié entre 5.5 et 7.4, chutant à 1.7 lors de l'arrêt de la pompe horticole. Le 6 Mai, un ajout NPK a été réalisé dans la partie horticole du fait des faibles concentrations de ces éléments. Ces ajouts se sont appuyés sur les expérimentations précédentes en estimant la valeur que l'on aurait dû relever si le système fonctionnait correctement et s'il n'y avait pas eu une absence prolongée de poissons.

La figure 2 présente les résultats de l'évolution des concentrations en éléments azote, phosphore et potassium dans les compartiments piscicole et végétal.

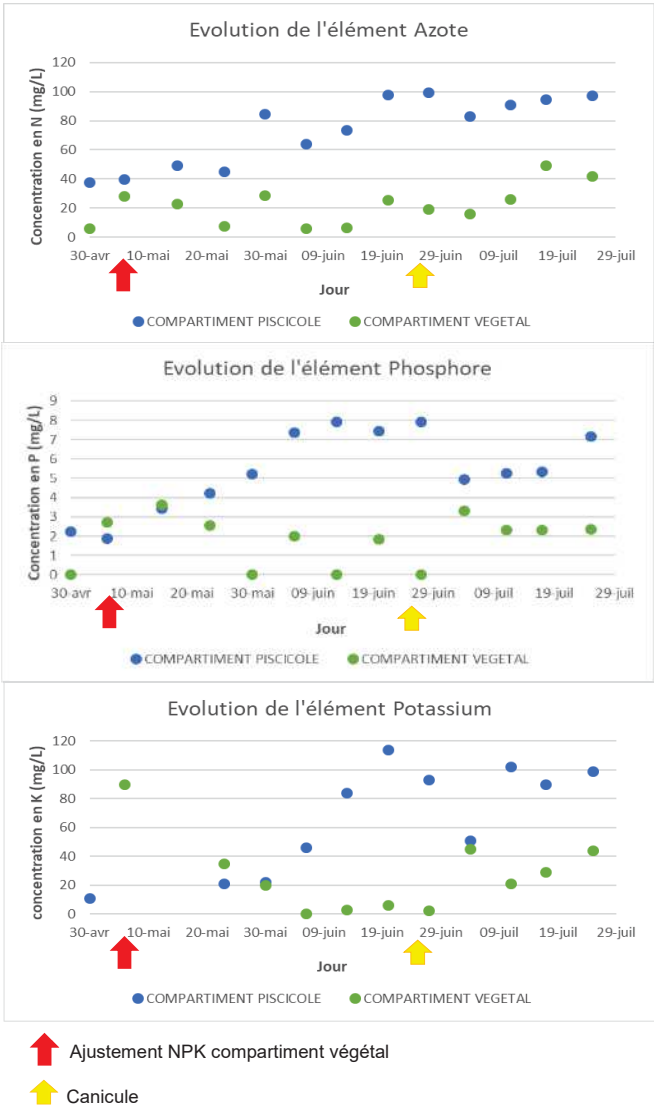


Figure 2 : Graphiques des concentrations en NPK dans les deux compartiments

- Capacité phytoépuratoire du screening

Le bilan du screening végétal de 2019 est présenté Tableau 1.

Les meilleurs rendements en termes de biomasse par surface ont été obtenus par les bettes (18 505 g/m²), le basilic grand vert (14 128 g/m²), le cresson des fontaines (7 739 g/m²), les oignons jaunes (7 358 g/m²) et les poivrons violets (7 267 g/m²). Les moins bons rendements ont été obtenus par le basilic grec (2 043 g/m²), la sauge (2 492 g/m²), le cresson alénois (2 805 g/m²) et le persil plat (3 880 g/m²).

Les quantités de NPK en g/100g dans les produits varient beaucoup entre les variétés. Les tiges et feuilles des poivrons violets et la verveine sont les plus riches en azote. Les racines de chou chinois, la verveine et le basilic grand vert sont les tissus les plus riches en phosphore, et le potassium est présent en plus grandes quantités dans les parties végétales du poivron violet et dans le persil plat.

Tableau 1 : Bilan des extrants du système par phytoépuration

Extrants plants						
Variété	Composition en éléments de la biomasse fraîche			Extraction (g/m²/j)		
	Azote (g/kg)	Phosphore (mg/kg)	Potassium (mg/kg)	N	P	K
Bettes	2,2	190	3400	0,45	0,04	**0,69**
Basilic grand vert	3,5	530	5300	0,39	**0,06**	**0,59**
Basilic grec	3,3	350	3900	*0,07*	0,01	*0,09*
Chou chinois F	2,5	490	3400	**1,36**	**0,27**	**1,86**
Chou chinois R	3,3	1100	2200	*0,06*	0,02	*0,04*
Cresson alénois	5,5	720	4900	0,37	0,05	0,33
Cresson de fontaine	2,8	540	3400	0,28	0,05	0,34
Menthe	5,2	460	4800	**0,59**	0,05	**0,54**
Mizuna	4,5	460	3800	0,37	0,04	0,31
Moutarde	3,9	330	3400	**0,66**	**0,06**	**0,57**
Oignon jaune	2,3	320	2000	0,22	0,03	0,19
Oseille	4,5	480	5200	0,33	0,04	0,38
Persil plat	5	380	8000	0,31	0,02	0,49
Poivron violet (fruits)	1,5	290	2600	0,11	0,02	0,19
Poivron violet (tiges et F)	5,6	260	8500	0,23	0,01	0,35
Frisée F	*3*	*230*	*4800*	**0,50**	0,04	**0,80**
Frisée R	*2,2*	*270*	*1500*	*0,05*	0,01	*0,04*
Scarole F	1	170	4900	0,17	0,03	**0,81**
Scarole R	1,9	250	2000	*0,03*	0,00	*0,03*
Sauge	5,1	380	6300	0,36	0,03	0,45
Tomates cobra 4L/H(fruits)	0	190	1600	*0,00*	0,05	0,39
Tomates cobra 4L/H (tiges et F)	3,4	330	3400	0,08	0,01	0,08
Tomates cobra 2L/H (fruits)	0	210	1700	*0,00*	0,04	0,34
Tomates cobra 2L/H (tiges et F)	2,4	480	5300	0,04	0,01	0,09
Verveine	5,7	650	6100	0,22	0,03	0,23

L'extraction des éléments par unité de temps varie. Le chou chinois a extrait les plus grandes quantités d'azote, de phosphore et de potassium (respectivement 1.36, 0.27 et 1.86 g/m²/j). Les valeurs les plus importantes d'extraction d'azote ont été atteintes par la moutarde, la menthe et la frisée. Le phosphore a été le plus extrait par le basilic grand vert et la moutarde, et des proportions de potassium journalières plus importantes ont été phytoépurées par les bettes, la frisée, la scarole, la basilic grand vert et la moutarde. Les plants présentant les valeurs les plus faibles globalement ont été le basilic grec, ainsi que les fruits des pieds de tomates.

III. Analyse et discussion

L'abattement entre les deux compartiments indique que la capacité phytoépuratoire n'est plus à démontrer. Malgré l'ajustement de NPK début mai, les concentrations de ces éléments ont atteint des taux critiques dans le compartiment végétal, notamment le phosphore et le potassium, et ce malgré les concentrations élevées dans le compartiment piscicole. Cet abattement important peut être dû à une biomasse piscicole insuffisante, ou à des plantes aux besoins trop importants en phosphore et potassium. Les bettes, le basilic grand vert, le chou chinois et la menthe, du fait de leur biomasse importante, ont extrait les plus grandes quantités de nutriments par unité de surface comptabilisés durant le screening. Les valeurs ont été arrêtées le 9 Août pur des raisons de traitement de données et de rédaction, mais une partie des plants sont restés dans le système pour une durée supplémentaire d'au moins un mois : c'est le cas des différentes variétés de basilic, du cresson des fontaines, de la menthe et de la verveine. Ceci est d'autant plus intéressant que certaines d'entre elles (Basilic grand vert et menthe) ont démontré des capacités phytoépuratoires plus importantes que la moyenne, et que d'autre (Basilic grec, verveine) peuvent présenter une valeur ajoutée importante malgré une phyto-extraction plus faible. Les rendements, dans le cadre du dimensionnement des systèmes, seront à mettre en relation avec les prix potentiels des produits.

Il est possible de calculer la surface maximum cultivable pour chaque variété si les rafts étaient en monoculture. Les calculs peuvent être basés sur l'équilibre des concentrations atteintes en fin d'expérimentation dans le compartiment piscicole : 100mg/l pour l'azote et 7 mg/L pour le phosphore. Le potassium n'est pas à prendre en compte étant donné que c'est un intrant extérieur. Le volume journalier de la surverse étant de 0.8m^3/j, il y a 800g d'azote disponible et 56g de phosphore. Le tableau 2 présente les surfaces maximales possibles en cas de monoculture pour chaque variété.

Il en ressort que le phosphore est majoritairement l'élément limitant. Le cas des légumes-fruits, poivrons et tomates en aquaponie en 4L/h notamment, démontre que les surfaces de ces cultures plus complexes sont limitées par le besoin des fruits en éléments nutritifs, et non des parties végétatives. Il est toutefois à noter que pour ces estimations de surface les plants ont été supposés comme étant en installation raft. Or les données de phytoextraction des tomates ont été obtenues suite à une culture sur substrat inerte.

Concernant le ratio alimentaire, le ratio « optimal » ressorti du bilan de masse a été en grande partie dépassé. Le phosphore est ici aussi l'élément contraignant : pour le chou chinois, dans le cadre d'un compartiment piscicole contenant des perches, il faut au moins 224,85 grammes d'aliment par mètre carré de culture pour ne pas avoir de carences en phosphore. Le basilic grec, au contraire, ne nécessite que d'au moins 10,46 grammes d'aliments par mètre carré dans les mêmes conditions. A partir de ces valeurs, connaissant le taux de rationnement des poissons, il est possible d'en déduire une biomasse piscicole nécessaire pour une surface souhaitée d'une culture souhaitée.

Tableau 2 : Surfaces maximales théoriques de culture dans le système-pilote du RATHO et ratios alimentaires respectifs obtenus

Variété	Surface possible en monoculture (m²)		ratio alimentaire (g/m²)	
	selon extraction N	selon extraction P	selon extraction N	selon extraction P
Bettes	63,96	51,84	31,27	38,58
Basilic grand vert	58,10	26,86	34,42	74,46
Basilic grec	289,68	191,19	6,90	10,46
Chou chinois	24,91	8,89	80,30	224,85
Cresson alénois	30,84	16,49	64,84	121,26
Cresson de fontaine	50,84	18,45	39,34	108,39
Menthe	21,80	17,25	91,74	115,93
Mizuna	91,54	62,69	21,85	31,90
Moutarde	21,77	18,01	91,86	111,04
Oignon jaune	81,37	40,94	24,58	48,85
Oseille	43,60	28,61	45,87	69,90
Persil plat	36,79	33,88	54,37	59,03
Poivron violet (fruits)	152,76	55,31	13,09	36,16
Poivron violet (tiges et F)	73,23	110,41	27,31	18,12
Frisée	56,71	51,78	35,27	38,63
Scarole	205,71	84,70	9,72	23,61
Sauge	78,80	74,03	25,38	27,02
Tomates cobra 4L/h	420,75	45,31	4,75	44,14
Tomates cobra 2L/h	831,63	48,94	2,40	40,86
Verveine	130,50	80,10	15,33	24,97

Toutefois, il est à noter que les plants ont souffert de la canicule, pouvant fausser les rendements obtenus. De plus l'utilisation d'un trio de plaques de rafts ne suffit pas pour avoir un rendement représentatif d'une production à grande échelle. Mais nous avons quand même pu obtenir une première estimation et pu comparer les plantations entre elles. Ces résultats sont à ajouter à ceux des précédentes expérimentations.

IV. Conclusion

Le screening végétal est un outils clé de l'acquisition de données de dimensionnement des systèmes aquaponiques. Les capacités phytoépuratoires de nombreuses variétés doivent continuer à être accumulées et mises en relation avec leurs rendements, et ce en usant de surfaces plus importantes afin d'en avoir une meilleure approche. Le recueil des données phytoépuratoires de nombreuses plantes, dont des plantes plus exigeantes en termes de besoins en nutriments, devrait permettre de dimensionner et modéliser des installations afin d'optimiser la phytoépuration selon les besoins respectifs des plantes. Les légumes fruits présentent un bon potentiel phytoépuratoire en aquaponie. Leurs parties végétales ne doivent pas être négligées lors de la mise en place du plan de production. Celles des poivrons violets notamment ont montré des valeurs d'extraction élevées et des concentrations importantes dans les tissus.

Annexe VIII : Composition des milieux de base, des intrants post-récolte et des intrants journaliers de la spiruline.

Intrants	Formule	M1	M2	M3	M4	M5	M6
		Témoin conventionnel urée batch	Témoin conventionnel urée fractionné	Modalité bio: sulfate de NH4	Modalité bio: bio3G (organique)	Modalité aquaponie	Modalité guano marin (bio) batch
Apport d'azote journalier	Apports exprimés en unité de volume ou de poids pour 150L de milieu de culture						
Sulfate d'ammonium (Suez)	$(NH_4)_2SO_4$	/	/	Equivalent 10 mg N-NH4/L/jour = 10.5 mL de sulfNH4/jour	/	/	/
Isotonic	N,P205, K20			/	Equivalent 10 mg N/L/jour = 46 mL isotonic/jour		
Urée	CH_4N_2O		Equivalent 10 mg N/L/jour = 3 g urée par jour		/		
Eau de l'aquaponie	/	/	/	/	/	Compensation de l'eau d'évaporation	/
Composition milieu de base	Apports exprimés en unité de volume ou de poids pour 150L de milieu de culture						
Bicarbonate de sodium	$NaHCO_3$	1200 g	1200 g	1200 g	1200 g	1200 g	1200 g
Chlorure de sodium	NaCl	600 g	600 g	600 g	600 g	600 g	600 g
Nitrate de potassium	KNO_3	300 g	300 g	/	/	300 g	/
Sulfate de potassium	K_2SO_4	/	/	258 g	258 g	/	240 g
Sulfate de magnésium	$MgSO_4$	30 g	30 g	30 g	30 g	30 g	30 g
Urée	CH_4N_2O	3g	3g	/	/	3g	/
Guano		/	/	/	/	/	330 g
Phosphate mono-ammoniaque	$NH_4H_2PO_4$	30 g	30 g	/	/	30 g	/
Acide phosphorique (laminaire)	P_2O_5	/	/	27 mL	27 mL	/	0
Sulfate de fer (10 g/L)	$FeSO_4$	15 ml	15 ml	15 ml	15 ml	15 ml	15 ml
Oligo 7	Mix d'oligo	1,5ml	1,5ml	1,5ml	1,5ml	1,5ml	1,5ml
Milieu de récolte (compensation)	Apports exprimés en unité de volume ou de poids/kg de poids sec de spiruline récoltée						
Bicarbonate de sodium	$NaHCO_3$	450 g	450 g	450 g	450 g	450 g	450 g
Sulfate de potassium	K_2SO_4	6 g	6 g	6 g	6 g	6 g	6 g
Sulfate de magnésium	$MgSO_4$	4,5 g	4,5 g	4,5 g	4,5 g	4,5 g	4,5 g
Phosphate mono-ammoniaque	$NH_4H_2PO_4$	9 g	9 g	/	/	/	/
Acide phosphorique (laminaire)	P_2O_5	/	/	8,25 mL	8,25 mL	8,25 mL	0
Urée	CH_4N_2O	45 g	/	/	/	/	/
Guano	/	/	/	/	/	/	165 g
Sulfate de fer (10 g/L)	$FeSO_4$	15 ml	15 ml	15 ml	15 ml	15 ml	15 ml
Oligo 7	Mix d'oligo	1,5 ml	1,5 ml	1,5 ml	1,5 ml	1,5 ml	1,5 ml

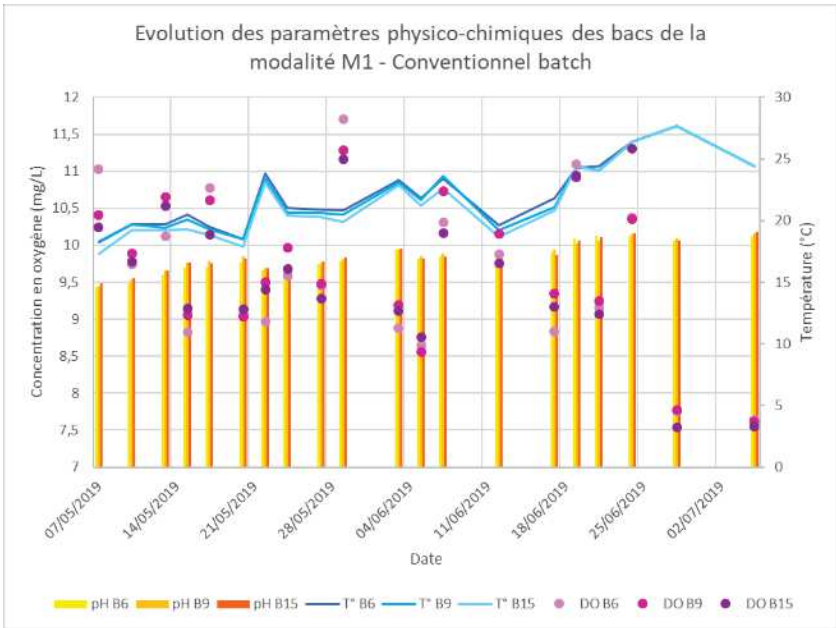
Annexe IX : Rapport d'analyse de la composition floristique : Milieux de culture

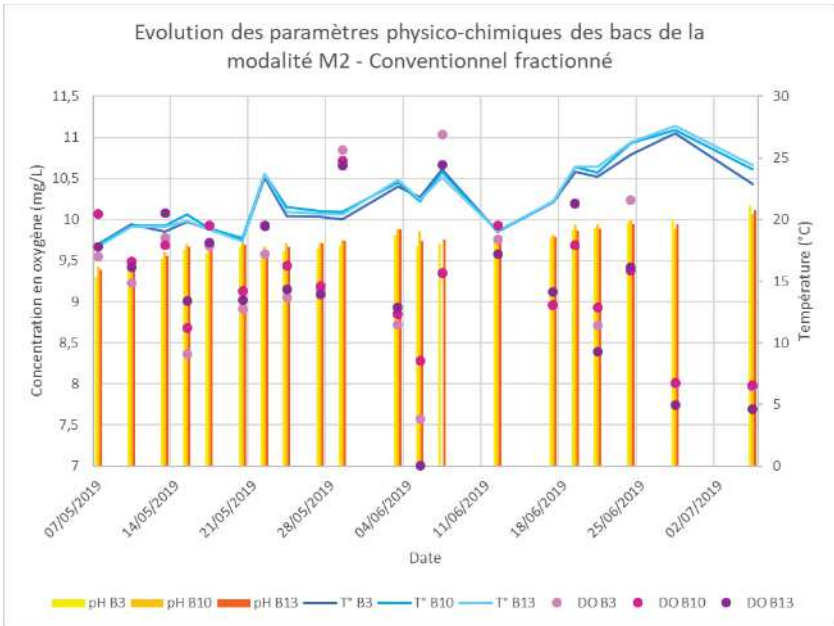
	Milieux de culture 28/06/2019									
	M1		M2		M3		M4		M5	
	% colonies	*% biomasse*	*% colonies*	*% biomasse*	*% colonies*	*% biomasse*	*% colonies*	*% biomasse*	*% colonies*	*% biomasse*
Total Arthrospira	**4,0**	**99,2**	**2,9**	**97,7**	**4,3**	**99,1**	**13,6**	**99,4**	**13,3**	**99,7**
Arthrospira droite	0,1	0,8	0,2	3,1	0,4	5,4	1,4	7,6	1,8	7,7
Arthrospira ondulée	0,1	0,9	0,5	10,8	0,1	1,1	2,7	13,7	1,8	10,9
Arthrospira spiralée	3,9	97,4	2,3	83,7	3,9	92,7	9,5	78,2	9,8	81
Autres cyanobactéries	**95,4**	**0,8**	**96,7**	**2,3**	**95,4**	**0,9**	**86,4**	**0,6**	**85,8**	**0,3**
Phormidium			0,3	0,5			<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Leptolyngbya	0,6	0,1	2,3	0,7	0,7	0,2	2,7	0,2	0,9	0,1
Pseudanabaena	8,1	0,1	6,8	0,1	3,2	<0,1	12,3	0,1	15,1	0,1
Planktolyngbya	2,9	<0,1	0,5	<0,1	1,8	<0,1	1,4	<0,1	2,7	<0,1
Geitlerinema										
Spirulina	13,3		23,2	0,1	32,7	0,1	53,2	<0,1	43,6	<0,1
Gomontiella	24,3	0,2	20,5	0,3	30,2	0,2				
Jaaginema	41,0	0,3	40	0,5	23,1	0,2	1,8	<0,1	15,1	<0,1
Romeria										
Cyanobium	2,9	<0,1	0,9	<0,1	0,7	<0,1			5,3	<0,1
Cyanodictyon	1,2	<0,1	1,4	<0,1	1,4	<0,1	12,3	0,1	0,9	<0,1
Merismopedia					0,4	<0,1	2,7	<0,1	1,8	<0,1
Aphanocapsa	1,2	<0,1	0,9	<0,1	1,1	<0,1			0,3	<0,1
Autres embranchements	0,6	<0,1	0,5	<0,1	0,4	<0,1	<0,1	<0,1	0,9	<0,1
Chrysophycées	0,6	<0,1	0,5	<0,1	0,4	<0,1	<0,1	<0,1	0,9	<0,1
Microcystines (eq-LR, µg/litre)	0,18		0,15		0,22		<LQ		0,22	

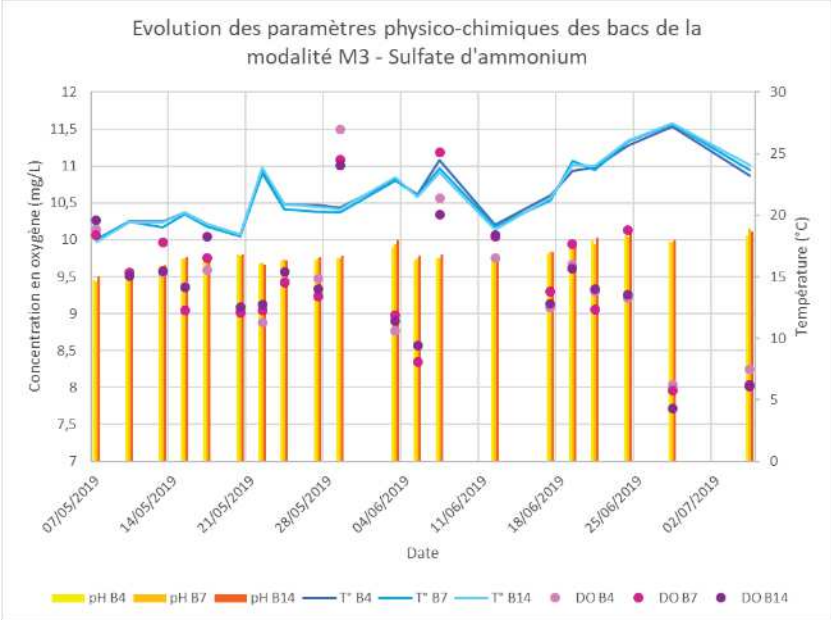
Annexe X : Rapport d'analyse de la composition floristique : spiruline séchée sous forme de paillettes

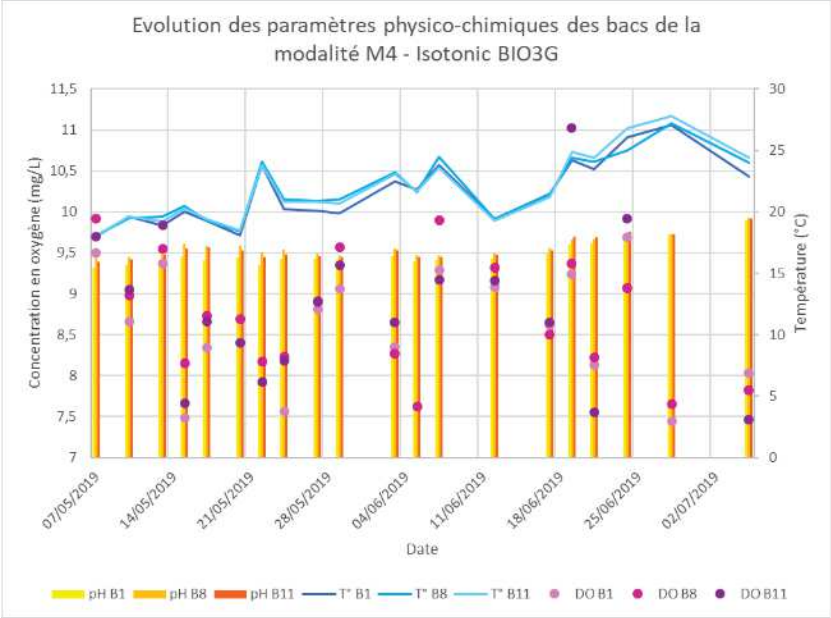
	Paillettes 28/06/2019									
	M1		M2		M3		M4		M5	
	% colonies	*% biomasse*	*% colonies*	*% biomasse*	*% colonies*	*% biomasse*	*% colonies*	*% biomasse*	*% colonies*	*% biomasse*
Total Arthrospira	**95,7**	**99,9**	**85,5**	**99,8**	**96,7**	**99,9**	**95,6**	**99,9**	**94,6**	**99,9**
Arthrospira droite	2,2	1,7	5,7	5,3	4,3	5,3	6,7	5,5	5,3	3
Arthrospira ondulée	4,3	4,1	5,7	5,2	2,2	3,5	6,7	4,7	21	22,5
Arthrospira spiralée	89,1	94,1	74,1	89,4	90,2	91,1	82,2	89,7	68,3	74,4
Autres cyanobactéries	**4,3**	**<0,1**	**14,5**	**0,2**	**3,3**	**<0,1**	**4,4**	**<0,1**	**5,4**	**<0,1**
Phormidium			0,3						0,1	<0,1
Leptolyngbya	2,2	<0,1	11,4	0,1	1,1	<0,1	2,2	<0,1	1,3	<0,1
Pseudanabaena										
Planktolyngbya	2,2	<0,1							2,6	<0,1
Geitlerinema										
Spirulina										
Gomontiella										
Jaaginema			2,8	<0,1	1,1	<0,1			1,3	<0,1
Romeria										
Cyanobium										
Cyanodictyon										
Merismopedia					1,1	<0,1	2,2	<0,1		
Aphanocapsa										
Autres embranchements	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Chrysophycées										
Microcystines (eq-LR, µg/g P Sec)	0,25		0,21		0,27		0,25		0,21	

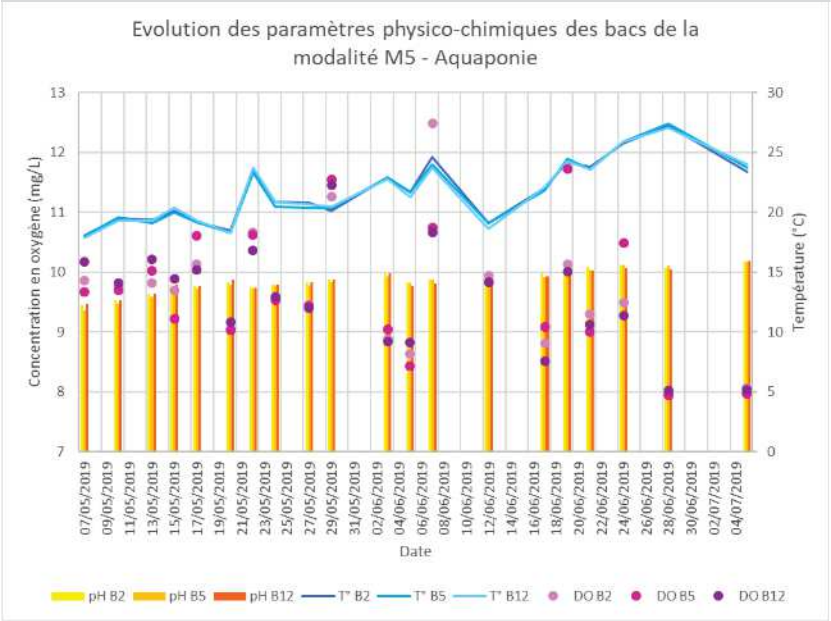
Annexe XI : Physicochimie des différentes modalités de spiruline






Evolution des paramètres physico-chimiques des bacs de la modalité M3 - Sulfate d'ammonium
Concentration en oxygène (mg/L)
Température (°C)
Date
pH B4
pH B7
pH B14
T° B4
T° B7
T° B14
DO B4
DO B7
DO B14


Evolution des paramètres physico-chimiques des bacs de la modalité M4 - Isotonic BIO3G
Concentration en oxygène (mg/L)
Température (°C)
Date
pH B1
pH B8
pH B11
T° B1
T° B8
T° B11
DO B1
DO B8
DO B11


Evolution des paramètres physico-chimiques des bacs de la modalité M5 - Aquaponie
Concentration en oxygène (mg/L)
Température (°C)
Date
pH B2
pH B5
pH B12
T° B2
T° B5
T° B12
DO B2
DO B5
DO B12

Annexe XII : Bilan de masse spiruline essai spiruline bio 2018

		Conventionnel	Alcali + AcP	Sulfate de NH4 + AcP
		Bassin 6	Bassin 7	Bassin 5
Intrants	Azote en provenance de l'eau neuve dans le milieu de culture initial + compensation évaporation (g)	11.2	11.2	11.2
	Estimation azote apporté par la spiruline à l'ensemencement (g)	15	15	15
	Azote apporté dans le milieu de culture initial (g)	301.6	0	0
	Azote apporté en phase de culture (g)	730	730	730
	SOMME N INTRANTS	1042.8	741.2	741.2
Extrants	Spiruline récoltée (gMS)	1120.0	1875.0	2206.4
	Spiruline résiduelle (gMS)	396.5	318.1	359.6
	Spiruline sortie du système (sommes des récoltes + résidus à Tfinal) (gMS)	1516.5	2193.1	2566.0
	Azote fixé dans la spiruline sortie du système (g)	150.0	205.3	258.7
	Azote résiduel (azote global dans le milieu de culture) (g)	640.8	210.5	209.4
	SOMME N EXTRANTS	790.7	415.8	468.1
	Déduction estimation évaporation N sous forme de gaz (g)	252.1	325.4	273.1
Devenir de l'azote	Part évaporation N (%)	24.2%	43.9%	36.9%
	Part N fixé dans le spiruline (%)	14.4%	27.7%	34.9%
	Part N résiduel dans le milieu (%)	61.4%	28.4%	28.3%
	Indice de convertion N spiruline	7.0	3.6	2.9
Formes azotées résiduelles	Part forme N-NO3 dans azote résiduel (%)	99.5%	95.7%	95.2%
	Part forme N-NO2 dans azote résiduel (%)	0.0%	0.0%	1.3%
	Part forme N-NH4 + azote organique dans azote résiduel (%)	0.6%	4.4%	3.0%

AGRO CAMPUS OUEST	Diplôme : Ingénieure agronome Spécialité : IEVU Spécialisation / option : Agriculture urbaine Enseignant référent : Laure VIDAL BEAUDET

Auteur(s) : Lucile DELORME Date de naissance : 28 Mars 1996	Organisme d'accueil : ASTREDHOR-RATHO Adresse : 135, Chemin du Finday, 69126 Brindas Maître de stage : Pierre FOUCARD
Nb pages : 40 Annexe(s) : 30	
Année de soutenance : 2019	

Titre français :

Acquisition de données de performances des systèmes aquaponiques : potentiel phyto-épuratoire et qualité des produits

Titre anglais :

Acquisition of aquaponics systems performance data: phytopurification potential and products quality

Résumé :

La pisciculture et les systèmes aquacoles recirculés (RAS) se développent du fait de la demande croissante en produits aquacoles. La disposition des effluents en particulier en système recirculé présente des enjeux importants. Les performances épuratoires de la culture végétale hors sol et de la culture de spiruline ont été étudiées par une approche bilan de masse et par l'étude d'abattement de molécules azotées, phosphatées et potassiques pour différentes espèces végétales et une production d'*Arthrospira platensis*. Les qualités nutritionnelles et sensorielles des produits issus de la phytoépuration des effluents piscicoles ont été précisées notamment pour des tomates issues d'un mode de culture innovant. L'aquaponie présente un potentiel de production à valeurs organoleptique et nutritionnelle compétitive par rapport à d'autres modes de culture plus conventionnels. Cette AMTI peut inclure la spiruline afin de réduire à zéro les rejets des effluents du RAS dans l'environnement.

Abstract :

Fish farming and recirculated aquaculture systems (RAS) are expending as a result of rising demand for aquaculture products. Effluents' disposal in particular in recirculated systems poses major issues. Phytopurification performances of vegetal off-ground cultivation and spirulina production were studied with a mass balance approach and the study of the abatement of nitrogen, phosphate and potassium effluent contents for various plant species and an *Arthrospira platensis'* production. The nutritional and sensorial qualities of the fish production effluents phytopurification products have been stated including for tomatoes grown with an innovative technique. Aquaponics present a good potential for productions with competitive organoleptic and nutritional values against other more conventional growing methods. This IMTA can include spirulina in order to reduce to zero RAS effluents emissions in the environment.

Mots-clés : Aquaponie, bilan de masse, phytoépuration, qualité nutritionnelle, qualité organoleptique, spiruline, système recirculé.

Key Words: Aquaponics, mass-balance, nutritional quality, organoleptic quality, phytopurification, recirculated system, spirulina.

** Elément qui permet d'enregistrer les notices auteurs dans le catalogue des bibliothèques universitaires*