



HAL
open science

Optimisation des conditions culturales et évaluation de la qualité nutritionnelle et sensorielle de tomates en aquaponie

Mathilde Marsault

► **To cite this version:**

Mathilde Marsault. Optimisation des conditions culturales et évaluation de la qualité nutritionnelle et sensorielle de tomates en aquaponie. Sciences du Vivant [q-bio]. 2020. dumas-03040624

HAL Id: dumas-03040624

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03040624v1>

Submitted on 4 Dec 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.

<p>AGROCAMPUS OUEST</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> CFR Angers <input type="checkbox"/> CFR Rennes</p> <p>l'institut Agro agriculture • alimentation • environnement</p> 	 université angers  UNIVERSITÉ DE NANTES	 
<p>Année universitaire : 2019-2020.</p> <p>Mention : Biologie végétale</p> <p>Parcours : Filière de l'horticulture et Innovations (FHI)</p>	<p>Mémoire de Fin d'études</p> <p><input type="checkbox"/> d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage</p> <p><input type="checkbox"/> d'un autre établissement (�tudiant arrivé en M2)</p>	

Optimisation des conditions culturales et évaluation de la qualité nutritionnelle et sensorielle de tomates en Aquaponie

Par : Mathilde MARSAULT



Soutenu   Angers le jeudi 10/09/2020

Devant le jury composé de :

Président : Béatrice TEULAT

Maître de stage : Pierre FOUCARD

Enseignant r f rent : Patrice CANNAVO

Autre membre du jury :

Étienne CHANTOISEAU, Maître de conférences

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»

Remerciements

Je tiens bien évidemment à remercier en tout premier lieu mon maître de stage, **Pierre Foucard**, pour sa confiance lorsqu'il m'a confié les différentes missions du stage, pour la patience de ses explications, sa rigueur et le partage de toutes ses connaissances. Merci pour ta bonne humeur, pour la pertinence de tes corrections et merci d'avoir assuré la mise en place de l'essai pendant le confinement pour que tout se passe comme sur des roulettes lors de mon retour !

Merci à toute l'équipe de la station ASTREDHOR-RATHO pour leur accueil : **Bernard Darfeuille** pour tes conseils techniques dans la mise en place de mon essai, **David Villermet** pour le partage de ton savoir sur les conduites de culture, **Pascal Sabatier** pour la passion de tes explications.

Merci aux stagiaires qui ont contribué à la bonne ambiance de la station. Merci **Joris** de t'être occupé de mes tomates du haut de l'escabeau quand le temps m'en a manqué. Merci aussi **Roxane**, consultante R, pour toute ton expertise en statistiques, et **Lise-Anne** pour ton chargeur de PC ! Bien évidemment, **Fanny**, merci pour tes nombreux coups de main sur mes notations, pour les livres et les CDs ! Je suis persuadée qu'un jour tu réussiras à manier l'ironie à la perfection. Enfin la dernière recrue et pas des moindres, **Coralie**, ma chère colocataire, merci pour tout le temps passé sous la chaleur de ma serre à cueillir des tomates, pour tout le temps passé sous la chaleur de ta serre à faire des spaghettis de spiruline, de m'avoir partagé ton univers musical (non) et surtout de m'avoir fait découvrir le Sud !

Merci à l'équipe du **SERAIL** pour leur avis et expertise quand nous doutions. Et merci de nous avoir gentiment prêté votre agitateur !

Merci à mes deux jokers, **Corentin** et **Alexandre** pour la lumière que vous avez apporté à la partie traitement statistique sur RStudio et à vos précieuses lignes de code.

Merci à mon tuteur de stage, **Patrice Cannavo** pour la relecture de mon rapport.

Merci **Violaïne** pour ta relecture !

Merci également à **Alexandra Elbakyan**, créatrice du site web sci-hub, grâce auquel j'ai pu accéder à beaucoup de publications non disponibles en temps normal.

Une gratitude spéciale pour **David Gilmour**, **Fish** et **Tobias Forge** pour ne citer qu'eux, voix portantes de mélodies qui m'ont accompagné durant la solitude du confinement et qui m'ont aidé à le traverser, et à arriver au bout de ce stage qui conclut toutes ces années d'études, marquant la fin d'une période très riche en beaucoup de choses.

Pour terminer, un remerciement évident pour le compagnon de mes nombreuses escapades estivales, **Fabien** : merci pour les guitares, les CDs, les relectures, tes bons petits plats, et pour toutes les choses qui restent encore au programme.

Petit clin d'œil à **Ève Marsault** née cet été, qu'il me tarde de rencontrer et qui je l'espère, contrairement à ses parents, aimera les tomates et aura peut-être l'occasion d'en déguster des délicieuses cultivées en aquaponie!

Table des matières

Index des abréviations

Table des illustrations

I.	INTRODUCTION	1
I.1)	Contexte	1
I.2)	La filière aquacole et ses enjeux	1
I.2.a)	<i>Les systèmes aquacoles recirculés</i>	3
I.2.a.1)	Filtration mécanique	3
I.2.a.2)	Filtration UV	5
I.2.a.3)	Filtration biologique	5
I.3)	La filière maraîchère hors sol	7
I.3.a)	<i>Limites de la culture hors sol</i>	9
I.4)	Définitions : qu'est-ce que l'aquaponie ?	9
I.4.a)	<i>La culture en aquaponie</i>	11
I.4.b)	<i>Avantages et inconvénients de l'aquaponie</i>	13
I.4.c)	<i>Cycle des nutriments</i>	13
I.4.c.1)	Nutrition de la plante	13
I.4.c.2)	Dynamique des nutriments	13
I.4.d)	<i>Paramètres chimiques du système aquaponique</i>	13
I.4.d.1)	pH.....	13
I.4.d.2)	Conductivité électrique	15
I.4.d.3)	Oxygène dissous	15
I.5)	Projet et problématique	15
II.	MATERIEL ET METHODE	19
II.1)	Compartiment aquacole	19
II.1.a)	<i>Espèces de poissons</i>	19
II.1.b)	<i>Schéma global du système avec détail de chaque compartiment</i>	19
II.2)	Compartiment végétal	23
II.2.a)	<i>Matériel végétal</i>	23
II.2.b)	<i>Substrat de culture</i>	23
II.2.c)	<i>Irrigation</i>	23
II.2.d)	<i>Drainage</i>	25
II.3)	Climat de la serre	25
II.4)	Suivi sanitaire	27
II.5)	Paramètres de suivi	27
II.6)	Analyses statistiques	27
III.	RESULTAT	29
III.1)	Compartiment piscicole	29
III.1.a)	<i>Croissance des poissons</i>	29
III.2)	Dynamique des nutriments	29
III.2.a)	<i>Comparaison des solutions aquaponiques et hydroponiques</i>	29
III.2.b)	<i>Dynamique des nutriments entre fosse aquacole et végétale</i>	31
III.3)	Suivi végétal	31
III.3.a)	<i>Taille des plants</i>	31
III.3.b)	<i>Facteurs non contrôlés impactant le rendement</i>	31

III.3.b.1)	Rendement selon la position dans la serre	31
III.3.b.2)	Rendement au fil des récoltes.....	33
III.3.c)	<i>Facteurs d'intérêt impactant le rendement</i>	33
III.3.c.1)	Position dans la serre.....	33
III.3.c.2)	Effet Irrigation	33
III.3.c.3)	Effet Débit d'arrosage.....	35
III.3.c.4)	Effet Traitement foliaire	35
III.4)	Dosage des composés d'intérêt nutritionnel des fruits	37
	Analyse des tissus des fruits	37
III.6)	Analyse sensorielle des fruits	37
IV.	DISCUSSION	39
IV.1)	Importance du compartiment piscicole	39
III.5) IV.2)	Efficacité de la solution aquaponique	41
IV.2.a)	<i>Comparaison avec l'hydroponie</i>	41
IV.2.b)	<i>Dynamique des nutriments en aquaponie</i>	43
IV.2.b.1)	Balance entre les deux compartiments.....	43
IV.2.b.2)	Phytoépuration des éléments par les tomates.....	45
IV.3)	Comparaison des paramètres phytotechniques des tomates	47
IV.3.a)	<i>Développement physiologique équivalent</i>	47
IV.3.b)	<i>Rendement</i>	47
IV.3.b.1)	Disposition de l'essai non optimal.....	47
IV.3.b.2)	Impact des modes de culture.....	49
IV.3.c)	<i>Qualité nutritive</i>	51
IV.3.d)	<i>Qualité sensorielle</i>	51
V.	CONCLUSION	53

Annexes

Index des abréviations

APIVA : AquaPonie, Innovation Végétale et Aquaculture

ASTREDHOR : Association nationale des structures d'expérimentation et de démonstration en horticulture

BER : Blossom End Rot

CTIFL : Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes

DRAPS : double recirculating aquaponic system = système aquaponique découplé

EC : électroconductivité

Fe : Fer

ITAVI : Institut Technique d'AVIculture, cuniculture et aquaculture

IC : Indice de Conversion

JAG : Jours Après Germination

K : Potassium

N : Azote

P : Phosphore

RAS : système aquacole recirculé

SRAPS : single recirculating aquaponic system = système aquaponique couplé

pH : potentiel hydrogène

UV : Ultra-Violet

Table des illustrations

Figure 1 : Bactéries nitrifiantes (a) <i>Nitrosomas</i> (b) <i>Nitrobacter</i> (Goddek, 2019).....	4
Figure 2 : Aperçu des différentes techniques de culture hors sol A : : goutte à goutte en substrat inerte (© Carlos Yo); B : DWC ou DFC (Wikipedia, Denfer007 ; C. NFT (Illustration personnelle).....	6
Figure 3 : Le cycle de l'azote en aquaponie. (Illustration personnelle).....	8
Figure 4 : résultat de la recherche du terme « aquaponics » dans la base de données Web Of Science ressortant le nombre de publications contenant ce mot clé (tiré de Yep and Zheng, 2019).....	10
Figure 5 : Disponibilité des nutriments en fonction du pH de l'eau. Rouge : pH en hydroponie Bleu : pH en aquaponie. Conductivité électrique (traduit de Goddek, 2019).	14
Figure 6 : Représentation schématique du pilote expérimental aquaponique découplé de la station Astredhor-RATHO, (non à l'échelle).	18
Figure 7 : Pot hollandais BATO et son système de drainage (illustration personnelle)	22
Figure 8 : Disposition de l'expérimentation et répartition des différentes modalités au sein de la serre. Les débits des modalités Aquaponie sont alternés.	24
Figure 9 : Evolution de la biomasse totale en stock des poissons et ratio de la quantité d'aliment journalière distribuée par m ² de surface cultivée le long de l'expérimentation	28
Figure 10 : Evolution de la concentration en éléments des solutions d'irrigation déterminée par dosages en kit et comparaison avec dosages en laboratoire. A : Azote nitrique ; B : Fer ; C : Orthophosphate ; D : Potassium.	28
Figure 11 : Evolution de la concentration en nutriments dans les compartiments du système. Concentration en A : Azote nitrique ; B : Orthophosphate ; C : Potassium ; D : Evolution du taux d'ouverture du système et de l'EC du bassin piscicole.	30
Figure 12 : Evolution de la taille des plants de tomates suivi après la transplantation	30
Figure 13 : Rendements obtenus par plant, en fonction de leur position spatiale dans la serre. Les pots n'apparaissant pas sur ce graphique ont des données aberrantes et ont été retiré du jeu de données	30
Figure 14 : Evolution du poids moyen des tomates hydroponiques (HY) et aquaponiques (A) au fil des récoltes. Premier et huitième bouquet récoltés respectivement à 100 et 157 JPG. (N=30).	32
Figure 15 : Rendement en fonction de l'emplacement des plants dans la serre. Chaque lettre correspond à la colonne où se trouvent les plants d'après le plan expérimental.....	32
Figure 16 : Rendement de l'ensemble des récoltes par modalités confondues. Test de Tukey après Anova à 2 facteurs : ***<0.05. Pointillés : test de Student p=0.018.....	32
Figure 17 : Rendement des plants de tomates en fonction de l'irrigation, hydroponie et Aquaponie toutes modalités confondues. Test de Student p= 7,35.10 ⁻⁷	34

Figure 18 : Rendement en fonction du débit d'irrigation test de Student, p value = 0.718. Significativité du T de Student est indiqué : " " >0.05, *<0.05, **<0.01 ou ***<0.001. p value = 0.226.....	34
Figure 19 : Rendement en fonction du traitement foliaire (apport de Potassium foliaire 0,5 % ou non) et de l'irrigation (hydroponie ou aquaponie). Significativité du T de Student est indiqué : *<0.05, **<0.01 ou ***<0.001. p value = $1,6 \cdot 10^{-9}$	34
Figure 20 : Aperçu des lots de la 3e récolte ayant servis aux analyses nutritionnelles et sensorielles. A : Hydroponie. B : A4K-	38
Figure 21 : Profils sensoriels moyens des tomates Aquaponie et Hydroponie (N=14)- Significativité du T de Student est indiqué : *<0.05, **<0.01 ou ***<0.001.....	38
Figure 22 : Profil sensoriel moyen de la tomates cocktail (tiré de (Cottet et al., 2018)).....	50
Tableau 1 : Résumé des avantages et inconvénients des systèmes couplés et découplés en aquaponie (Suhl et al., 2016).....	10
Tableau 2 : Principaux avantages et inconvénients de la culture en aquaponie.....	12
Tableau 3 : Taux des éléments attendus dans une plante (d'après Foucard and Tocqueville, 2019; Taiz and Zeiger, 2002; Turnšek et al., 2019)	12
Tableau 4 : Concentration calculée de la solution fille hydroponique d'après la recette mise au point. * = les concentrations de l'eau neuve ont été soustraites.	22
Tableau 5 : Résumé des paramètres zootechniques de l'élevage de poissons tout le long de l'essai.....	28
Tableau 6 : Analyse des composés d'intérêt nutritionnel de tomates issues des deux modalités d'irrigation	36
Tableau 7 : Analyse des minéraux contenus dans les tissus des fruits des différentes modalités de culture	38
Tableau 8 : Table Ciqual de composition nutritionnelle de la tomate (Anses) en comparasion avec nos tomates.....	50

I. Introduction

I.1) Contexte

Notre société est confrontée aux *challenges* du 21^e siècle. Nous ne sommes hélas pas à l'abri des aléas climatiques d'un monde changeant ou de crises sanitaires mondiales, telle que celle que nous avons traversée en 2020. Ces situations inédites ne font que nous rappeler qu'une production intelligente basée sur la résilience et l'économie des ressources, alliant productivité, circuits courts ainsi que flexibilité est indispensable pour assurer un avenir sociétal serein, sur le point de la sécurité alimentaire notamment.

La production alimentaire est un pilier dans nos vies : elle est indispensable bien sûr, mais l'agriculture conventionnelle est à l'origine de multiples impacts environnementaux dont les conséquences se font aujourd'hui ressentir ; la réduction de la disponibilité en eau, la pollution des milieux naturels par une utilisation abusive d'engrais de synthèse, une diminution des ressources minières en phosphore dont l'agriculture intensive dépend (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2016) ou encore la déplétion des sols fertiles. De plus, l'évolution de la démographie mondiale avec une population atteignant selon les estimations 9,7 milliards d'individus en 2050, entrainera une urbanisation et la diminution des surfaces cultivées (FAO, 2018a). De plus la FAO alerte sur la nécessité d'un usage efficient de l'eau à l'avenir (FAO, 2018a).

Pour faire face à ces défis, de nouveaux modèles de productions alimentaires efficients et moins consommateurs d'eau sont donc aujourd'hui nécessaires.

I.2) La filière aquacole et ses enjeux

Parmi les denrées composant notre alimentation, le poisson fait partie de ces produits très consommés et appréciés par la population. Les français sont les 4^e plus gros consommateurs en Europe avec 33,6 kg équivalent poids vif par habitant par an (FranceAgrimer, 2020a). L'aquaculture se définit comme la culture d'organismes aquatiques, y compris poissons, mollusques, crustacés et plantes aquatiques (FAO).

La production mondiale du secteur pêche et aquaculture s'établissait en 2016 à 170 millions de tonnes, dont 80 millions fournie par l'aquaculture soit 47%, une part qui ne fait qu'augmenter depuis les années 2000. Les ressources marines étant limitées, et la demande en protéine animale augmentant avec la population, ce secteur se développe plus rapidement que les autres grands secteurs de la production alimentaire (FAO, 2018b).

En France, l'espèce d'eau douce la plus majoritairement élevée est la truite arc-en-ciel qui représente 96% de la production française selon le Comité Interprofessionnel des Produits de l'Aquaculture, avec une production s'élevant à 41 000 tonnes en 2018.

Les systèmes d'aquaculture traditionnels, dit "ouverts", sont sous forme d'étangs ou de bassins dont l'eau est continuellement renouvelée en prélevant celle du milieu naturel, ce qui

assure une bonne qualité d'eau pour les poissons ainsi qu'une bonne oxygénation. Cette pratique traditionnelle conduit à un rejet d'effluents dans les courants naturels, plus ou moins chargés en azote ammoniacal et en particules organiques, ce qui participe – au même titre que d'autres filières d'élevage – à impacter le milieu naturel (Suhl et al., 2016). L'augmentation de la concentration des nutriments dans les milieux, d'origine anthropique, peut conduire à un phénomène d'eutrophisation, entraînant un fort développement d'algues susceptibles de dégrader les écosystèmes (Smith and Schindler, 2009). L'enjeu de maintien de la qualité des eaux de surface concerne toutes les filières de productions agricoles, et des réglementations ont été mises en place pour les encadrer, avec notamment la loi sur l'eau et les milieux aquatiques (Lema) du 30 décembre 2006. Les systèmes ouverts ont également pour limite d'être très dépendants de la ressource en eau (tant en quantité qu'en qualité), et les épisodes de sécheresse de plus en plus fréquents peuvent dans certaines régions entraîner des problématiques pour les éleveurs : baisse de la qualité d'eau, arrêt du nourrissage, baisse de production voire mortalités. Entre la réglementation, les problématiques de disponibilité en eau, et les problématiques liées aux conflits d'usage de l'eau, la filière piscicole française se heurte depuis plusieurs années à une stagnation de son activité.

I.2.a) Les systèmes aquacoles recirculés

Depuis une quarantaine d'années, une méthode alternative appelée Système Aquacole Recirculé (RAS) a été développée pour pallier ces problèmes (Goddek, 2019). Elle permet une réutilisation de 95% de l'eau qui subit différentes étapes de filtration ou d'épuration (filtration mécanique, filtration biologique, dégazage, filtration UV, parfois dénitrification et ozonation...). Un apport d'eau d'appoint permet d'éviter des problématiques liées à l'accumulation excessive de certains minéraux (azote, phosphore, sodium...) tout en compensant les pertes liées au contre lavage des filtres mécaniques. Ces systèmes recirculés consomment moins d'eau, mais accumulent tout de même des molécules azotées (principalement sous la forme nitrique NO_3^-) et phosphatées (principalement sous forme d'orthophosphates PO_4^{3-}). La majorité des espèces de poissons utilisent 20 à 50 % de l'azote fourni par la nourriture ce qui signifie que 50-80% de l'azote contenu dans la nourriture est relargué à l'issue du métabolisme (Schneider et al., 2005).

Les volumes de rejets étant réduits et plus concentrés en azote et phosphore (N et P), leur dépollution est cependant facilitée, en comparaison avec des systèmes « ouverts » où des volumes importants et peu concentrés en N et P sont produits. Afin de réduire l'accumulation de ces éléments dans l'eau circulante du système, différents traitements de l'eau sont effectués.

I.2.a.1) Filtration mécanique

Les poissons ont besoin d'une qualité d'eau satisfaisante pour exprimer tout leur potentiel zootechnique mais aussi pour leur bien être en élevage. L'évacuation des plus gros déchets organiques solides est primordiale pour éviter les problématiques de mortalités piscicoles liées à une irritation des branchies.

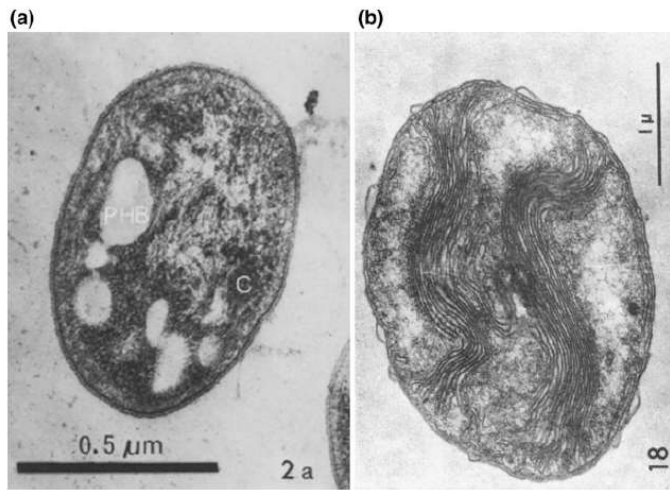


Figure 1 : Bactéries nitrifiantes (a) *Nitrosomas* (b) *Nitrobacter* (Goddek, 2019)

Il existe différentes techniques de filtration, passives (basées sur la décantation ou la filtration sur médias) ou actives (filtres à sable, filtres à tambour...), avec différents niveaux d'efficacité de rétention de la matière organique mais aussi différents niveaux de consommation électrique.

La matière organique extraite est composée des fèces des poissons, et constitue un « déchet » du système, qualifié de « boues piscicoles ». Ces boues contiennent encore des nutriments intéressants pour le système, notamment du phosphore organique. En effet, on estime qu'à peine 30% du phosphore ajouté au système par le biais de l'alimentation est réellement valorisé par les poissons, tandis que le reste (70%) est perdu sous forme dissoute (30 à 40%) ou d'excréments solides (60 à 70%) (Goddek, 2019). Elles constituent donc un objet d'étude intéressant pour leur valorisation agronomique.

I.2.a.2) Filtration UV

Avant de rejoindre les bassins piscicoles, l'eau sortant du filtre mécanique passe dans un filtre Ultraviolet (UV) qui permet d'éliminer les microorganismes potentiellement pathogènes. Cette étape de filtration permet de réduire les risques sanitaires liés à l'apport d'eau extérieure au système, notamment l'apparition et la propagation de maladies au sein de l'élevage.

I.2.a.3) Filtration biologique

Les RAS ont la particularité d'intégrer une composante de filtration biologique, un compartiment spécifique dédié à la nitrification, et incontournable pour le bon fonctionnement d'un circuit piscicole recirculé. Ce processus permet d'éviter l'accumulation d'azote ammoniacal, forme azotée naturellement rejetée par les poissons dans le cadre de leur métabolisme digestif, et qui leur est toxique à trop forte concentration : les salmonidés dont la truite par exemple, ne supportent pas plus de 0,020 mg/L de NH_3 et 0,025 mg/L de N-NH_3 . En contrepartie, la forme azotée « nitrates » est inoffensive pour les poissons jusqu'à de fortes doses, quelques centaines de mg/L variant selon les espèces (PHILMINAQ).

Pour contourner ce problème, l'utilisation de bactéries nitrifiantes (Figure 1) va permettre de réduire ce taux par le processus de nitrification. L'eau du système va passer dans un réservoir à bactéries aérobie strict autotrophes plongées dans de l'eau oxygénée constamment. Le genre *Nitrosomonas* va oxyder l'azote ammoniacal NH_4^+ en nitrite NO_2^- par le processus de nitritation, Puis le genre *Nitrobacter* va procéder à la nitratisation en oxydant l'ion nitrite NO_2^- en nitrate NO_3^- . Le compartiment bactérien constitue 15 à 30 % de la consommation totale d'oxygène dans le système aquaponique, c'est pour cela qu'il est important de sur-dimensionner les systèmes d'oxygénation. De plus l'activité bactérienne acidifie grandement le milieu, ce qui doit être compensé par l'apport d'intrants alcalinisants type carbonates ou bicarbonates afin d'éviter des chutes trop importantes de pH qui auraient pour effet à terme de limiter voire stopper le processus de nitrification.



Figure 2 : Aperçu des différentes techniques de culture hors sol A : : goutte à goutte en substrat inerte (© Carlos Yo) ; B : DWC ou DFC (Wikipedia, Denfer007 ; C. NFT (Illustration personnelle)

I.3) La filière maraîchère hors sol

La filière maraîchère française constitue un enjeu économique majeur avec 75 000 entreprises générant un chiffre d'affaire de 18 milliards d'euros au niveau de la consommation, plaçant la France 4^e pays producteur en volume de fruits et légumes en Europe (INTERFEL and ANIFELT, 2017).

En 2012, on comptait une production maraîchère de 6 600 ha en serres soit 3% de la production totale, avec la tomate et le concombre majoritairement cultivés dans ces systèmes (FranceAgrimer, 2012). Sous serre, ces cultures sont conduites en hors sol, en hydroponie. Il s'agit d'une technique développée dès les années 1930 où les plantes sont cultivées en absence de sol, leur racines étant exposées à une solution aqueuse contenant tous les nutriments leur étant nécessaires (Despommier, 2013). Le système racinaire des plantes se développe dans un substrat qui doit être capable de fournir des teneurs en air et eau équilibrées. Il en existe une multitude à choisir selon les besoins de la culture : vermiculite, perlite, tourbe, fibre de coco, laine de roche...

Cette technique permet l'obtention de produits frais et ce même sur des zones de terres non arables, une récolte rapide et un haut niveau de nutriments. (Hussain et al.f, 2014). De plus, l'obtention de rendements supérieurs à ceux de la culture pleine terre conventionnelle est possible grâce à une bonne maîtrise du cycle, et ce toute l'année, notamment en serre chauffée et éclairée. Différentes techniques de culture hors sol sont possibles (Goddek, 2019) illustrées en Figure 2:

- La technique NFT (Nutrient Film technique) est la technique classique en hydroponie. Les plants sont disposés sur des gouttières et leurs racines sont en contact avec un film fin (1-2 cm) de solution qui s'écoule en recirculation.
- La technique "en raft" DW/FT (Deep Water/Flow Technique), où les plantes ont pour support un substrat de culture en pots insérés dans des panneaux flottants dans un bac, où la solution nutritive est en débit continu. Les racines sont donc plongées directement et continuellement dans l'eau.
- L'irrigation en goutte à goutte sur un substrat en pot.
- L'aéroponie où le système racinaire est suspendu dans le vide dans un environnement fermé et où la solution nutritive est aspergée directement sur les racines

Un grand nombre de plantes sont cultivables en hydroponie, notamment les légumes feuilles, aromatiques et laitues, des plantes ornementales et fleurs comestibles également, mais surtout des plantes maraîchères comme le poivron le concombre ou la tomate. Cette dernière est un fruit très apprécié au niveau mondial, consommée en tant que légume, brute comme transformée. C'est une plante autogame qui fait partie de la famille des Solanacées. La tomate est le 2^e légume le plus produit au monde, constituant à elle seule 13% de la production totale de légumes (hors pommes de terre) en France en 2018 (FranceAgrimer, 2020b) : cette année-là, 683 804 tonnes en ont été produites, dont le tiers exporté (FranceAgrimer, 2018).

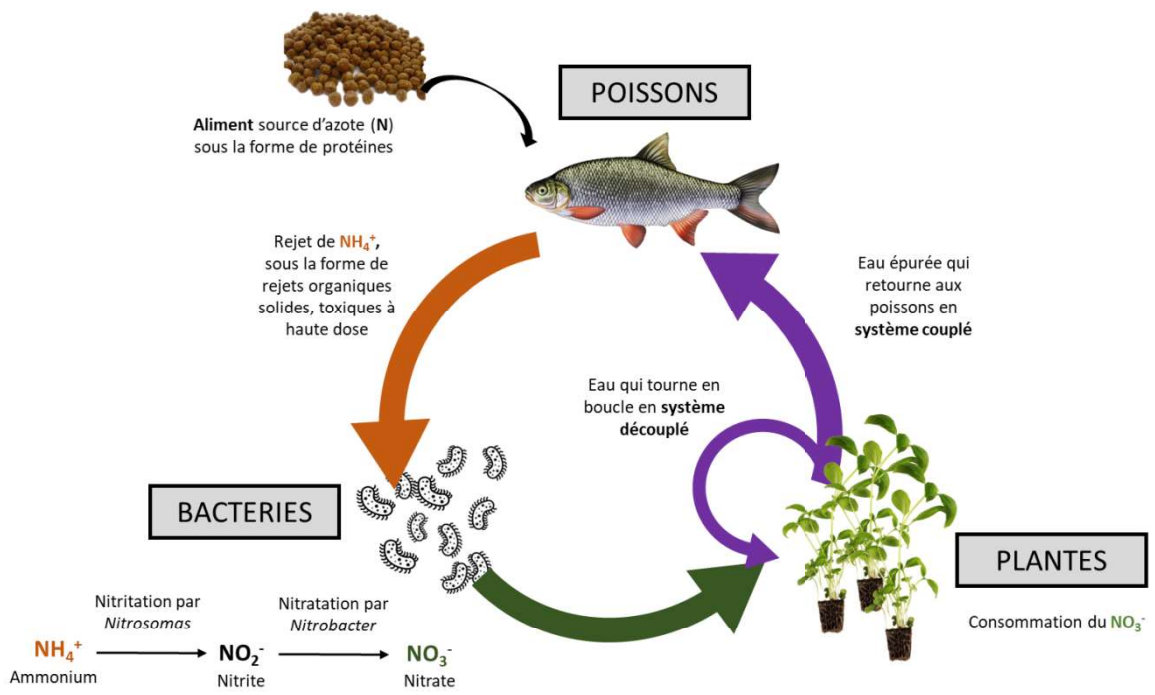


Figure 3 : Le cycle de l'azote en aquaponie. (Illustration personnelle)

I.3.a) Limites de la culture hors sol

La concentration totale en éléments dans les solutions nutritives hydroponiques est en général relativement élevée par rapport aux besoins réels, pour assurer une conductivité élevée, les plantes se servant du phénomène de potentiel osmotique pour capter les nutriments. Cela permet d'éviter d'une part l'apparition de tout facteur nutritionnel limitant, et d'autre part de limiter leur renouvellement (Morard et al., 2004). Les cultures sous serre étant sur-arrosées à hauteur de 25 à 45%, les rejets sont conséquents lorsque les solutions ne sont pas recirculées. La réutilisation des solutions s'avère en effet contraignante pour les producteurs, qui rejettent donc des eaux riches en nitrates et phosphates, qui peuvent être traitées à l'aide de marais salants notamment (Prystay and Lo, 2001). Mais, l'utilisation d'une solution nutritive diluée par rapport aux taux habituels ne semble pas impacter la croissance de tomates, au stade de floraison tout du moins (Morard et al., 2004) : cette pratique à tester sur une période prolongée pourrait donc limiter l'impact des effluents des cultures hydroponiques.

Une autre limite de l'hydroponie est sa dépendance aux énergies à cause de l'emploi massif de matière plastique et aux processus de fabrication des engrais (procédé Haber pour les engrais azotés, extraction minière pour le phosphore et le potassium) (Foucard and Tocqueville, 2019).

La consommation d'engrais minéraux utilisés en agriculture conventionnelle se fait au prix d'un impact environnemental tout au long du cycle de vie, de leur production (d'origine chimique ou minière) à leur utilisation (lixiviation des composés azotés et phosphatés dans les milieux naturels et pollution des cours d'eau (Galloway et al. 2003 cité par Siegenthaler, 2017)).

I.4) Définitions : qu'est-ce que l'aquaponie ?

Face au potentiel et aux enjeux des filières piscicole et maraîchère, l'aquaponie apparaît comme une solution qui concilie ces deux domaines.

Le terme « aquaponie » est une association des mots **aquaculture** et **hydroponie**.

L'aquaponie se définit par certains auteurs comme un système de production multitrophique d'organismes aquatiques et de plantes, prenant la forme d'un RAS connecté à un compartiment hydroponique, où la majorité voire la totalité des nutriments consommés par les plantes provient des rejets des organismes aquatiques (Goddek, 2019; Lennard, 2015). Cela permet donc de se passer partiellement ou totalement de fertilisants minéraux dont dépendent les cultures hydroponiques conventionnelles (Yep and Zheng, 2019).

L'aliment piscicole est l'intrant principal et source de NPK. Un seul intrant est donc nécessaire pour deux cultures différentes. L'alliance de ces trois acteurs, les poissons, les bactéries et les plantes, permet notamment de davantage boucler le cycle de l'azote par rapport à un simple RAS (Figure 3).



Figure 4 : résultat de la recherche du terme « aquaponics » dans la base de données Web Of Science ressortant le nombre de publications contenant ce mot clé (tiré de Yep and Zheng, 2019)

Tableau 1 : Résumé des avantages et inconvénients des systèmes couplés et découplés en aquaponie (Suhl et al., 2016)

Système couplé		Système découplé	
Avantages	Inconvénients	Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Adapté pour un usage domestique ou éducatif ✓ Moins de consommation électrique et moins technique 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Incompatibilité des conditions (pH, nutriments, qualité de l'eau) entre les espèces poissons/plantes/bactéries ✗ Production végétale réduite ✗ Pas assez de recherches à long terme ✗ Non utilisée en commercial ✗ accumulation de certains minéraux 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ La séparation permet d'adopter les conditions optimales pour chaque espèce ✓ Les intrants apportés aux plantes n'impactent pas les poissons ✓ Production intensive à plus grande échelle possible 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Ratio poisson/plante non optimisé ✗ Pas assez de recherches scientifiques

I.4.a) La culture en aquaponie

Les premières associations de cultures poissons-plantes pouvant s'apparenter à de l'aquaponie ont été réalisées en Chine et en Thaïlande où le riz était cultivé dans des rizières en association avec des poissons. Les Aztèques dès 1150-1350 av JC cultivaient sur des petits îlots flottants sur les lacs appelés *chinampas* (Turcios and Papenbrock, 2014).

La technique a été remise au goût du jour dans les années 70 et depuis quelques années, le nombre de publications scientifiques traitant de ce sujet ne cesse d'augmenter, ce qui témoigne de l'intérêt grandissant pour ce système prometteur (Figure 4). Les rendements obtenus en aquaponie sont équivalents voir dépassent ceux obtenus en hydroponie selon une méta analyse de nombreuses études (Ayipio et al., 2019). Une multitude de systèmes ont été développés tout autour du monde, en passant par des petits systèmes domestiques aux modèles expérimentaux démonstratifs à petite ou moyenne échelle, jusqu'à de grandes fermes aquaponiques rentables. Ce type de ferme est très bien illustré par les deux exemples que sont BIGH à Bruxelles en Belgique, ou *Superior Fresh* dans le Wisconsin aux Etas-Unis qui est à ce jour la plus grande ferme aquaponique du monde avec une surface de production de 4 hectares.

Avec les différents compartiments en jeu, il est possible de pratiquer l'aquaponie sous deux formes : en système couplé ou découplé.

Dans les systèmes couplés (SRAPS pour *single recirculating aquaponic system*), l'eau des poissons est épurée par les plantes et les bactéries de la rhizosphère avant de revenir dans les bassins aquacoles. Ce mode de culture fait face à des *challenges* car il implique d'accorder les paramètres des trois systèmes biologiques différents. Une solution pour résoudre ces problèmes est le système découplé (ou DRAPS pour *double recirculating aquaponic system*) où il les deux boucles de circulations de l'eau poisson et plantes sont séparées. En conséquence, les deux unités sont indépendantes l'une de l'autre. Cela signifie que la qualité de l'eau, c'est-à-dire le pH et les nutriments peuvent être adaptées de manière optimale séparément. Leur différences sont détaillées dans le Tableau 1.

Dès lors, d'un point de vue aquacole, cette technique permet d'épurer l'eau du système et de limiter les rejets concentrés en nutriments dans l'environnement en respectant ainsi les contraintes réglementaires. L'article 15 de l'arrêté du 1er avril 2008 cite des valeurs seuils de différences de concentrations, entre l'eau d'entrée et de sortie du système piscicole, à ne pas dépasser. D'un point de vue horticole, utiliser l'eau provenant de l'élevage va permettre de réduire partiellement à totalement l'utilisation d'engrais minéraux. L'alliance de ces deux univers permet au final une production de deux denrées alimentaires avec un seul et même intrant, en recyclant les déchets pour mieux boucler les cycles de l'azote et du phosphore, dans une logique d'économie circulaire.

Néanmoins l'eau piscicole ne contient pas tous les nutriments nécessaires pour assurer une bonne croissance des plantes, en micro éléments notamment. L'ajout de micro nutriments foliaires a un impact positif sur le rendement de tomates en aquaponie (sauf pour le cuivre)

Tableau 2 : Principaux avantages et inconvénients de la culture en aquaponie

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Peut être installée n'importe où, dont en milieu urbain favorisant les circuits courts sans impacter la pression foncière (Goddek et al., 2015) ✓ Quantité d'intrants nécessaires à la croissance végétale réduite voire nulle ✓ Economie de l'eau avec une réutilisation de 95% de l'eau circulante ✓ Rendement végétal élevé grâce au hors sol ✓ Création d'un véritable écosystème avec le développement d'une rhizosphère (PGPR) bénéfique à la productivité en comparaison avec les cultures hors sol stériles classiques 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Impact environnemental lié à l'énergie nécessaire et à la nourriture composée de farine animale (à échelle commerciale) (Boxman et al., 2017) ✗ Maîtrise multidisciplinaire nécessaire : l'aquaculture, la microbiologie, l'écologie, l'horticulture, la chimie et l'ingénierie. (Yep and Zheng, 2019) ✗ La nouveauté de cette pratique et le fait qu'elle ne soit pas encore très répandue peut entraîner une réticence à l'achat pour le consommateur, car la connaissance de la méthode de production conditionne et conforte un achat ((Tamin et al., 2015; Turnšek et al., 2019) ✗ Le circuit couplé est plus limitant, dans la gestion des paramètres physico-chimiques dont les normes ne sont pas les mêmes pour chaque compartiment d'une part, et dans la gestion des maladies d'autres part à cause de potentiels traitements ✗ L'investissement et les coûts de production sont importants (Foucard and Tocqueville, 2019) ✗ Le système très dépendant à l'automatisation et ses failles (pompe en panne, coupure électrique)

Tableau 3 : Taux des éléments attendus dans une plante (d'après Foucard and Tocqueville, 2019; Taiz and Zeiger, 2002; Turnšek et al., 2019)

Élément	Symbole	Concentration dans la matière sèche (% ^a ou ppm ^b)	Rôle / processus physiologique concerné
A partir de l'eau ou dioxyde carbone			
Hydrogène	H	6 ^a	
Carbone	C	45 ^a	
Oxygène	O	45 ^a	
A partir du sol ou de la solution nutritive			
Macronutriments			
Azote	N	1,5 ^a	Constituant des acides aminés et protéines, enzymes, chlorophylle. Croissance végétative, Mobile.
Potassium	K	1,1 ^a	Synthèse des protéines, activation d'enzymes, transporteur à travers la membrane, division et expansion cellulaire, équilibre osmotique, ouverture des stomates. Mobile
Calcium	Ca	0,5 ^a	Maintenance et plasticité de la paroi, rigidité des tissus
Magnésium	Mg	0,2 ^a	Constituant de la chlorophylle. Mobile.
Phosphore	P	0,2 ^a	Floraison (transport de cytokinine) et développement des fruits, métabolisme (ATP)
Souffre	S	0,1 ^a	Présent dans certains acides aminés
Micronutriments			
Chlore	Cl	100 ^b	Photosynthèse et ouverture des stomates. Mobile.
Fer	Fe	100 ^b	Rôle clé dans la photosynthèse, cofacteur enzymatique.
Bore	B	20 ^b	Développement des fruits et des graines.
Manganèse	Mn	50 ^b	Coconstituant de co-enzymes, résistance des cellules racinaires aux pathogènes
Sodium	Na	10 ^b	Antagoniste du K
Zinc	Zn	20 ^b	Réactions enzymatiques
Cuivre	Cu	6 ^b	Respiration et photosynthèse.
Nickel	Ni	0,1 ^b	Contenu dans l'enzyme uréase qui catalyse l'hydrolyse de l'urée en ammoniac
Molybdène	Mo	0,1 ^b	Synthèse des protéines et métabolisme de l'azote

dans l'ordre suivant : $K > Fe > Mn > Zn > Mg > B$ (Roosta and Hamidpour, 2011), et dans l'eau d'un SRAPS, cette complémentation augmente le rendement de 52,9 à 83,6 % chez le chou pak choï sans influence sur la sécurité alimentaire (Ru et al., 2017). Ces résultats sont toutefois à prendre avec du recul, tant les dimensionnements de systèmes aquaponiques peuvent être variables d'une publication à une autre, aboutissant à des solutions nutritives en quantité et qualité variable, plus ou moins adaptés aux besoins des plantes.

I.4.b) Avantages et inconvénients de l'aquaponie

Par rapport à des élevages piscicoles et aux cultures maraîchères hors sol conventionnelles, les systèmes aquaponiques présentent plusieurs avantages et inconvénients présentés dans le Tableau 2.

I.4.c) Cycle des nutriments

I.4.c.1) Nutrition de la plante

Pour une croissance optimale, une plante a besoin de 16 éléments, détaillés dans le Tableau 3 avec leurs différents rôles dans la physiologie de la plante.

I.4.c.2) Dynamique des nutriments

Concernant les macronutriments, dans l'eau aquaponique les taux de nitrates (NO_3^-) phosphate (PO_4^{2-}) et sulfate (SO_4^{2-}) sont la plupart du temps suffisants pour une bonne croissance végétale (sous réserve du dimensionnement adéquat), contrairement au potassium K^+ et au calcium Ca^{2+} qu'il est parfois nécessaire d'apporter (Rakocy et al., 2004).

En aquaponie le niveau de micronutriments doit être surveillé. Le Fe^{2+} par exemple, a un niveau insuffisant pour la production végétale : il doit donc être apporté pour atteindre une concentration de 2 mg/L par un apport d'ions chélatés pour éviter qu'ils précipitent avant d'être absorbé (Rakocy et al., 2004). Les ions Mn^{2+} , B^{3+} et Mo^{6+} sont moins concentrés par rapport aux formulations hydroponiques mais aucune déficience n'est détectée. Le zinc en revanche y est beaucoup plus concentré mais pas à des taux non dangereux pour les poissons en cas de SRAPS.

I.4.d) Paramètres chimiques du système aquaponique

La mise en place des différents compartiments nécessite de trouver une balance des différents paramètres physico-chimiques de l'eau.

I.4.d.1) pH

Le pH ou potentiel hydrogène, permet de déterminer l'acidité ou l'alcalinité d'une solution, déterminée par l'activité de l'ion hydrogène. Il s'agit d'un paramètre important car il conditionne la disponibilité des nutriments, et donc leur bonne absorption par les plantes (Figure 5). Pour les plantes, à pH faible ou trop élevé les éléments magnésium, calcium, soufre ou molybdène seront peu disponibles. Ce sera le cas du fer, manganèse, bore, cuivre et zinc à pH élevé. En général assurer un pH entre 5,5 et 6,5 est suffisant en hydroponie (Suhl et al., 2016; Yep and Zheng, 2019).

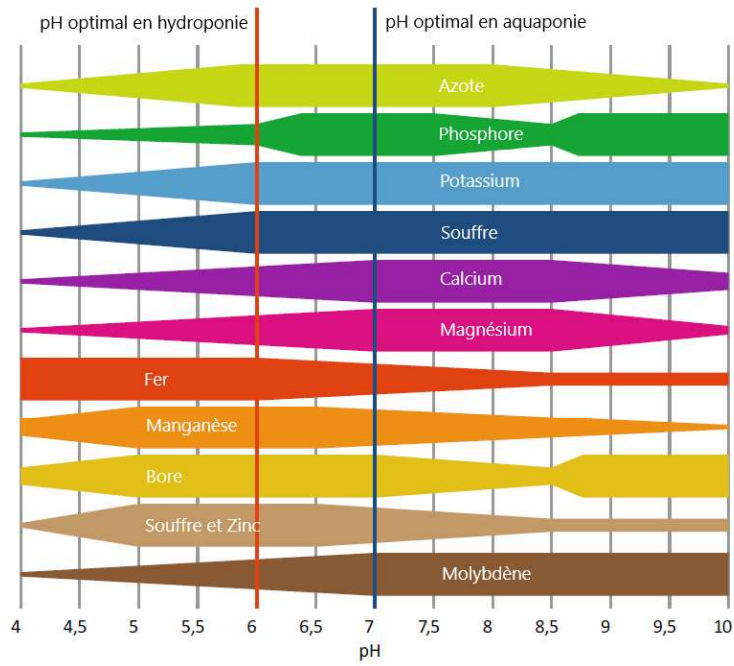


Figure 5 : Disponibilité des nutriments en fonction du pH de l'eau. Rouge : pH en hydroponie Bleu : pH en aquaponie. Conductivité électrique (traduit de Goddek, 2019).

Concernant le compartiment aquacole, la plupart des espèces de poissons tolèrent un pH 6,5-8,5. Les bactéries nitrifiantes sont optimales à pH 7,5-9 (Yep and Zheng, 2019))

Le compromis aquaponique se situe entre 6,5 et 7, et le DRPAS a donc un intérêt dans la gestion indépendante du pH. L'eau aquacole a un pH aux alentours de 7 ce qui ne permet pas une disponibilité optimale des nutriments d'après la Figure 5, sans empêcher une bonne croissance des plantes.

I.4.d.2) Conductivité électrique

La conductivité électrique ou électroconductivité (EC) reflète la quantité de sels minéraux dissous en solution et donc la force de pression osmotique qui a une influence sur la diffusion des substances dissoutes à travers les membranes végétales (Foucard and Tocqueville, 2019). Cependant, elle ne donne aucune information sur la composition nutritive, et notamment la présence ou l'absence d'un nutriment particulier ou la quantité individuelle de chaque nutriment (Goddek, 2019). Mais elle reste un bon indicateur car proportionnelle à la quantité d'éléments disponibles pour les plantes qui n'absorbent que les formes minérales.

Dans le compartiment aquacole il y a un risque, si la salinité de l'eau dépasse 0,5% (soit 6 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 10°C ou 8 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 20°C), valeur rarement atteinte, néanmoins.

Côté végétal l'intervalle recommandé est de 1 500-2 500 jusqu'à 3 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour les plantes qui tolèrent une certaine salinité (comme les tomates). Mais dans un système aquaponique en général 600-1 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ est le maximum atteint, et la productivité est quand même bonne : ceci constitue une curiosité pour les professionnels du hors sol. Les particules organiques les plus fines atteignant le compartiment végétal sont peut-être minéralisées au niveau des racines par des microorganismes rendant ces formes assimilables par les plantes et ce même à pH *a priori* trop élevé.

I.4.d.3) Oxygène dissous

Dans le système aquaponique, l'eau en circulation constante permet de maintenir un taux d'oxygène suffisant. L'oxygène est indispensable pour une croissance optimale des poissons mais une sursaturation engendre un stress oxydatif chez les individus. Des valeurs entre 5 et 7 mg/L pour les espèces d'eau douces et 7 et 11 mg/L pour celles d'eau froide sont correctes. Les bactéries nitrifiantes conservent une activité optimale à 3 mg/L. Les plantes, elles, en consomment pour la respiration cellulaire et il est indispensable qu'un taux supérieur à 4 mg/L soit maintenu. Un niveau d'oxygène à 7 mg/L est donc adapté en aquaponie (Foucard and Tocqueville, 2019).

I.5) Projet et problématique

L'ITAVI (Institut technique d'aviculture, cuniculture et aquaculture) porte depuis 2014 le programme de recherche et développement en aquaponie **APIVA** (AquaPonie, Innovation Végétale et Aquaculture) en association avec d'autres acteurs de la recherche dont l'antenne ASTREDHOR-RATHO de Brindas (69), l'INRAE-Station PEIMA, le CIRAD, ainsi que de l'éducation avec le lycée professionnel La Canourgue (48).

Le programme APIVA a pour but de synthétiser l'état de l'art de la littérature scientifique à ce sujet, modéliser le fonctionnement des systèmes pilotes, analyser la qualité des produits (animaux et végétaux), et mesurer l'impact environnemental de cette pratique. L'objectif principal de ce projet est de transférer des éléments de réflexion à des professionnels des filières piscicoles et/ou horticoles, mais aussi à des porteurs de projets extérieurs à ces filières.

À la station expérimentale Astredhor-RATHO où mon stage s'est déroulé, un pilote expérimental est en place depuis 2015. Un grand nombre d'espèces végétales, notamment des légumes feuilles et herbes aromatiques, ont déjà été testées avec l'obtention de bons rendements et l'évaluation de leur potentiel épuratoire. Une démarche d'analyse du bilan de masse a permis de définir les paramètres pour un ratio quantité d'aliment distribuée (g) / surface végétale cultivée (m²) optimal, qui peut être amené à 20 g/m²/j avec l'association modèle truites/laitues.

L'année dernière, un essai exploratoire mené à petite échelle sur tomate (*S. lycopersicum* v Estiva et Cobra) a été très encourageant. Il cherchait à déterminer si les nutriments du RAS étaient suffisants pour obtenir une qualité nutritionnelle du fruit de la tomate comparable à des méthodes conventionnelles (hydroponie et pleine terre). Bien que la teneur en caroténoïdes des tomates aquaponiques se soit avérée plus faible que chez les tomates cultivées en pleine terre, les résultats étaient inversés pour la teneur en Vitamine C et en polyphénol totaux. (Delorme, 2019). Un débit d'arrosage 4 L/h a montré de meilleurs résultats que du 2 L/h en termes de rendement pour la modalité aquaponie. Des désordres nutritionnels liés à des carences en potassium ont également pu être observés, affectant la qualité du produit fini.

Mon stage s'inscrit dans la continuité de ce projet afin d'approfondir ces résultats et d'optimiser la culture de tomates en aquaponie. Des résultats intéressants ont été obtenus pour de la tomate cultivée en aquaponie par rapport à des plants hydroponiques ou pleine terre, leur qualité étant satisfaisante, mais le rendement 30% et 40% plus faible par rapport à ces deux méthodes de cultures conventionnelles, respectivement. Connaissant les limites de la culture en aquaponie et notamment la concentration moindre voire l'absence de nutriments dans l'eau aquacole, la problématique de mon stage est la suivante : peut-on cultiver des plantes à fruits en aquaponie sans apports d'engrais supplémentaires et avec des performances similaires à l'hydroponie ? Quel est l'impact de l'aquaponie sur la qualité des produits, en comparaison avec la culture hors sol conventionnelle (l'hydroponie) ? Comment optimiser le dimensionnement des systèmes aquaponiques pour des plantes à fruits ?

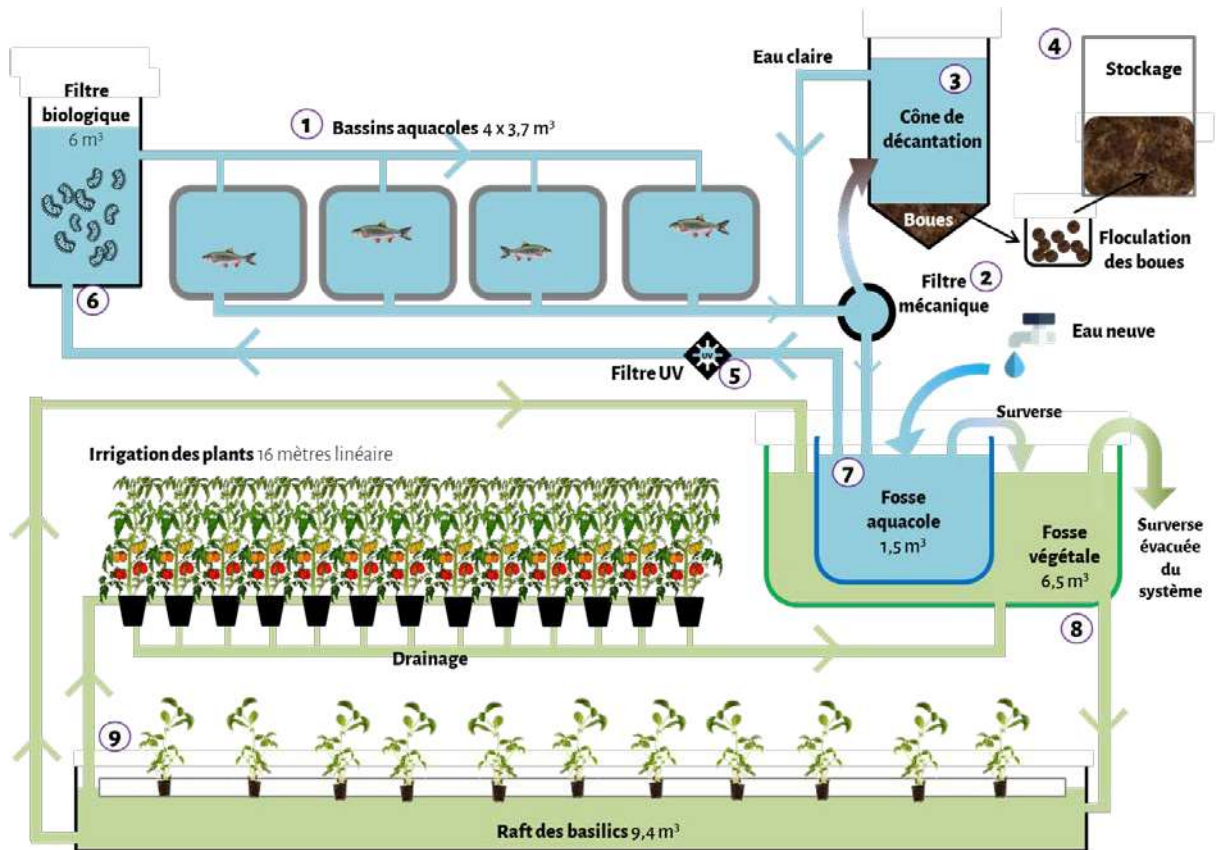


Figure 6 : Représentation schématique du pilote expérimental aquaponique découplé de la station Astredhor-RATHO, (non à l'échelle).

Boucle bleue : circuit aquacole. Boucle verte : circuit végétal. Pilote représenté avec l'essai de mon stage qui comporte 120 plants de tomates, ainsi qu'un essai parallèle avec 1008 plants de basilic sur raft. (Illustration personnelle)

II. Matériel et méthode

L'expérimentation s'est déroulée sur 82 jours du 09/04/2020 au 06/08/2020 avec le système aquaponique pilote de la station Astredhor-RATHO de Brindas (69). Ce système est en place depuis 2014 et constitue un modèle expérimental.

II.1) Compartiment aquacole

II.1.a) Espèces de poissons

Au début de l'essai, un élevage de truites arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*) adaptée aux températures inférieures à 21 °C est déjà en place (1 092 individus équivalant à 270 kg de biomasse, élevées jusqu'à atteindre 350 kg pour 1 070 individus), puis remplacées lors de l'avancement du printemps par des Ides mélanotes (*Leuciscus idus*) (~6 000 individus pour 153 kg atteignant 208 kg à la fin de l'expérimentation). Les poissons sont nourris avec de l'aliment piscicole (dont la composition est détaillée en Annexe 1 en suivant un taux de rationnement des tables fournies par les fournisseurs, qui varie selon la température de l'eau et la biomasse des poissons. Des distributeurs automatiques d'aliment sont disposés au-dessus de chaque bassin permettant la distribution d'une quantité définie répartie dans la journée et adaptée à chaque contenu des bassins.

II.1.b) Schéma global du système avec détail de chaque compartiment

Il s'agit d'un système aquaponique découplé, où les parties aquacole et végétale sont indépendantes. L'eau recircule en boucle au sein du compartiment piscicole, la surverse va permettre d'irriguer les plantes où l'eau va circuler en boucle également. Ainsi, l'eau des poissons communique avec la partie végétale, mais l'eau des plantes ne revient pas vers le compartiment piscicole.

Le système est donc constitué de différentes parties distinctes formant un circuit de circulation de l'eau qui optimise le taux de fermeture du système en fonction des contraintes relatives à l'élevage piscicole et aux besoins en eau pour le compartiment végétal (Figure 6).

Fonctionnement hydraulique

Quatre bassins de 3,7 m³ sont disponibles pour accueillir les poissons. **(1)** L'eau est en circulation continue, avec un débit allant jusqu'à 45 m³/h équivalent à 3 renouvellements par heure dans les bassins. Cette circulation d'eau crée un courant et une oxygénation constante des bassins, complétée par des bulleurs de secours lorsque l'oxygène dissous atteint des taux faibles (<5 mg/L). Les individus sont répartis dans ces bassins pour respecter une densité maximale de 50 kg/m³, car au-delà, il serait nécessaire d'ajouter des diffuseurs d'oxygène liquide pour assurer un taux d'oxygène suffisant pour les poissons.

Filtre mécanique

L'eau aquacole passe dans un filtre mécanique à tambour permettant d'éliminer les plus gros déchets métaboliques solides, c'est-à-dire les fèces des poissons, et ce jusqu'à 60 µm de diamètre. **(2)** Cette matière organique est redirigée vers une fosse de décantation où l'eau claire de surface est réintégrée dans le système. **(3)** Le dépôt, constitue les « boues piscicoles » qui sont par la suite flocculées (avec un flocculant naturel à base de chitine de crustacées, le chitosan) et filtrées par un sac géotextile de 1 000 L de contenance (maille de 100 µm), pour être séchées (jusqu'à 12% de siccité) et stockées. **(4)**

Filtre UV

Avant de retourner au système, l'eau passe dans un filtre UV qui permet d'éliminer les éventuels microorganismes pathogènes. **(5)**

Filtre biologique

En amont des bassins se trouve une cuve de 6 m³ remplie de médias en plastique. Ils représentent une surface de 850 m² par m³ rempli de média (soit environ une surface de 3 000 m² de média, la cuve étant remplie à 60% d'anneaux) sur la surface desquels les microorganismes peuvent se développer. **(6)** Avec leur action de nitrification, les bactéries *Nitrosomas* et *Nitrobacter*, vont purifier l'eau des poissons en convertissant l'ammoniaque, toxique pour les poissons à haute dose, en nitrites puis en nitrates. Une soufflante (KleeBlower 529) avec une pression de 2-2,5 bars et un débit d'air de 350 m³/h assure l'apport en oxygène constant pour le bon développement des bactéries.

Ce filtre a été dimensionné pour pouvoir épurer l'eau d'un système recevant au maximum 10 kg d'aliment par jour (en ayant considéré la quantité d'ammoniaque créée par kilo d'aliment distribué).

Fosse aquacole

L'eau provenant du compartiment piscicole est acheminée, dans une fosse de reprise de 1,5 m³ contenant une pompe immergée. Elle permet de la réintégrer au système piscicole en continu vers le filtre biologique en passant par le filtre UV. **(7)** C'est aussi dans cette fosse de reprise que l'eau neuve est ajoutée de manière progressive sur 24h avec un débit variant de 200 à 500 L/kg d'aliment distribué /jour. Cette valeur constitue le taux de fermeture du système qu'on cherche à réduire au maximum. L'eau neuve permet de conserver une quantité d'eau constante dans le système et de réguler l'évolution du pH de par son alcalinité.

Fosse végétale

L'eau apportée en fonction du taux de renouvellement doit logiquement sortir du système piscicole par débordement : un système de surverse permet d'acheminer ce surplus d'eau piscicole « chargée » en nutriments vers une fosse de reprise végétal de 6,5 m³, cette connexion ayant lieu uniquement dans ce sens. **(8)** C'est cette fosse qui contient l'eau irriguant les rafts de plantes à l'aide d'une pompe, qui permet un flux de 10 m³/h.

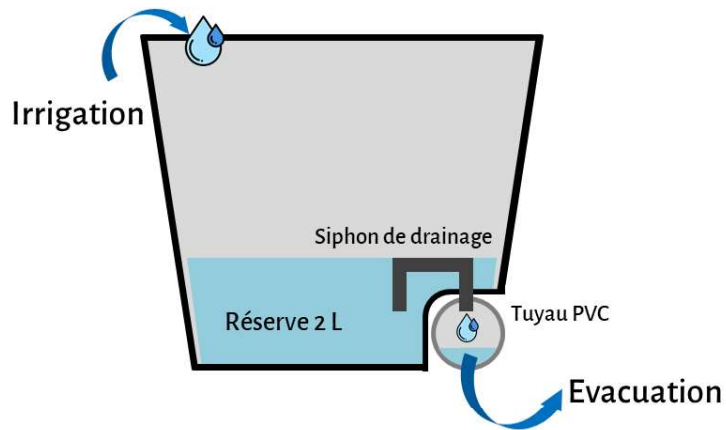


Figure 7 : Pot hollandais BATO et son système de drainage (illustration personnelle)

Tableau 4 : Concentration calculée de la solution fille hydroponique d'après la recette mise au point. * = les concentrations de l'eau neuve ont été soustraites.

	Concentration finale calculée des éléments dans la solution hydroponique (mg/L)	Objectifs vus dans la littérature (mg/L)
N	275,8	200
P	50,0	50
K	298,8	250
Ca*	208,4	200
Mg*	58,8	50
S	100,1	100
Fe	4,32	4
Mn	1,84	0,8
Cu	0,4	0,07
Zn	0,52	0,1
B	0,48	0,3
Mo	0,148	0,03

Références : (Resh, 2012; Trejo-Téllez and Gómez-Merino, 2012)

II.2) Compartiment végétal

II.2.a) Matériel végétal

Des graines de tomates cocktail *Solanum lycopersicum* variété Torelino (De Ruiters™) ont été semées le 27/02/2020 dans de la tourbe et placées en chambre de germination, puis dans une serre ensoleillée lors du stade jeune plant. Cette variété, qui combine facilité et rapidité de croissance a été choisie pour son adaptabilité au milieu hors sol ainsi que pour la qualité gustative de ses fruits. Les plants ont germé le 02/03/2020 et ont été transplantés à six semaines de croissance avec une distance de 50*40 cm entre chaque plant, soit une densité de 0,6 plant/mètre linéaire. Un total de 180 plants répartis sur 6 lignes de 30 pots a été mis en place suivant les modalités décrites plus bas. La culture a été conduite sur fil haut, sur une tige principale, les gourmands étant coupés régulièrement. Les bouquets ont été coupés systématiquement à 8 fleurs de manière à optimiser la croissance des fruits. Les feuilles les plus âgées ont été éliminées progressivement au fur à mesure des récoltes.

II.2.b) Substrat de culture

Les jeunes plants ont été transplantés 5 semaines après germination dans des pots hollandais « BATO » de 10 L de contenance avec réserve d'eau de 2 L, qui permettent un renouvellement de la solution au fond du pot lors des arrosages grâce à leur système de siphon (Figure 7). Le substrat choisi est la perlite, sable siliceux volcanique, qui est légère et très drainante grâce à sa grande porosité. Cela permet sans problème un arrosage abondant sans risquer l'asphyxie racinaire, intéressant en aquaponie où l'eau moins chargée en nutriments est apportée abondamment. L'année dernière, les essais de culture de tomates en aquaponie avec ce substrat ont été concluants.

II.2.c) Irrigation

Un système d'irrigation et d'évacuation des solutions d'irrigation a été monté spécialement pour l'essai. Des électrovannes reliées à un logiciel de monitoring (Hoogendoorn) permettent de contrôler la fréquence et la durée de l'arrosage ou de l'adapter en fonction de l'illumination. Toutes les modalités suivent un programme identique : la durée d'arrosage évolue de 2 à 20 minutes en fonction du stade des plants (besoins hydriques plus importants avec le temps). Trois arrosages par jour sont programmés à heures fixes, complétés lors d'ensoleillement important (un arrosage tous les 650 Joules en cumulé). La quantité de solution arrivant dans les pots dépend du débit attribué à chaque pot, qui diffère selon les modalités. Deux modalités d'irrigation sont mises en place :

Aquaponie

Quatre lignes de 30 pots sont irriguées avec l'eau provenant du système aquacole : l'eau d'irrigation prélevée à la sortie du raft de 12 m³ contenant une culture de basilic qui est lui-même alimenté directement par la surverse de la fosse aquacole. (9) Des apports de micronutriments (Micromax WS TE mix, ICL) sont ajoutés de façon hebdomadaire dans la fosse horticole en ciblant une concentration constante en fer de 4 mg/L. Deux lignes sur

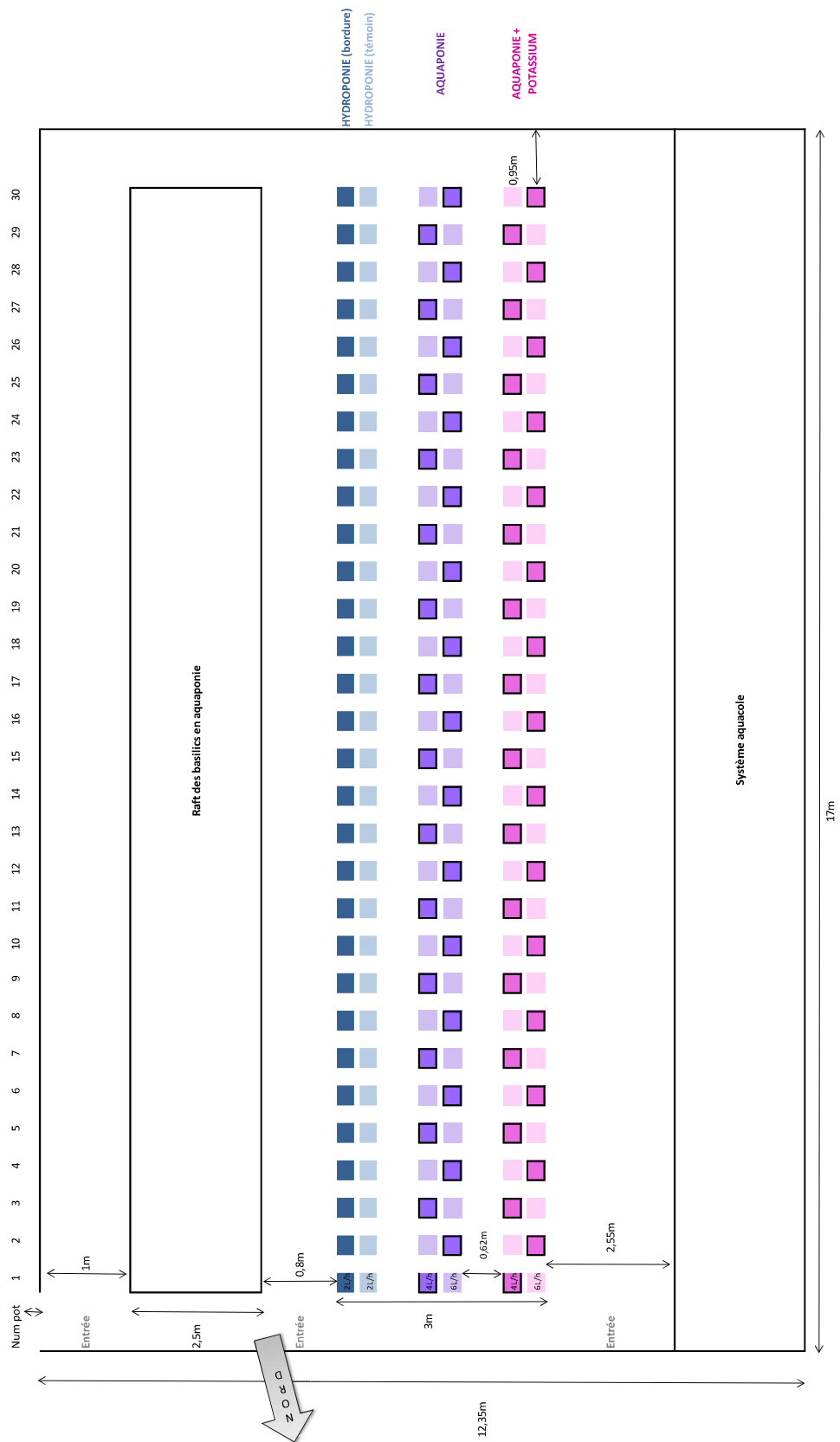


Figure 8 : Disposition de l'expérimentation et répartition des différentes modalités au sein de la serre. Les débits des modalités Aquaponie sont alternés.

quatre sont traitées avec apport foliaire hebdomadaire jusqu'à ruissellement d'engrais organo minéral Myr-Potassium (Italpollina) à 0,5%. Au sein de ces quatre lignes, deux modalités de débit d'arrosage, 4 L/h et 6 L/h sont alternées. Ce débit permet l'apport de volumes journaliers d'arrosage différents entre les deux modalités, proportionnels à la durée de l'arrosage.

Hydroponie

Deux lignes de 30 pots sont irriguées avec une solution hydroponique, une des deux lignes servant uniquement à limiter l'effet bordure qui peut être important côté Est, en créant de l'ombre. La solution hydroponique est composée d'un mélange de 2 solutions stocks, préparées séparément pour éviter la précipitation des anions HPO_4^- et cations Ca^{2+} , ce qui induirait une baisse de leur biodisponibilité pour les plantes. La quantité d'engrais composant ces solutions est calculée de façon à obtenir une solution d'irrigation avec un EC compris entre 2,5 et 3, à $\text{pH} \sim 6$. La composition des engrais utilisés est détaillée en Annexe 2. Des pompes doseuses proportionnelles hydromotrices (MiniDos12, Hydrosystems) permettent de délivrer un pourcentage spécifié des solutions stocks en fonction du débit d'eau, pour constituer la solution nutritive qui arrive aux plants avec la concentration calculée (Tableau 4). L'arrosage se fait avec un débit de 2 L/h.

Pour résumer toutes les modalités :

- Modalité 1 : HY : 30 pots hydroponie 2 L/h (contrôle)
- Modalité 1 doublée et placée sur l'extrémité pour éviter un effet bordure
- Modalité 2 : A4K- : 30 pots aquaponie 4 L/h sans apport de potassium
- Modalité 3 : A6K- : 30 pots aquaponie 6 L/h sans apport de potassium
- Modalité 4 : A4K+ : 30 pots aquaponie 4 L/h avec apport foliaire de potassium 0,5%
- Modalité 5 : A6K+ : 30 pots aquaponie 6 L/h avec apport foliaire de potassium 0,5%

Leur disposition dans la serre est représentée sur la Figure 8.

II.2.d) Drainage

Pour évaluer les besoins de la plante tout le long de sa croissance et adapter l'arrosage durant l'expérimentation, la quantité de solution non retenue dans les pots a été relevée quotidiennement. Des pots hydroponie sont surélevés pour recueillir le surplus d'irrigation et déterminer le pourcentage de drainage qui devait se situer entre 20 et 30%. Les modalités aquaponie étant sur-arrosées, leur drainage n'est pas pris en compte pour déterminer le temps d'arrosage, identique pour tous les pots.

II.3) Climat de la serre

L'expérimentation s'est déroulée dans une serre en verre simple paroi orientée Nord/Ouest. Les systèmes aquacole et végétal se situent dans la même serre ce qui implique de trouver un compromis pour les consignes climatiques.

La serre s'ouvre à partir de 16°C afin de limiter l'échauffement de la serre. Les écrans d'ombrage sont fermés pour un rayonnement supérieur à 950 W/m². Au début de l'expérimentation lorsque les truites étaient encore présentes, les consignes avaient des taux plus bas.

II.4) Suivi sanitaire

Un suivi hebdomadaire est réalisé pour surveiller l'apparition d'agents pathogènes sur les plants. La présence/absence d'insectes (aleurode, pucerons, thrips, acariens, chenilles..) sur les plants et sur plaques adhésives permet de suivre la pression des ravageurs et d'adapter Protection Biologique Intégrée mise en place via l'introduction d'auxiliaires.

II.5) Paramètres de suivi

Quotidiennement à l'aide de sondes portatives HQD de chez Hach, et de sondes fixes connectées à un logiciel, le suivi de différents paramètres est réalisé : température de l'eau (°C), concentration en oxygène dissous (mg/L), pH, et électroconductivité (EC) (µs/cm) dans les bassins aquacoles, la fosse végétale et la solution hydroponique, et les drainages.

Les concentrations en nutriments des fosses aquacole, végétale et de la solution hydroponique sont dosées de façon hebdomadaire sur place à l'aide de kits de dosages spectrophotométriques de chez Macherey Nagel (Nanocolor®) et Hach (LCK®), complétés avec des analyses à différents temps réalisée par Eurofins.

La taille des plants est relevée toutes les semaines. Lors des récoltes, le diamètre des fruits est mesuré à l'aide d'un pied à coulisse pour en déterminer le calibre, et le poids des fruits est mesuré à l'aide d'une balance de précision.

Une analyse des paramètres physiques (fermeté, colorimétrie, matière sèche, acidité, indice réfractométrique), chromatographiques (Sucres, acides organiques, vitamine C et E, caroténoïdes, polyphénols et composés volatils d'arômes) et organoleptiques (10 descripteurs notés sur 10 par un panel entraîné) est commandée au CTIFL (Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes). Le lot du 3^e bouquet des 30 plants des modalités HY et A4K- est envoyé pour comparer hydroponie et aquaponie.

II.6) Analyses statistiques

Au vu du nombre de facteurs pouvant influencer les résultats de l'expérimentation, des modèles de régressions linéaires sont établis et comparés à l'aide du logiciel RStudio afin d'arriver à des analyses de comparaison de moyennes (Student ou Tukey après Anova, selon le nombre de modalités comparées).



Figure 9 : Evolution de la biomasse totale en stock des poissons et ratio de la quantité d'aliment journalière distribuée par m² de surface cultivée le long de l'expérimentation

Tableau 5 : Résumé des paramètres zootechniques de l'élevage de poissons tout le long de l'essai

	Truites	Ides mélanotes
Date d'entrée dans le système	17/04/2020	13/05/2020
Date de sortie du système	12/05/2020	31/07/2020
Total jours	25	79
Prise de masse (kg)	49,9	146,3
Aliment distribué (kg)	43,7	212,7
Indice de conversion	0,9	1,5
Taux de mortalité (%)	0,4	1,9

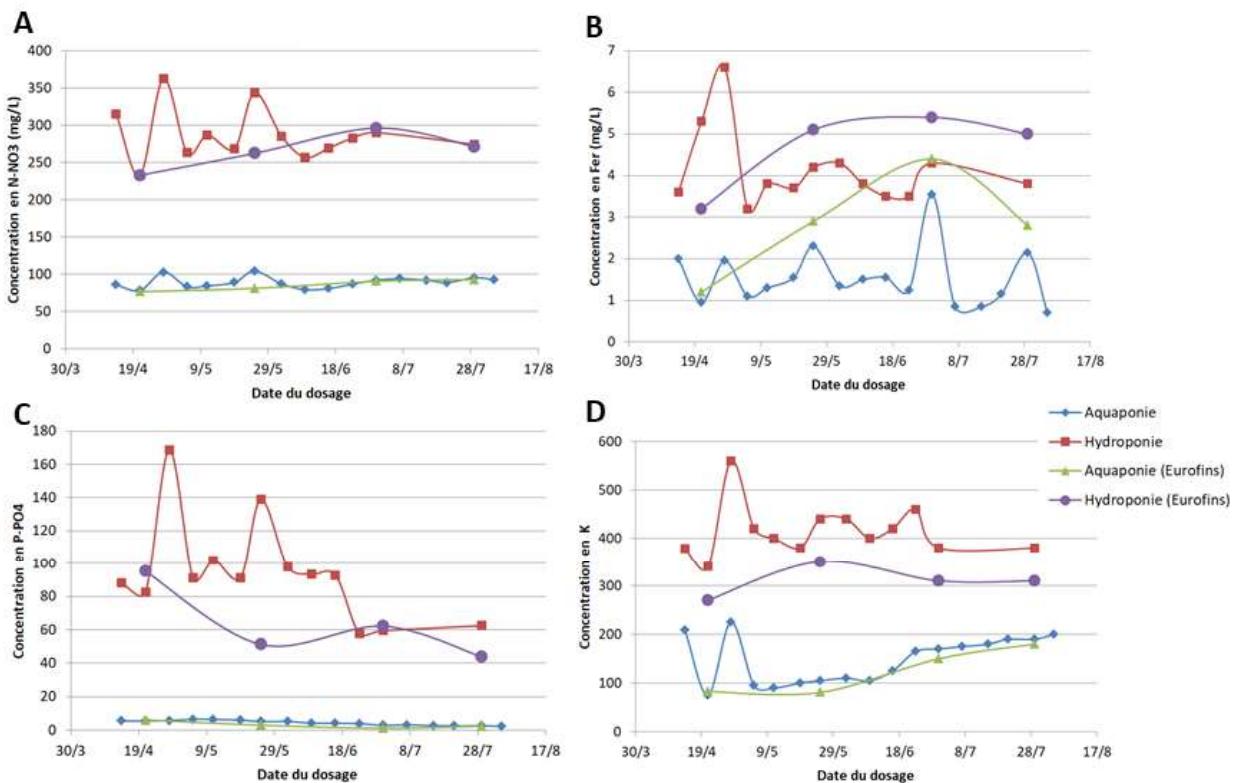


Figure 10 : Evolution de la concentration en éléments des solutions d'irrigation déterminée par dosages en kit et comparaison avec dosages en laboratoire. A : Azote nitrique ; B : Fer ; C : Orthophosphate ; D : Potassium.

III. Résultats

III.1) Compartiment piscicole

III.1.a) Croissance des poissons

Tout au long de l'expérimentation, l'évolution des individus de l'élevage était suivi de près, et notamment leur croissance pour adapter les rations à distribuer. L'évolution de la biomasse du cheptel ainsi que la quantité d'aliment distribuée sont représentées sur le graphique de la Figure 9. Au cours de l'essai, le 13/05/2020, les truites initialement présentes dans l'élevage sont remplacées par des ides mélanotes, diminuant la biomasse en stock de plus de moitié, passant de 350 à 150 kg. A la fin de l'essai, la biomasse des ides mélanotes atteint les 300 kg. Le ratio aliment distribué / surface cultivée diminue beaucoup avant la sortie des truites en passant de 25 à 10 kg/m²/j puis remonte progressivement pour atteindre 45 kg/m²/j à la fin de l'essai (pour un total distribué sur l'essai de 284 kg). Concernant les données de prise de poids (Tableau 5), il est intéressant de souligner que l'indice conversion des truites est plus faible que celui des Ides mélanotes (0,9 contre 1,5). Le taux de mortalité est plus élevé pour les Ides mélanotes avec la perte de 1,9% du cheptel contre 0,4% pour les truites.

III.2) Dynamique des nutriments

III.2.a) Comparaison des solutions aquaponiques et hydroponiques

Les graphiques de la Figure 10 représentent l'évolution de la concentration en éléments des solutions aquaponiques et hydroponiques tout le long de l'essai. Les valeurs de contrôle du laboratoire confirment bien les dosages pour le N-NO₃, le P et le K, sauf celle du phosphore le 25/05 et des écarts un peu plus marqués pour le K à haute dose (Figure 10). Pour le Fe, nos valeurs semblent sous estimées par rapport à leurs résultats, tout comme pour le potassium hydroponique. A noter que les incertitudes Eurofins sont de 15%.

La principale différence entre les solutions hydroponique et aquaponique est la concentration en éléments minéraux, qui est beaucoup plus faible dans la solution aquaponique. Elle est environ 3 fois moins concentrée en azote nitrique (aux alentours de 100 mg/L sur le long de l'expérimentation contre 280 mg/L), 1,5 fois moins pour le fer (3-4 mg/L contre 5 mg/L), 10 fois moins en P (8 contre 80 mg/L) et entre 2 et 4 fois moins concentrée pour le K (100 en début et 200 en fin d'expérimentation contre 350-400 mg/L).

Dans la fosse végétale aquaponique, le taux de N est passé de 80 à presque 100 mg/L et le taux de P a diminué pour passer de 6 à presque 2 mg/L. Le taux de K a très largement augmenté de 75 à 200 mg/L.

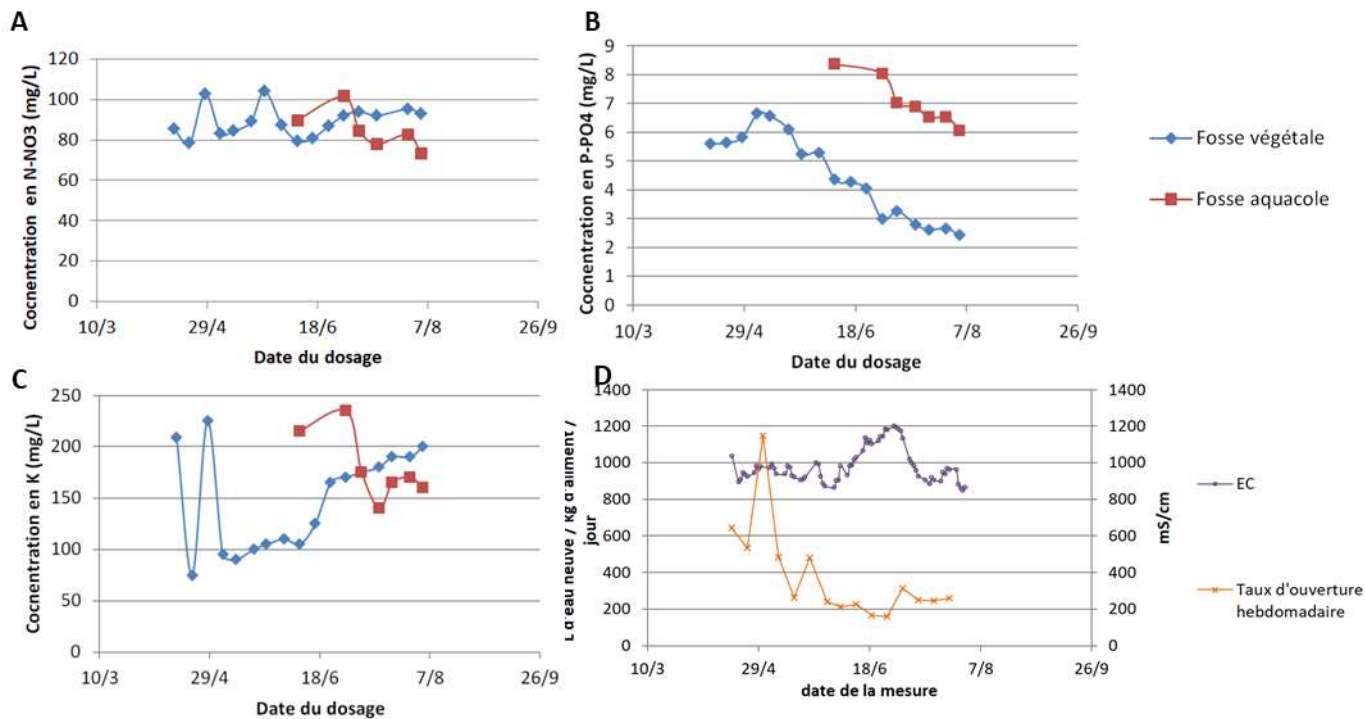


Figure 11 : Evolution de la concentration en nutriments dans les compartiments du système. Concentration en A : Azote nitrique ; B : Orthophosphate ; C : Potassium ; D : Evolution du taux d'ouverture du système et de l'EC du bassin piscicole.

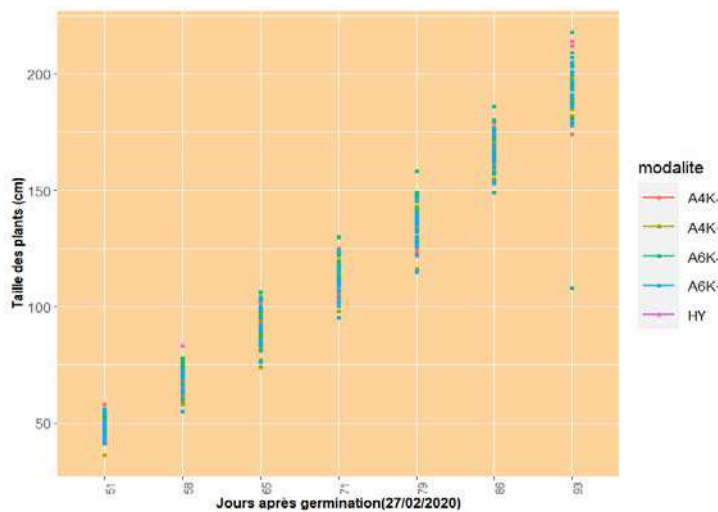


Figure 12 : Evolution de la taille des plants de tomates suivi après la transplantation

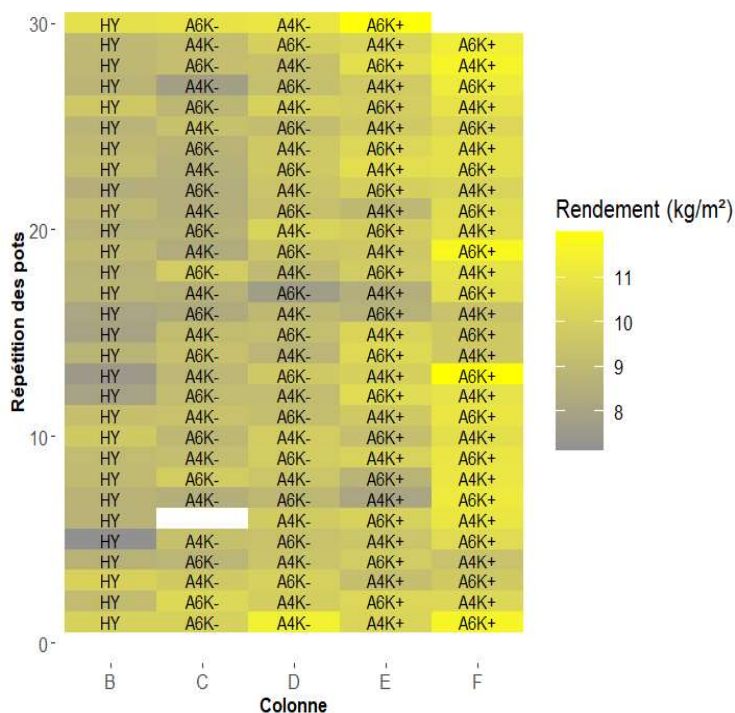


Figure 13 : Rendements obtenus par plant, en fonction de leur position spatiale dans la serre. Les pots n'apparaissant pas sur ce graphique ont des données aberrantes et ont été retiré du jeu de données

III.2.b) Dynamique des nutriments entre fosse aquacole et végétale

Le suivi des nutriments dans les compartiments piscicole et végétal permet de déterminer que 60% du phosphore est absorbé en moyenne (Figure 11). Cette courbe d'abattement est beaucoup moins nette pour le N et le K. Ces graphiques peuvent être comparés avec le taux d'ouverture du système qui est directement en relation avec le taux de nutriments disponibles dans le bassin piscicole : c'est-à-dire que lorsque ce taux d'ouverture est abaissé progressivement, l'EC augmente, et inversement.

III.3) Suivi végétal

III.3.a) Taille des plants

La taille des plants est très homogène entre les 5 modalités à chaque point de mesure (Figure 12). La taille a été mesurée de 55 à 97 JAG, où les plants mesuraient en moyenne, toutes modalités confondues car non significativement différentes, respectivement $49,7 \pm 0.8$ et 194.2 ± 2.9 cm.

III.3.b) Facteurs non contrôlés impactant le rendement

III.3.b.1) Rendement selon la position dans la serre

Le rendement est observé en fonction de la position de l'ensemble des plants dans la serre (Figure 13). Le gradient de couleur met en évidence que les lignes F, et E dans une moindre mesure, ont obtenu les rendements les plus élevés, la gamme de couleur de ses lignes-là se rapprochant de 12 kg/m^2 contrairement aux autres lignes, B, C et D qui n'atteignent jamais une valeur aussi élevée. Les lignes des deux extrémités, 1 et 30, présentent aussi des rendements proches de la limite haute du gradient.

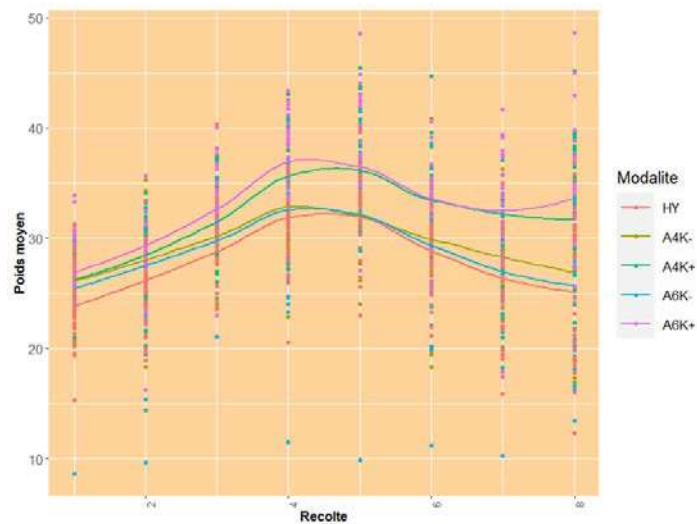


Figure 14 : Evolution du poids moyen des tomates hydroponiques (HY) et aquaponiques (A) au fil des récoltes. Premier et huitième bouquet récoltés respectivement à 100 et 157 JPG. (N=30).

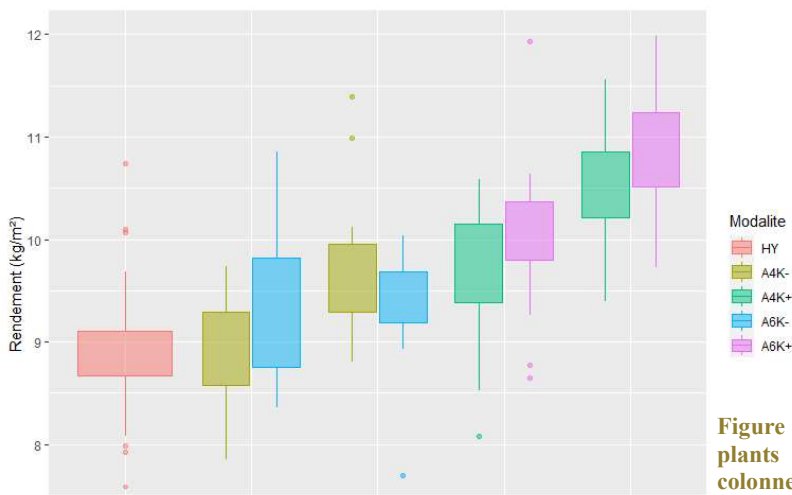


Figure 15 : Rendement en fonction de l'emplacement des plants dans la serre. Chaque lettre correspond à la colonne où se trouvent les plants d'après le plan

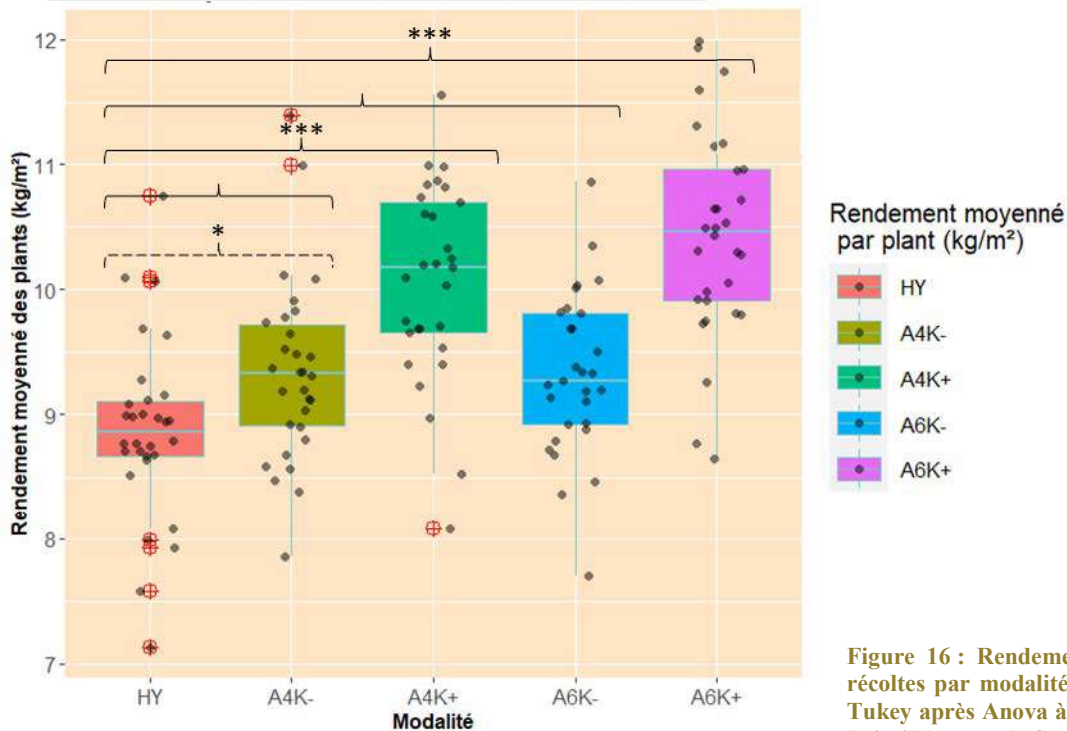


Figure 16 : Rendement de l'ensemble des récoltes par modalités confondues. Test de Tukey après Anova à 2 facteurs : ***<0.05. Pointillés : test de Student p=0.018

III.3.b.2) Rendement au fil des récoltes

Le poids moyen des fruits est plus important aux récoltes 4 et 5 (Figure 14) En moyenne pour tous les plants, on passe de $26,2 \pm 3,2$ g pour la récolte 1, à $35,1 \pm 4,4$ g à la récolte 5 pour retomber à $29,2 \pm 6$ g à la récolte 8. Les grappes sont plus homogènes en début d'expérimentation, avec des écarts types moins étendus. Les modalités sont moins homogènes entre elles à la fin, avec les deux modalités AK+ notamment, qui ont des poids moyens par fruits plus élevés.

Au vu de ces résultats, des modèles de régressions linéaires (non détaillés ici) prenant en compte tous les facteurs influençant le rendement sont réalisés, afin de se rendre compte de leur impact les uns par rapport aux autres, et de ne pas conclure trop rapidement sur l'effet d'un seul facteur isolé.

III.3.c) Facteurs d'intérêt impactant le rendement

III.3.c.1) Position dans la serre

Pour avoir une vue d'ensemble, le rendement de chaque modalité est représenté en fonction de la colonne dans laquelle elle se trouve (Figure 15). Il apparaît clairement que les rendements semblent suivre le positionnement des plants. La référence hydroponie, se situe à $8,9 \pm 1,3$ kg/m², les colonnes C et D sans traitement $9,3 \pm 1,1$ et $9,5 \pm 1,3$ kg/m², et enfin E et F avec traitement atteignent $9,8 \pm 1,4$ et $10,6 \pm 1,3$ kg/m² respectivement.

III.3.c.2) Effet Irrigation

En faisant un test multiple de comparaison de moyennes des rendements entre toutes les modalités, la modalité hydroponie ressort significativement différente des modalités AK+, mais pas différentes des AK- (Figure 16). En faisant un test de student simple entre HY et AK4-, une différence significative ressort. Lorsque le facteur irrigation est isolé des autres facteurs de variation, il apparaît que le rendement des plants aquaponie toutes modalités confondues est significativement plus élevé qu'en hydroponie, avec un rendement de $9,8 \pm 1,9$ kg/m² contre $8,9 \pm 1,3$ kg/m² (Figure 17). Cependant au sein d'un modèle prenant en compte le positionnement des plants, l'effet Emplacement (Figure 13) ressort d'avantage significatif que l'effet Irrigation.

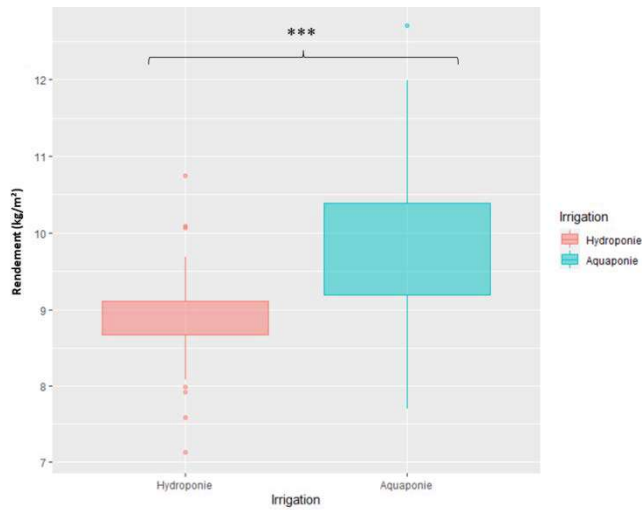


Figure 17 : Rendement des plants de tomates en fonction de l'irrigation, hydroponie et Aquaponie toutes modalités confondues. Test de Student $p = 7,35.10^{-7}$

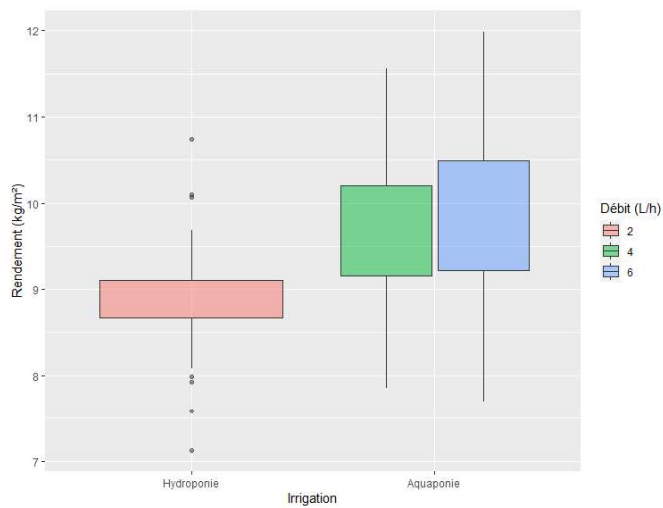


Figure 18 : Rendement en fonction du débit d'irrigation test de Student, $p \text{ value} = 0.718$. Significativité du T de Student est indiquée : " " >0.05 , * <0.05 , ** <0.01 ou *** <0.001 . $p \text{ value} = 0.226$

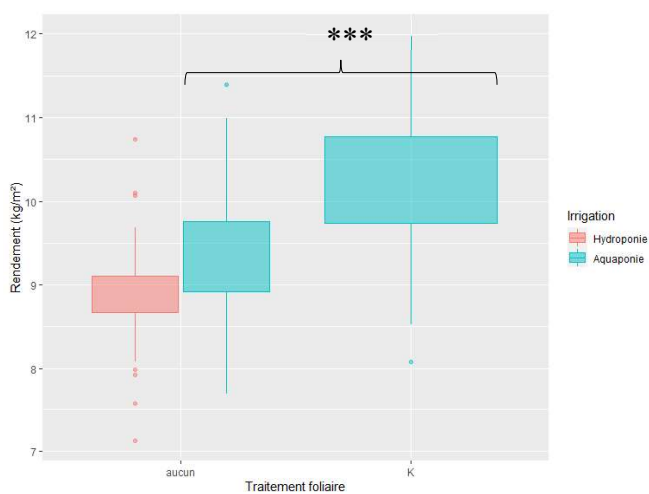


Figure 19 : Rendement en fonction du traitement foliaire (apport de Potassium foliaire 0,5 % ou non) et de l'irrigation (hydroponie ou aquaponie). Significativité du T de Student est indiquée : * <0.05 , ** <0.01 ou *** <0.001 . $p \text{ value} = 1,6.10^{-9}$

III.3.c.3) Effet Débit d'arrosage

Les rendements obtenus en fonction du débit d'arrosage sont représentés sur la Figure 18. En Aquaponie, il ne ressort aucune différence significative du rendement entre les deux modalités de débit d'irrigation avec un rendement de 9,69 kg/m² pour 4 L/h et 9,32 kg/m² en 6 L/h (Figure 18). Cette modalité étant bien répartie dans la parcelle, l'effet colonne n'a pas d'impact dans les modèles.

III.3.c.4) Effet Traitement foliaire

L'impact du traitement foliaire au potassium sur le rendement est représenté sur la Figure 19. En Aquaponie, les plants ayant bénéficié d'un apport foliaire au potassium ont obtenu des rendements significativement plus élevés avec 10,1 contre 9,3 kg/m² (Figure 19). Cependant, les modèles accordent une significativité plus grande à la position des colonnes qu'au facteur traitement.

Tableau 6 : Analyse des composés d'intérêt nutritionnel de tomates issues des deux modalités d'irrigation

	Hydroponie	Aquaponie (4L/h κ-)	p
L*	36,8 (0,1)	37,0 (0,2)	ns
a*	20,1 (0,5)	20,1 (0,4)	ns
b*	18,1 (0,2)	18,4 (0,5)	ns
Saturation (C)	27,0 (0,4)	27,3 (0,7)	ns
Angle de teinte (H)	42,1 (0,7)	42,5 (0,3)	ns
Fermeté (ID 25)	53,2 (1,2)	54,4 (0,4)	ns
Matière sèche (%)	8,4 (0,0)	7,6 (0,1)	***
Indice réfractométrique (°Brix)	7,2 (0,0)	6,5 (0,1)	***
Acidité titrable (meq/100g)	7,0 (0,1)	6,7 (0,3)	ns
Sucres (g/100g)			
Saccharose	0,02 (0,00)	0,03 (0,00)	ns
Glucose	2,60 (0,08)	2,27 (0,09)	**
Fructose	3,12 (0,08)	2,81 (0,11)	*
Total	5,74 (0,16)	5,11 (0,20)	*
Acides organiques (g/100g)			
Acide citrique	0,61 (0,01)	0,62 (0,02)	ns
Acide malique	0,04 (0,01)	0,05 (0,01)	***
Total	0,65 (0,01)	0,67 (0,03)	ns
Vitamine C (mg/100g)			
Acide ascorbique	26,8 (1,0)	27,8 (0,9)	ns
Acide déhydroascorbique	1,2 (0,3)	1,2 (0,2)	ns
Total	28,0 (0,8)	28,9 (0,9)	ns
Caroténoïdes (mg/100g)			
Phytoène	0,32 (0,03)	0,31 (0,03)	ns
Lutéine	0,03 (0,00)	0,03 (0,00)	ns
Lycopène	4,62 (0,72)	4,95 (0,11)	ns
β-Carotène	0,55 (0,02)	0,49 (0,01)	*
Total	5,52 (0,76)	5,77 (0,08)	ns
Vitamine E (mg/100g)			
δ-Tocophérol	0,01 (0,00)	0,01 (0,00)	ns
γ-Tocophérol	0,21 (0,02)	0,19 (0,01)	ns
α-Tocophérol	0,61 (0,02)	0,50 (0,03)	**
Total	0,84 (0,01)	0,71 (0,04)	**
Polyphénols (mg/100g)			
Quercetin-3-rutinoside	1,23 (0,04)	1,28 (0,09)	ns
Phloretin dihexoside	0,36 (0,04)	0,47 (0,02)	*
Naringenin chalcone	0,05 (0,01)	0,08 (0,01)	**
Flavonoïdes	1,64 (0,08)	1,83 (0,11)	ns
Caffeic acid hexoside I	0,47 (0,03)	0,54 (0,03)	*
Caffeic acid hexoside II	0,18 (0,02)	0,17 (0,02)	ns
Caffeic acid hexoside III	0,33 (0,01)	0,33 (0,01)	ns
Chlorogenic acid	1,14 (0,14)	1,24 (0,22)	ns
Cryptochlorogenic acid	0,61 (0,08)	0,64 (0,03)	ns
Coumaroyl quinic acid	0,16 (0,10)	0,29 (0,09)	ns
Dicaffeoyl quinic acid I	0,03 (0,00)	0,03 (0,00)	ns
Dicaffeoyl quinic acid II	0,06 (0,01)	0,06 (0,00)	ns
Tricaffeoylquinic acid	0,04 (0,01)	0,04 (0,00)	ns
Acides phénoliques	3,00 (0,36)	3,35 (0,34)	ns
Total	4,64 (0,39)	5,18 (0,23)	ns

III.4) Dosage des composés d'intérêt nutritionnel des fruits

Le dosage nutritionnel est réalisé sur les échantillons HY et A4K- (Tableau 6). La couleur et la fermeté des lots ne sont pas différents, et cette homogénéité est notable même visuellement (Figure 20). Les échantillons Aquaponie ont des valeurs de matières sèches et d'indice réfractométrique significativement inférieurs. Concernant les sucres, aucune différence n'est mise en évidence pour les teneurs en saccharose, sucre minoritaire. Par contre les taux de glucose, fructose et sucres totaux sont significativement supérieurs de l'ordre de 11 à 14% en hydroponie par rapport à l'aquaponie, avec respectivement 5,74 contre 5,11 g/100g en aquaponie. Au niveau de l'acidité, pas de différence sur les acides totaux, mais un taux d'acide malique, acide organique minoritaire légèrement plus faible pour la modalité hydroponie (0,04 vs 0,05 g/100g). Excepté quelques différences significatives pour quelques composés (β -carotènes, α -tocophérol...) les échantillons sont très proches d'un point de vue biochimique avec des taux de vitamine C, caroténoïdes et polyphénols qui ne sont pas différents.

Analyse des tissus des fruits

III.5) Globalement et au vue des incertitudes de mesures, le taux de minéraux NPK présents dans les fruits de tomates Aquaponie ne diffère pas des tomates hydroponiques (Tableau 7). Le taux d'azote est égal, et le taux de phosphore semble être légèrement plus faible en aquaponie. Le potassium y est légèrement plus élevé dans les tomates traitées au potassium mais pas significativement.

III.6) Analyse sensorielle des fruits

Les profils sensoriels des deux modalités, basés sur 10 descripteurs notés sur 10, ressortent significativement identiques, excepté pour la taille qui est significativement plus petite pour les tomates hydroponiques, avec une note de 2,7 contre 3,2 (Figure 21). Les profils sont superposés pour tous les autres critères : Arômes (4), Acidité (4,1), Sucres (3,9), Farinosité (0,7), Fondant (5), Fermeté (3,1), Juteux (6,8), Croquant (4,1) et Fermeté à la coupe (4,4).

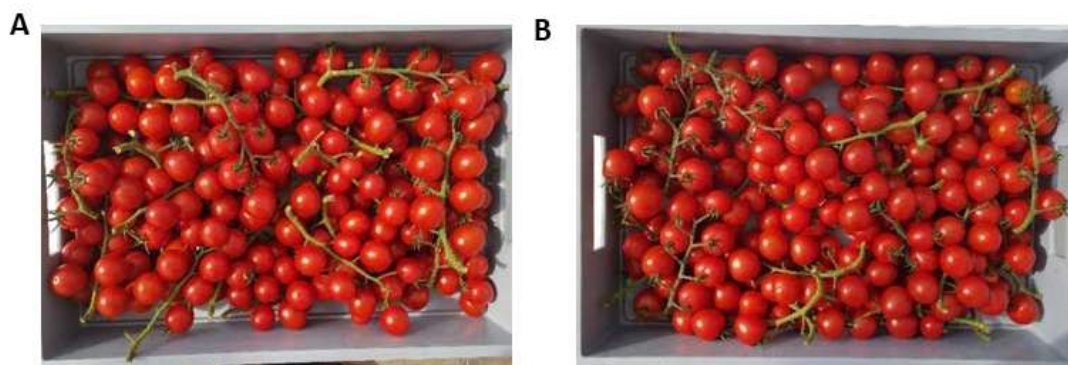


Figure 20 : Aperçu des lots de la 3e récolte ayant servis aux analyses nutritionnelles et sensorielles. A : Hydroponie. B : A4K-

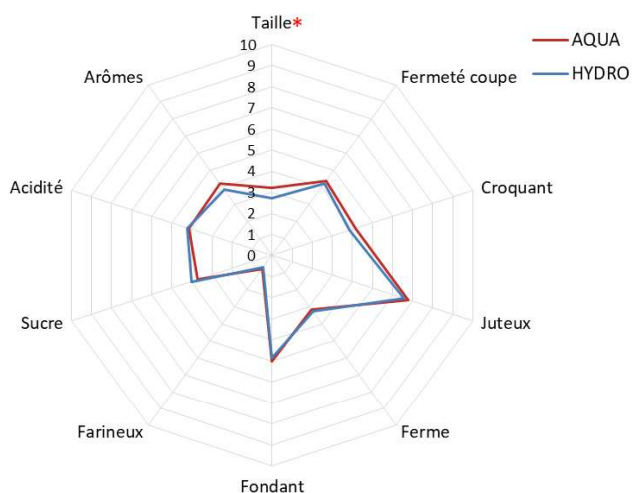


Figure 21 : Profils sensoriels moyens des tomates Aquaponie et Hydroponie (N=14)- Significativité du T de Student est indiqué : *<0.05, **<0.01 ou ***<0.001.

Tableau 7 : Analyse des minéraux contenus dans les tissus des fruits des différentes modalités de culture

Composé	Unités	A4K-		A4K+		HY	
		mesure	ET	mesure	ET	mesure	ET
Analyses compositionnelles							
Azote total	g/100g	0,14	0,06			0,13	0,06
Nitrates	mg/kg	10,1	7,2			17	7,5
Nitrates (en NaNO3)	mg/kg	13,9	9,9			23,3	10,4
Analyses élémentaires							
Sel (calc du Na)	g/100g	<0,01				<0,01	
Sodium	g/100g	<0,005				<0,005	
Potassium	mg/kg	2200	440	2400	480	2200	440
Calcium	mg/kg	67	13			64	13
Phosphore	mg/kg	220	44			290	58
Fer	mg/kg	2,6	0,7			3,7	0,8
Magnésium	mg/kg	75	15			73	15
Manganèse	mg/kg	0,4	0,1			1	0,2
Zinc	mg/kg	2,3	0,6			2,8	0,7

IV. Discussion

Les filières aquacole et horticole, deux piliers de notre consommation alimentaire, se heurtent à diverses problématiques qui trouvent un compromis grâce à l'aquaponie. Il s'agit d'un système de production combinant ces deux domaines qui se démocratise de plus en plus. Il a déjà fait ses preuves sur de nombreuses cultures végétales et notamment de plantes à feuilles.

Le projet de R&D en aquaponie mené par l'ITAVI se concentre sur l'optimisation et l'approfondissement des connaissances du système de production en aquaponie, autant du point de vue technique qu'économique, environnemental et réglementaire. Dans le cadre d'une des actions du programme axée sur la diversification des variétés végétales cultivables en aquaponie, les porteurs du programme ont souhaité tester la mise en place d'une culture de tomates cocktails en testant différentes modalités à comparer à la méthode hors-sol conventionnelle (l'hydroponie) et ce afin de mesurer l'impact de l'aquaponie sur le rendement et la qualité des produits.

IV.1) Importance du compartiment piscicole

En aquaponie, la bonne gestion du stock de poisson est primordiale car ce compartiment constitue la source de nutriments servant à la croissance des plantes. La truite est une espèce très commune en aquaculture très facilement valorisable en consommation alimentaire, contrairement aux ides mélanotes moins répandues mais valorisables en tant que vifs pour la pêche sportive. D'ailleurs, pour les ides mélanotes, il n'existe pas de tables de rationnement comme pour les truites, qui indiquent la quantité adéquate d'aliment à distribuer en fonction de la biomasse et de la température : il a donc fallu adapter nous-même la quantité à distribuer.

Au début de l'expérimentation, l'élevage était constitué de 300 kg de truites, ce qui assurait un approvisionnement largement suffisant en minéraux pour la partie végétale. Des bilans de masse effectués précédemment sur le pilote, ont permis de modéliser le rejet des nutriments et de déterminer le seuil plateau de la concentration maximale en nutriments produite par le système. Avec les paramètres zootechniques (taux d'ouverture notamment) de cette expérimentation, ce seuil est de 95 mg/L pour le N, et 8 mg/L pour le P. Ici dès le début de l'essai, les concentrations en nutriments étaient donc hautes par rapport à la capacité du système.

Par ailleurs, le ratio quantité d'aliment/surface cultivé n'a pas été stable mais la quantité de nutriments dans la fosse végétale n'en a pas été impactée : le volume en circulation est important et était déjà très chargé en nutriments. Une référence en aquaponie est le travail du Dr Rakocy indiquant un ratio optimal de 60-100 g/m²/jour (Rakocy et al., 2006), valeur obtenue de manière empirique sans approche de modélisation sur un modèle tilapia/laitues avec un aliment à 40% de protéine. Cette valeur paraît surévaluée par rapport à notre essai, où un ratio de 30 g/m²/jour

en moyenne sur tout l'essai a été largement suffisant pour répondre aux besoins des tomates. Les travaux précédents de l'ITAVI menés sur le dimensionnement des systèmes aquaponiques montrent qu'un ratio de 20 g/m²/jour est en pratique largement suffisant pour de nombreuses cultures végétales. En dessous de 15 g/m²/jour, le phosphore peut souvent devenir l'élément limitant. Lennard arrive même à atteindre descendre à 13 g/m²/j, taux qui reste spécifique à son modèle laitue/tilapia (Lennard, 2012).

Concernant l'efficacité des espèces de poissons utilisées, l'indice de conversion (IC) en est un bon indicateur : c'est un paramètre sans unité qui est un ratio entre la quantité d'aliment distribuée (kg) et le gain de biomasse piscicole (Foucard and Tocqueville, 2019). Plus l'IC est faible, plus les performances zootechniques sont bonnes, car plus l'aliment est bien métabolisé par les animaux. Un bon IC implique une croissance plus rapide et des rejets minimisés. Ainsi les ides mélanotes avec un IC de 1,5 ont une moins bonne croissance et ont tendance à produire davantage de rejets NPK que les truites qui ont un IC de 0,9, ce qui s'explique par le niveau de domestication beaucoup plus abouti pour les truites arc en ciel en comparaison avec les ides qui sont traditionnellement élevés en étang. L'IC doit donc être pris en compte dans les modèles de rejets pour prédire au mieux la composition des effluents piscicoles pour chaque espèce de poissons. Enfin, le taux de mortalité des ides est plus élevé que celui des truites, mais expliqué par le fait que leur arrivée dans le pilote se soit passée au cours de l'essai, source de stress pour les individus nécessitant une période d'acclimatation.

Dans un cadre de réflexion autour de l'optimisation des systèmes aquaponiques avec une approche purement maraîchère (c'est-à-dire dont le but premier de l'activité est avant tout de faire du chiffre d'affaire avec de la vente de végétaux), il semble pertinent de s'interroger sur l'intérêt de choisir des espèces de poissons « trop » performantes en terme de transformation de l'aliment : en effet, une espèce comme l'ide (ou encore la carpe ou le tilapia) produira plus de rejets azotés et phosphatés dissous que la truite arc en ciel pour une même quantité d'aliment distribué, ce qui permet de diminuer la quantité de poissons par rapport à une surface végétale. Cela permet par la même de minimiser la taille du compartiment aquacole et donc les investissements et coûts de fonctionnement, ce qui est souhaitable par exemple pour un maraîcher souhaitant se convertir en aquaponie sans pour autant devenir aquaculteur.

IV.2) Efficacité de la solution aquaponique

IV.2.a) Comparaison avec l'hydroponie

Globalement, les dosages réalisés par le laboratoire Eurofins coïncident avec nos dosages ce qui conforte nos résultats (Figure 10). Obtenir des mesures exactes est assez compliqué, mais ces données s'approchent de la réalité.

Les dosages obtenus en hydroponie correspondant bien aux taux calculés (Tableau 4). Le taux de P a diminué en mai suite à un changement de référence d'un produit dans la recette dont la proportion en P était moindre tout en restant dans la plage de taux préconisés pour la

culture de tomates en hydroponie. Pour le N, P et K, les concentrations en hydroponie sont très largement supérieures à la solution aquaponique.

Dans cette dernière, la concentration en Fe est très fluctuante : c'est normal car les microéléments n'étant pas présents dans le compartiment piscicole, la fosse végétale doit être complétée de façon hebdomadaire en micro éléments afin de ne pas provoquer de carences nutritionnelles chez les plantes. La quantité à apporter est calculée par rapport à un taux objectif de 4 mg/L pour le Fe, équivalent à celui de la solution hydroponique. Après chaque dosage la fosse est complétée pour atteindre ce taux, sauf la veille des envois d'échantillons à Eurofins où la fosse était complétée sans calcul préalable, d'où les fortes variations de concentration observées.

IV.2.b) Dynamique des nutriments en aquaponie

IV.2.b.1) Balance entre les deux compartiments

Les graphiques de la Figure 11 mettent en évidence les différences de concentration en éléments dans les compartiments du système aquaponique. On s'attendrait notamment à ce que la partie piscicole soit plus concentrée, mais les courbes obtenues ne présentent pas un résultat si simple.

La concentration des nutriments dépend de plusieurs facteurs :

- 1) Le taux d'ouverture du système (exprimé en L d'eau neuve/kg d'aliment distribué/jour) qui a un effet de dilution des nutriments dans l'eau du système ; cet effet peut prendre du temps à devenir visible tant la quantité d'eau dans le système est importante par rapport à la quantité d'eau neuve apportée, il est donc difficile de corrélérer une baisse ou une hausse en éléments avec un évènement ponctuel d'évolution du taux d'ouverture. Si cet évènement devient chronique sur plus d'une semaine, il devient alors possible de faire des corrélations.
- 2) Le contrôle du pH par l'ajout de bicarbonate de potassium, qui augmente donc de manière notable la concentration en K dans le système ; Le contrôle du pH est par ailleurs lié au taux d'ouverture du système, car l'eau neuve présente une dureté carbonatée importante qui vient en partie compenser le phénomène d'acidification produit dans le filtre biologique.
→Le tout constitue un équilibre fin qu'il faut perpétuellement contrôler et réguler, en composant avec des vannes d'apport d'eau neuve qui vieillissent et deviennent moins précises avec le temps, mais aussi parfois des coupures d'eau temporaires.

La concentration en N est directement liée au taux d'ouverture : elle a légèrement augmenté dans le compartiment végétal (Figure 11,D), car une arrivée d'eau plus importante lié à l'augmentation de l'ouverture du système a dilué le compartiment piscicole dont la surverse et donc les nutriments se sont retrouvés dans la partie végétale, d'où le croisement des taux de concentration en N inversés fin juin (Figure 11,A).

Cette tendance s'observe aussi pour le K : autour du 18 juin, une forte quantité de bicarbonate de potassium a été ajouté au système en réaction (1) à une baisse excessive du

taux d'ouverture et (2) à une biomasse piscicole en charge élevée. Par la suite le taux d'ouverture a été rétabli en apportant de l'eau neuve avant d'ouvrir le système. Ces différents événements expliquent l'augmentation soudaine du taux de K suivi d'un inversement de la courbe avec une fosse végétale devenant plus concentrée en K.

La courbe du P quant à elle est plus régulière et permet de détecter qu'en moyenne 60% du P est abattu par les plantes dans le contexte de l'étude. La diminution de la concentration tout le long de l'essai ne trouve pas d'explication précise, mais une minéralisation naturelle du P dans le cône de décantation qui est une partie du système où un écosystème non contrôlé se développe est une hypothèse plausible, menant à un relargage réduit de P dans le compartiment piscicole.

Ces courbes d'abattement ne permettent pas d'établir de façon claire ce que les plants ont pu capter. Il est très compliqué en effet d'obtenir des évolutions lisses, à moins d'avoir une biomasse en stock stable, et un taux d'ouverture constant dans le temps.

IV.2.b.2) Phytoépuration des éléments par les tomates

Un dosage des éléments dans les tissus permet de mieux évaluer le taux de captage total des éléments par les plantes. Le Tableau 7 présente les résultats pour les fruits, et les mêmes analyses ont été commandées pour les tiges et les feuilles. D'après ces données et à partir de la biomasse totale des plants, des calculs basés sur des modèles de production truites, ont permis de déterminer que l'équivalent de 4,4, 11 et 175 g/m²/jour d'aliment étaient nécessaires pour apporter ce que les tomates ont capté en N, P et K respectivement, sur l'ensemble de l'essai. Sachant qu'en moyenne, le taux d'aliment apporté était de 30 g/m²/jour (Figure 9) il faudrait donc pour une même densité de 5 plants de tomates/m², 7 fois plus de surface végétale pour épurer tout le N, 3 fois plus de surface pour épurer tout le P tandis que le tiers de la surface utilisée suffirait à épurer le K. C'est-à-dire qu'avec notre apport moyen de 2,5 kg/jour d'aliment, 574 m² de tomates épurerait tout le N, 246 m² tout le P tandis que seulement 27 m² consommeraient tout le K. Ce dernier est donc le premier élément limitant, suivi du P puis du N.

Peu importe le modèle végétal, le K est toujours limitant et complétement en apportant du bicarbonate de potassium, on ne peut donc pas réfléchir au dimensionnement d'un système en se basant sur cet élément. Sur le pilote expérimental, on a montré par le passé être capable de phytoépurer 80% de P et 50-60% du N dans le contexte d'un dimensionnement optimal. On pourrait décider de phytoépurer 100% du N (et donc 100% de P) mais sous réserve de compléter avec du P qui devient alors limitant. Dès lors, est-il logique de compléter le système aquaponique avec cet élément qui provient de ressources minières limitées (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2016) ?

Une réponse possible à cette question est la minéralisation des boues piscicoles qui contiennent la majorité du P produit par le système. Ce P organique n'est pas assimilable directement par les plantes mais il est possible de le minéraliser pour le récupérer sous forme

ionique. La bio acidification utilise du sucre comme co-substrat pour stimuler la croissance des populations bactériennes et permet de minéraliser jusqu'à 75% du P total dans des boues issues d'eaux usées (Braak et al., 2016). En parallèle de l'essai tomate, des premiers essais ont été menés à petite échelle, et ont démontré que par bio acidification, 3,5 fois plus de P que celui disponible dans des boues non acidifiées était récupérable grâce à cette technique (350 contre 100 mg/L). La récupération du surnageant de ces boues constitue une piste très encourageante et complète davantage la notion d'économie circulaire portée par l'aquaponie.

IV.3) Comparaison des paramètres phytotechniques des tomates

IV.3.a) Développement physiologique équivalent

Les plants se sont comportés de manière très homogène tout le long de l'expérimentation. Lors de la croissance des plants, toutes les modalités ont eu une croissance régulière (Figure 12). L'apparition des bouquets et la floraison étaient synchronisées entre les modalités. Les plants hydroponiques paraissaient à l'œil d'un vert plus foncé, sûrement à cause de la quantité importante d'azote fournie par la solution. Le choix s'étant porté sur un hybride F1, l'homogénéité globale observée n'est pas surprenante, et les modes de cultures n'ont pas eu énormément d'impact sur la physiologie végétative.

IV.3.b) Rendement

La variable relevée est le poids moyen des fruits récoltés. Chaque bouquet a été raccourci à 8 fleurs pour obtenir des grappes identiques et comparables, et ne pas épuiser la plante qui a un fort potentiel de floraison. À titre d'exemple, les bouquets de la ligne A servant à faire de l'ombre n'ont pas été taillés et ont obtenus une vingtaine ou plus de fruits de façon systématique. Les fruits à l'extrémité des grappes ont contracté des nécroses apicales. Il s'agissait de *Blossom End Rot* (BER), signe d'une déficience en calcium, élément énormément consommé lors de la maturation des fruits (Ivy, 2015). Ces symptômes sont causés par une demande très forte en calcium par la plante, et n'ont jamais observés sur les autres lignes de l'expérimentation, signe que la charge à 8 fruits était adaptée. Cependant, certaines grappes ont obtenu plus ou moins 8 fruits (bouquet mal raccourci, ou fruits tombés à cause des manipulations des plants). Ainsi, pour ne pas induire de biais dans l'analyse des résultats qui pourrait mener à des conclusions sur le rendement nullement lié au mode de culture, le poids moyen des fruits a été ramené en rendement pour chaque récolte.

IV.3.b.1) Disposition de l'essai non optimal

Une dispersion et randomisation maximale de modalités est primordiale pour éviter les erreurs systématiques. Ici, la représentation spatiale du poids moyen des fruits (Figure 13) indique un gradient, avec des rendements plus importants du côté où le système piscicole se trouve. Mais la disposition et les modèles statistiques ne peuvent pas discriminer un effet position ou traitement foliaire, car ces deux variables sont liées. En comparant des modèles statistiques, l'effet Emplacement a toujours une significativité supérieure à celle des effets des autres facteurs, signifiant qu'il a un impact tellement fort sur les résultats que toute analyse

isolée des autres facteurs peut être biaisée. Ce résultat s'explique par plusieurs raisons. Un effet bordure est grandement possible, car une ligne de tomate supplémentaire est présente côté B mais absente côté F, car l'installation piscicole qui se situe de ce côté induisait une ombre portée. Le plan d'expérimentation (Figure 8), montre une orientation de la serre Est/Ouest, et donc un passage du soleil perpendiculaire aux modalités. Une disposition en parallèle de sa trajectoire aurait limité cet effet. Enfin, des contraintes pratiques ont empêché une randomisation totale des modalités : le circuit hydraulique séparé pour hydroponie et aquaponie imposait une modalité par ligne, et un traitement foliaire en bloc car l'aspersion au sein des lignes pouvait rapidement atteindre les plants voisins.

En résumé, des plants en bordure de toute la parcelle pour supprimer l'effet lumière, des plants servant de séparateurs entre modalités de traitement, et une orientation face au soleil de l'organisation des modalités seront des précautions à prendre pour les prochains essais afin de conclure de façon assurée sur les effets étudiés.

De plus, les récoltes se sont étalées sur 9 semaines, du 11/06 au 06/08/2020, ce qui laisse du temps pour induire une variabilité entre les récoltes. Le poids moyen des fruits a évolué au sein des modalités de façon similaire entre elles, atteignant un pic aux récoltes 3 et 4. Ceci peut s'expliquer par le fait que les plantes étaient en pleine période de fructification à ce moment-là, et qu'à la fin de l'essai, les plants ont subi diverses attaques de ravageurs dont des acariens induisant une perte foliaire importante. Les fluctuations de rendements sont un problème commun en production hors sol sous serre, pas à cause de la charge en fruits ou de la disponibilité des assimilats, mais plutôt à cause de pics de chaleur (Ho, 2004). La sensibilité des fruits est plus élevée au stade *Mature Green*, provoquant un murissement prématuré et donc un rendement plus faible les semaines suivantes (Adams, 2002).

Pour limiter les biais, l'effet Emplacement doit être considéré à chaque fois que l'effet d'un facteur sur le rendement veut être mis en évidence à l'aide de modèles de régressions linéaires.

IV.3.b.2) Impact des modes de culture

La comparaison des rendements indique que l'irrigation aquaponique induit un rendement toujours supérieur toute modalité confondues par rapport à l'irrigation hydroponique (Figure 16). Les modalités aquaponie ayant bénéficié d'un apport de potassium foliaire à 0,5 % obtiennent un meilleur rendement. Afzal a montré qu'un apport foliaire hebdomadaire de potassium à 0,5-0,7% augmenterait 1,35 fois le rendement de tomates en pleine terre (Afzal et al., 2015). S'agit-il ici de l'unique facteur responsable de ce haut rendement, ou la position dans la serre a-t-elle eu davantage d'impact? La Figure 15 met en effet en évidence un rendement étrangement croissant suivant l'ordre des colonnes. Quand la colonne F n'est pas prise en compte dans les analyses, le rendement ressort quand même significativement supérieur. Si tant est que le traitement foliaire augmente le rendement de 8% au sein de notre essai et dans nos conditions expérimentales, il faut alors se demander si à l'échelle d'une production, un apport minéral foliaire serait rentable en termes de coût et de temps.

Tableau 8 : Table Ciqual de composition nutritionnelle de la tomate (Anses) en comparasion avec nos tomates

	Références		Nos tomates	
	Tomates cerises	Tomate grappe	Hydroponie	Aquaponie
Sucres (g/100 g)	4,8	2,6	5,74	5,11
Fructose (g/100 g)	2,5	1,4	3,12	2,81
Glucose (g/100 g)	2,3	1,2	2,6	2,27
Saccharose (g/100 g)	< 0,2	< 0,2	0,02	0,02
Calcium (mg/100 g)	6,6	6,6	6,4	6,7
Fer (mg/100 g)	0,37	0,18	0,37	0,26
Magnésium (mg/100 g)	11	6,5	7,3	7,5
Manganèse (mg/100 g)	0,16	0,12	0,1	0,04
Phosphore (mg/100 g)	31	20	29	22
Potassium (mg/100 g)	330	200	220	220
Sodium (mg/100 g)	< 5	< 5	< 0,005	< 0,005
Zinc (mg/100 g)	0,18	0,08	0,28	0,3
Beta-Carotène (µg/100 g)	1360	966	550	490
Vitamine E (mg/100 g)	0,4	0,45	0,84	0,71
Vitamine C (mg/100 g)	21,8	18,2	28	28,9

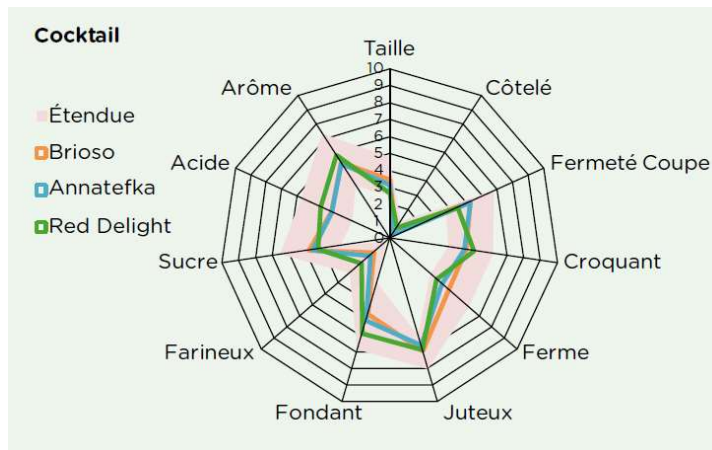


Figure 22 : Profil sensoriel moyen de la tomates cocktail (tiré de (Cottet et al., 2018))

Le débit d'irrigation en tout cas n'a induit aucun effet sur le rendement (Figure 18). Donc ici, un débit de 4 L/heure semble être suffisant pour obtenir des rendements équivalents à des plants ayant reçu un volume d'eau 1,5 fois plus important.

IV.3.c) Qualité nutritive

Le dosage chimique réalisé en laboratoire permet de qualifier la qualité nutritionnelle des tomates. Globalement, malgré quelques légères différences sur des aspects plutôt mineurs, les deux modalités Hydroponie et Aquaponie sont équivalentes. Les tomates aquaponie sont légèrement moins sucrés et un peu plus acide. En comparant avec les tables de composition Ciqual de référence de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses), le taux de sucre de nos tomates reste quand même plus élevé que celui de tomates grappes ou des cerises (Tableau 8).

IV.3.d) Qualité sensorielle

L'analyse sensorielle réalisée en complément permet de vérifier si la perception du consommateur corrèle avec les dosages biochimiques (Figure 21). Ici, on ne retrouve pas de différence significative entre l'acidité ou le taux de sucre mise en évidence dans le dosage biochimique. La seule différence significative est la taille du fruit, perçue plus petite pour la modalité hydroponie, tendance également observée lors des récoltes avec un calibre qui était plus petit ($34,6 \pm 4,2$ contre $36,1 \pm 3,5$ mm). L'analyse sensorielle est une mesure d'interaction et la perception ressentie n'est pas toujours corrélée aux taux retrouvés dans les dosages, car un équilibre se crée en bouche entre les saveurs ne mettant pas en avant un paramètre particulier (Valentine Cottet, CTIFL, communication personnelle). Ici, le panel est unanime sur une qualité sensorielle identique entre les deux modes de culture. Le profil obtenu peut être comparé à un profil type (Figure 22), regroupant tous les profils obtenus pour un grand nombre de lots de tomates cocktail hors sol par le CTIFL. En termes d'arômes et de tailles, nos tomates semblent se placer dans la fourchette basse de la référence, mais le reste des descripteurs correspondent au profil type d'une tomate cocktail.

Une étude récente du CTIFL met en évidence que les spécificités qualitatives et organoleptiques existantes étaient liées davantage à la typologie de tomate plutôt qu'au mode de culture (Cottet and Jost, 2020). A noter que parmi toutes les variétés de tomates, les cocktails sont très homogènes et sont derrière les tomates cerises, les plus sucrées et aromatisées de toutes les variétés de tomates (Cottet et al., 2018). Ainsi, d'après cette information et les résultats dans notre essai, le choix d'une variété d'intérêt ne sera pas impactée négativement sur sa nutrition et sa qualité gustative par une irrigation aquaponique par rapport à une culture classique hors sol.

V. Conclusion

Les travaux de ce stage ont permis d'arriver à des conclusions très intéressantes et encourageantes sur la culture de tomate en aquaponie. Les tomates cocktails cultivées en aquaponie obtiennent un rendement de 10% de plus par rapport à une conduite de culture conventionnelle en hydroponie, augmentation légèrement plus marquée avec un apport foliaire minéral en potassium. Entre les deux modalités d'irrigation, la qualité nutritionnelle des fruits est équivalente, et leur profil sensoriel identique. Cependant, le protocole expérimental est critiquable, avec un effet de la position dans la serre qui ne permet pas de mettre en évidence avec certitude l'impact réel de l'apport du potassium foliaire sur le rendement. Au vu de l'augmentation du rendement assez minime, l'apport de K permettant d'obtenir 8% de rendement en plus, cette différence peut ne pas être pertinente économiquement au sein d'un objectif de production. Son apport peut prendre une part plus intéressante dans un système plus ouvert où l'apport de K par le bicarbonate de potassium sera moindre.

A l'avenir, la dispersion des modalités sur le plan de parcelle devra être étudiée avec précaution afin de pouvoir conclure avec plus de certitude.

En réponse aux problématiques du stage, il peut être avancé que (1) la culture de la plante fruit tomate est possible en utilisant les rejets d'un système piscicole, avec comme seuls apports l'aliment piscicole et un complément en microéléments, (2) l'obtention de rendements supérieurs a été possible sans l'utilisation des engrais minéraux azotés et phosphatés, et (3) les qualités nutritionnelle et gustative des fruits ne sont pas impactées, excepté quelques différences mineures sur la quantité de sucre plus faible en aquaponie mais qui reste supérieure aux valeurs de référence Ciquil (Anses).

Cette productivité supérieure obtenue avec une irrigation contenant des taux de nutriments plus faible qu'en culture conventionnelle peut être déroutante. Une piste d'étude est celle des communautés bactériennes. Les bactéries capables de stimuler la croissance végétale sont appelées PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria). Par une approche de métagénomique, la littérature montre que bien que les populations bactériennes soient différentes et spécifiques aux systèmes desquelles elles proviennent, des PGPR y sont retrouvées (Eck et al., 2019). L'étude de cet écosystème racinaire est une piste que l'ITAVI envisage de creuser dans ses projets futurs à travers cette même approche afin de mieux en caractériser les interactions et mieux comprendre le développement des plantes aquaponiques.

Même si ici durant ce stage, l'objectif n'a pas été d'épurer au maximum les nutriments par phytoépuration, une optimisation du dimensionnement est possible pour y arriver : en se basant sur les calculs de bilan de masse, une surface 3 fois plus grande sans apports supplémentaires d'engrais minéraux est envisageable pour épurer totalement le P dans le contexte de l'étude. Alors, du point de vue du pisciculteur, si l'épuration totale des nutriments de l'eau est l'objectif principal de la mise en place d'un système aquaponique, il est tout à fait possible d'y arriver en déterminant les surfaces végétales nécessaires. Du point de vue du

marâcher, pour obtenir des plants de bonne qualité il est nécessaire d'optimiser le système piscicole, via le choix d'espèces de poissons efficaces dans la conversion des nutriments et via une bonne gestion du taux d'ouverture du système afin d'obtenir des taux de nutriments suffisants sans apport d'engrais, et de réaliser des associations de plantes en fonction de leur ratio d'absorption NPK.

Les conclusions tirées ici sont indicatives et propres au système pilote du RATHO. Notons cependant que son mode de conception a été choisi pour être un modèle transférable à une situation de production commerciale à grande échelle, ce qui fait que les données acquises durant cet essai peuvent constituer une base de référence pour des producteurs souhaitant se lancer dans la production de tomates en aquaponie.

Bibliographie

- Adams, S.R. (2002). Predisting the weekly fluctuations in glasshouse tomato yields. *Acta Hortic.* 19–23.
- Afzal, I., Hussain, B., Basra, S.M.A., Ullah, S.H., Shakeel, Q., and Kamran, M. (2015). Foliar application of potassium improves fruit quality and yield of tomato plants. *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus* 12.
- Ayipio, E., Wells, D.E., McQuilling, A., and Wilson, A.E. (2019). Comparisons between Aquaponic and Conventional Hydroponic Crop Yields: A Meta-Analysis. *Sustainability* 11, 6511.
- Boxman, S.E., Zhang, Q., Bailey, D., and Trotz, M.A. (2017). Life Cycle Assessment of a Commercial-Scale Freshwater Aquaponic System. *Environ. Eng. Sci.* 34, 299–311.
- Braak, E., Auby, S., Piveteau, S., Guilayn, F., and Daumer, M.-L. (2016). Phosphorus recycling potential assessment by a biological test applied to wastewater sludge. *Environ. Technol.* 37, 1398–1407.
- Cottet, V., and Jost, M. (2020). Production de tomates en sol et hors sol : de l'influence du mode de culture sur la qualité gustative ? *Infos CTIFL*.
- Cottet, V., Navez, B., and Jost, M. (2018). La segmentation de la tomate. Synthèse de dix années de caractérisation sensorielle et physico-chimique. 8.
- Delorme, L. (2019). Acquisition de données de performances des systèmes aquaponiques : potentiel phytoépuration et qualité des produits. 81.
- Despommier, D. (2013). Farming up the city: the rise of urban vertical farms. *Trends Biotechnol.* 31, 388–389.
- Eck, M., Sare, A., Massart, S., Schmutz, Z., Junge, R., Smits, T., and Jijakli, M. (2019). Exploring Bacterial Communities in Aquaponic Systems. *Water* 11, 260.
- FAO (2018a). The future of food and agriculture – Alternative pathways to 2050 (Food and Agriculture Organization of the United Nations).
- FAO (2018b). La situation mondiale des pêches et de l'aquaculture : atteindre les objectifs de développement durable. (Place of publication not identified: FOOD & AGRICULTURE ORG).
- Foucard, P., and Tocqueville, A. (2019). Aquaponie: Associer aquaculture et production végétale (Quae).
- FranceAgrimer (2012). Prospective Filière française fruits et légumes.
- FranceAgrimer (2018). Les chiffres-clés de la filière Fruits & Légumes frais et transformés.
- FranceAgrimer (2020a). Fiche Filière Pêche et Aquaculture.
- FranceAgrimer (2020b). FICHE FILIERE LEGUMES.pdf.
- Goddek, S. (2019). *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future* (Cham: Springer International Publishing).

- Goddek, S., Delaide, B., Mankasingh, U., Ragnarsdottir, K., Jijakli, H., and Thorarinsdottir, R. (2015). Challenges of Sustainable and Commercial Aquaponics. *Sustainability* 7, 4199–4224.
- Ho, L.C. (2004). The contribution of plant physiology in glasshouse tomato soilless culture. *Acta Hortic.* 19–25.
- Hussain, A., Iqbal, K., Aziem, S., Mahato, P., and Negi, A.K. (2014). A Review On The Science Of Growing Crops Without Soil (Soilless Culture) – A Novel Alternative For Growing Crops. 11.
- INTERFEL, and ANIFELT (2017). Plan de filière Fruits et Légumes.
- Ivy, T. (2015). Problem: Blossom-end Rot. *Kans. State Univ.* 2.
- Lennard, W. (2012). Aquaponic System Design Parameters: 11.
- Lennard, W.A. (2015). A Nutrient Dynamic Process and the Relationship to Fish Feeds. *World Aquac.* 4.
- Ministère de l’Agriculture, de l’Agroalimentaire et de la Forêt (2016). Vers une gestion durable du phosphore, ressource critique pour l’agriculture.
- Morard, P., Silvestre, J., and Caumes, E. (2004). Influence de la concentration de la solution nutritive sur la croissance et la nutrition minérale de la tomate. *Can. J. Plant Sci.* 84, 299–304.
- PHILMINAQ Water Quality Criteria and Standards for Freshwater and Marine Aquaculture (Mitigating Impact from Aquaculture in Philippines).
- Prystay, W., and Lo, K.V. (2001). Treatment of greenhouse wastewater using constructed wetlands. *J. Environ. Sci. Health Part B* 36, 341–353.
- Rakocy, J., Shultz, R.C., Bailey, D.S., and Thoman, E.S. (2004). AQUAPONIC PRODUCTION OF TILAPIA AND BASIL: COMPARING A BATCH AND STAGGERED CROPPING SYSTEM. *Acta Hortic.* 63–69.
- Rakocy, J.E., Masser, M.P., and Losordo, T.M. (2006). Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: Aquaponics—Integrating Fish and Plant Culture. 17.
- Resh, H. (2012). *Hydroponic Food Production, A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower* 7th Edition.
- Roosta, H.R., and Hamidpour, M. (2011). Effects of foliar application of some macro- and micro-nutrients on tomato plants in aquaponic and hydroponic systems. *Sci. Hortic.* 129, 396–402.
- Ru, D., Liu, J., Hu, Z., Zou, Y., Jiang, L., Cheng, X., and Lv, Z. (2017). Improvement of aquaponic performance through micro- and macro-nutrient addition. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24, 16328–16335.
- Schneider, O., Sereti, V., Eding, E.H., and Verreth, J.A.J. (2005). Analysis of nutrient flows in integrated intensive aquaculture systems. *Aquac. Eng.* 32, 379–401.
- Siegenthaler, M. (2017). L’azote dans l’agriculture et l’environnement. 4.
- Smith, V.H., and Schindler, D.W. (2009). Eutrophication science: where do we go from here? *Trends Ecol. Evol.* 24, 201–207.

- Suhl, J., Dannehl, D., Kloas, W., Baganz, D., Jobs, S., Scheibe, G., and Schmidt, U. (2016). Advanced aquaponics: Evaluation of intensive tomato production in aquaponics vs. conventional hydroponics. *Agric. Water Manag.* 178, 335–344.
- Taiz, L., and Zeiger, E. (2002). *Plant physiology* (Sunderland, Mass: Sinauer Associates).
- Tamin, M., Harun, A., and Estim, A. (2015). Consumer Acceptance towards Aquaponic Products. ResearchGate.
- Trejo-Téllez, L.I., and Gómez-Merino, F.C. (2012). Nutrient Solutions for Hydroponic Systems. In *Hydroponics – A Standard Methodology for Plant Biological Researches*, p.
- Turcios, A., and Papenbrock, J. (2014). Sustainable Treatment of Aquaculture Effluents—What Can We Learn from the Past for the Future? *Sustainability* 6, 836–856.
- Turnšek, M., Morgenstern, R., Schröter, I., Mergenthaler, M., Hüttel, S., and Leyer, M. (2019). Commercial Aquaponics: A Long Road Ahead. In *Aquaponics Food Production Systems: Combined Aquaculture and Hydroponic Production Technologies for the Future*, S. Goddek, A. Joyce, B. Kotzen, and G.M. Burnell, eds. (Cham: Springer International Publishing), pp. 453–485.
- Yep, B., and Zheng, Y. (2019). Aquaponic trends and challenges – A review. *J. Clean. Prod.* 228, 1586–1599.

VI. Annexes

	Truites	Ides mélanotes
Référence (Le Gouessant aquaculture)	B-Nature Grower	Tilapia starter 1
Durée de la distribution	09/04/2020-13/05/2020	13/05/2020 – 06/08/2020
Protéines Brutes (%)	45	38
Matière grasse brute (%)	17	8
Cellulose brute (%)	1.5	3.5
Cendres brutes (%)	13.2	6.7
Calcium (%)	NA	1.1
Phosphore total (%)	1.7	0.99
Sodium (%)	NA	0.22



Annexe 1 : Détail de la composition des aliments piscicoles distribués

Produit	Composé	Proportion
NPK 5-10-29+29,9Mg+TE (Universol)		
Azote	N total	5
Anhydride phosphorique	P2O5	10
	P	4,4
Oxyde de potassium	K2O	36
	K	29,9
Oxyde de magnésium	MgO	5
Bore	Bo	0,02
Cu	Cu	0,02
Fer	Fe	0,12
Manganese	Mn	0,08
Sulfate de magnésium (Bittersalzt)		
Oxyde de magnésium	MgO	16
magnésium	Mg	9,6
Anhydre sulfurique	SO3	32
souffre	S	12,8
Phosphate d'ammonium		
Azote total	N	12,0
Anhydride phosphorique	P2O5	61
	P	26,6
Nitrate de Calcium (YaraLiva)		
Azote total	N	15,5
nitrate	NO3	14,4
ammoniaque	NH3	1,1
Oxyde de calcium	CaO	26,5
Calcium	Ca	19
Microéléments (Micromax)		
Bore	Bo	0,7
Cuivre	Cu	0,5
Fer	Fe	7,8
Manganese	Mn	2,6
Molybdène	Mo	0,32
Zinc	Zn	1,3

Quantités totales pour 10L de chaque solution stock base d'injection à 0,01%			
		Poids (g)	Volume (mL)
Stock A	NPK 5-10-29	1000	
	Sulfate de Magnésium	300	
	Phosphate d'Ammonium	24	
	Acide Nitrique 53%		80
Stock B	Nitrate de Calcium	1100	
	Microéléments	40	

	Concentration finale calculée des éléments dans la solution hydroponique (mg/L)	Objectifs vus dans la littérature (mg/L)
N	275,8	200
P	50,0	50
K	298,8	250
Ca*	208,4	200
Mg*	58,8	50
S	100,1	100
Fe	4,32	4
Mn	1,84	0,8
Cu	0,4	0,07
Zn	0,52	0,1
B	0,48	0,3
Mo	0,148	0,03

Annexe 2 : Détail de la composition et proportion des engrais de la solution hydroponique irrigant les tomates cocktail. A : Composition minérale respective des engrais utilisés pour la solution. B : Quantité et volumes nécessaire de chaque produit des solutions stocks. C : Concentration finale dans la solution fille hydroponique

 agriculture • alimentation • environnement   université angers  UNIVERSITÉ DE NANTES	Diplôme: Master Mention : Biologie Végétale (BV) Parcours : Filière de l'Horticulture et Innovations (FHI)
Auteur(s) : Mathilde MARSAULT Date de naissance : 06/07/1997	Organisme d'accueil : ASTREDHOR-RATHO Adresse : 135 chemin du Finday 69126 Brindas
Nb pages : 31 Annexe(s) : 2	Maître de stage : Pierre FOUCARD
Année de soutenance : 2020	
Titre français : Optimisation des conditions culturelles, et évaluation de la qualité nutritionnelle et sensorielle de tomates en aquaponie Titre anglais : Growing conditions optimization and analysis of nutritional and sensorial quality of tomato grown with aquaponics	
Résumé : A l'heure du développement de systèmes de production se voulant toujours plus résilients et soucieux des contraintes environnementales, l'aquaponie, en alliant production maraichère et aquacole, apparait comme une solution innovante. Elle permet à la fois d'épurer les effluents piscicoles chargés en nutriments, et de cultiver des plants sans apports d'engrais minéraux. La faisabilité technique de la culture de tomates cocktail en aquaponie est étudiée ici, en comparaison avec un système de production conventionnel hydroponique. Les rendements obtenus sont supérieurs de l'ordre de 10% en aquaponie, et davantage encore avec un apport foliaire minéral de potassium. Les qualités nutritionnelles et organoleptiques des fruits sont équivalentes. Des approches bilan de masse par l'étude de la dynamique des nutriments au sein des différents compartiments, permettent d'envisager un dimensionnement optimal de la surface végétale cultivée ainsi que des paramètres zootechniques, dans le cadre de cet essai.	
Abstract : Nowadays, more and more production systems are being developed, and have to be resilient and non-environment destructive. Aquaponics, a mix of fish and horticultural production seems to be an innovative solution. It allows to clean fish waste water effluents full of nutrients, and to grow crops without mineral fertilizer. Here, the feasibility of growing cocktail tomatoes with aquaponics was studied, compared to conventional hydroponics. Aquaponics yields are 10% higher, and this difference is higher when a potassium foliar application was done. Nutritional and organoleptic qualities are equivalent. Mass balance studies with nutrient dynamics indicate that the crops growing surface and fishes management could be improved linked to the nutrient concentration.	
Mots-clés : Aquaponie, hydroponie, <i>S. lycopersicum</i> , tomate, système recirculé, qualité, sensoriel Key Words: Aquaponics, hydroponics, <i>S. lycopersicum</i> , tomato, RAS, DRAPS, quality, organoleptic	