

2022-2024



OPTIMAH

Optimisation de l'Aquaponie pour l'Horticulture

En partenariat



Financé par :



MISE EN ŒUVRE ET DEVELOPPEMENT DE COOPERATIONS

Sous-mesure 16.02 Projets pilotes, nouveaux produits, pratiques, procédés et techniques dans les secteurs agricoles, alimentaires et sylvicoles/ soutien aux groupes opérationnels dans le cadre du Partenariat Européen pour l'Innovation (PEI)

TABLE DES MATIERES

■ 1. Introduction	5
1.1 - Objectifs et intérêts	5
1.2 - Acquis et bibliographie	5
■ 2. Système aquaponique.....	7
2.1 - Mise en place du système.....	7
2.2 - Suivi du fonctionnement et des performances	8
2.3 - Ajustement du système	10
■ 3. Elevage piscicole	11
3.1 – Suivi général du système aquaponique	11
3.2 Cycles d'élevages durant l'étude	14
3.2.1 – Cycle 1 : du 23/04/23 au 04/07/23 - 102 jours	14
3.2.2 – Cycle 2 : du 07/09/23 au 19/02/24 - 267 jours.....	16
3.2.3 – Cycle 3 : du 27/03/24 au 22/01/25 - 301 jours	17
3.3 – Modèle de croissance forte densité faible nourrissage carpe koï	19
3.4 – Vers un dimensionnement des systèmes aquaponiques ornementaux ?	19
3.4.1 – Approche Bilan de Masse – Dimensionnement aquaponique comestible.....	19
3.4.2 – Lien pour un dimensionnement ornemental.....	20
■ 4. Matériels et méthodes : expérimentations végétales	21
4.1 - Implantation de l'essai.....	21
4.2 - Organisation des essais.....	21
4.3 – Installation d'un système « Raft ».....	22
4.4 - Modalités testées.....	22
4.4.1 – Fertilisation	22
4.4.2 – Substrat	23
4.4.3 – Poteries sans plastique.....	23
4.5 - Critères étudiés pour la production végétale	23
4.5.1 – Qualité commerciale	24
4.5.2 – Développement racinaire.....	24
4.5.3 – Indice de chlorophylle	24
4.5.4 – Croissance aérienne	25
4.5.5 – Rendement floral	25
4.5.6 – Profil métabolique.....	25
4.6 - Analyse statistique des données.....	25
■ 5. Expérimentations sur la production végétale	26
5.1 – Essai « Screening végétal »	26
5.2 – Essai « Chrysanthème »	31
5.3 – Essai « Plantes à fleurs comestibles »	33

5.4 – Essai « Plantes d'intérêt industriel »	36
5.5 – Essai « Alternatives aux pots plastiques »	40
5.6 – Essai « Jeunes plants de pépinière »	42
■ 6. Etude technico-économique du pilote.....	46
6.1 – Conception d'un outil pour l'évaluation des coûts de production et estimer la rentabilité du système	46
6.2 – Description de l'outil de calcul des coûts.....	46
6.3 – Coûts de production et bilan annuel du système aquaponique : résultats	46
■ 7. Transfert et valorisation.....	50
7.1 – Valorisation du pilote d'aquaponie en tant que structure pédagogique	50
7.2 – Valorisation auprès des acteurs du territoires.....	51
■ 8. Conclusion et perspectives	53
■ Annexes.....	54

THEMATIQUE : PRODUCTION INNOVANTE

FILIERE : PLANTE EN POT ; PISCICULTURE

OBJECTIFS : MISE EN PLACE ET EVALUATION D'UN OUTIL DE PRODUCTION INNOVANT

INTERETS : DIMINUTION DE L'UTILISATION DES RESSOURCES EN EAU ET EN INTRANTS – USAGE PEDAGOGIQUE – ETUDE TECHNICO-ECONOMIQUE

ACTION : DIVERSIFICATION

MOTS CLE : RECYCLAGE EAU – REDUCTION INTRANTS – INNOVATION – NOUVELLES PRATIQUES – STRUCTURATION D'UNE FILIERE – PEDAGOGIE

PARTENAIRES : ITAVI – CFA NATURAPOLE

REFERENT ESSAI : Maxime VAUTIER

ANNEE : 2022-2024

RESUME : Les filières piscicoles et horticoles sont aujourd’hui confrontées à de nombreux défis, parmi lesquels figurent des contraintes environnementales majeures, comme la raréfaction des ressources en eau, ainsi que des enjeux économiques croissants. L'aquaponie représente une réponse innovante à ces problématiques en proposant un modèle de production vertueux, combinant élevage de poissons et culture de végétaux dans un circuit fermé et efficient. Bien que ce système suscite un intérêt croissant, il reste encore peu développé en Europe, notamment en comparaison des pays asiatiques et nord-américains. De nombreuses interrogations subsistent, non seulement sur les aspects techniques de sa mise en œuvre, mais surtout sur la viabilité économique des fermes aquaponiques.

Le présent programme de recherche vise à apporter des réponses concrètes à ces questionnements, à travers l'étude d'un module aquaponique installé dans une serre de production au sein d'un lycée horticole. Ce dispositif constitue à la fois un support expérimental pour la conduite des travaux et un outil pédagogique à destination des élèves, contribuant ainsi à élargir leurs compétences et leur vision des systèmes de production végétale de demain.

Les premiers résultats obtenus mettent en évidence la faisabilité technique d'une production horticole en aquaponie. En effet, la fertilisation organique issue des rejets piscicoles permet d'obtenir des plantes de qualité comparable à celles produites avec une fertilisation minérale industrielle, encore largement dominante dans le secteur horticole. Toutefois, dans une logique de durabilité, le système aquaponique doit également répondre à d'autres enjeux, notamment la réduction de l'usage de ressources non renouvelables comme le plastique ou la tourbe, dont l'impact environnemental reste préoccupant.

Le développement à plus grande échelle des fermes aquaponiques est conditionné par des contraintes de dimensionnement, tant sur le plan technique qu'économique. C'est pourquoi ces travaux s'attachent également à analyser les coûts de production spécifiques à l'aquaponie, en les comparant à ceux d'un système horticole plus conventionnel. Un outil technico-économique a été développé afin d'aider au dimensionnement et d'accompagner les porteurs de projets dans la mise en place de systèmes aquaponiques viables et performants.

■ 1. Introduction

1.1 - Objectifs et intérêts

La filière aquaponique, qui associe production aquacole et culture végétale, est actuellement en pleine émergence en France. Pour qu'elle puisse s'implanter durablement dans le paysage agricole national, il est nécessaire de la soutenir sur les plans technique et économique. Chaque institut technique impliqué dans ce projet apporte son expertise spécifique, que ce soit dans le domaine horticole ou piscicole. Leur collaboration vise à structurer et développer cette nouvelle filière en mutualisant les connaissances issues de ces deux secteurs.

Étant encore peu connue, l'aquaponie nécessite également un travail de sensibilisation et de transfert de connaissances vers les nouvelles générations d'agriculteurs. C'est dans cette optique qu'un partenariat a été établi avec un CFA horticole, au sein duquel est installé un module pilote en aquaponie. Ce dispositif sert à la fois de support d'étude et d'outil pédagogique, permettant aux apprenants de se familiariser avec des pratiques innovantes et durables.

Le projet poursuit trois objectifs principaux :

- Évaluer la faisabilité technique d'une production aquaponique en serre, en prenant en compte les contraintes spécifiques de ce type de système (notamment la gestion thermique pour l'élevage et l'assimilation des nutriments par les plantes).
- Étudier la viabilité économique du modèle, à travers l'analyse des coûts de production liés aux volets animal et végétal.
- Optimiser le fonctionnement du système aquaponique pour tendre vers une autonomie maximale, tant sur le plan humain que sur celui des intrants.

L'aquaponie repose sur une synergie entre les deux types de production et offre des réponses concrètes à des enjeux agricoles actuels : la réduction de la consommation d'eau grâce à un circuit fermé, et la diminution des intrants chimiques via la valorisation des effluents piscicoles pour fertiliser les plantes. Ce mode de production innovant permet ainsi d'allier performance agronomique et respect de l'environnement.

La finalité du projet est de fournir aux acteurs de terrain – aquaponiculteurs, horticulteurs, pisciculteurs – des données technico-économiques fiables et opérationnelles, afin de les accompagner dans le dimensionnement de leurs systèmes, la diversification de leurs activités, ou encore la transition vers une fertilisation organique, en alternative aux pratiques conventionnelles.

1.2 - Acquis et bibliographie

L'aquaponie est un système de culture ancestral, encore largement pratiqué dans diverses régions du monde, notamment en Asie. Bien que résiliente, cette méthode est peu utilisée dans les pays occidentaux, principalement en raison de l'absence d'industrialisation du procédé et du manque de connaissances sur son fonctionnement ainsi que ses critères de rentabilité. Dans des pays comme le Bangladesh et le Vietnam, l'aquaponie est traditionnellement employée pour la riziculture (Edwards, 2015). Cependant, ce système connaît un renouveau depuis une trentaine d'années, en particulier aux États-Unis, au Canada, en Australie, et depuis 2010 en Europe.

L'aquaponie se définit comme un couplage entre l'aquaculture et la culture végétale hors-sol avec recirculation de l'eau. Les rejets issus de l'aquaculture fournissent des nutriments qui sont assimilés par les racines des végétaux, après une dégradation microbienne des composés ammoniacaux par des bactéries nitrifiantes et une filtration mécanique des matières particulières (voir schéma ci-dessous). Ces systèmes sont conçus pour maximiser la recirculation de l'eau tout en garantissant une qualité d'eau optimale pour l'élevage de poissons, la culture de plantes et le développement des bactéries nitrifiantes (Foucard et Tocqueville, 2018).

L'aquaponie s'inscrit dans le cadre de l'aquaculture intégrée multi-trophique (IMTA), visant à recycler et réutiliser tout ou partie de l'eau utilisée, tout en conduisant diverses productions animales et végétales en équilibre parfait. Les rejets des poissons sont valorisés par des cultures hydroponiques (légumes, fruits, fleurs), et l'eau utilisée en aval des cultures est réutilisée, limitant ainsi les prélevements et réduisant l'impact environnemental (réduction des rejets et des intrants chimiques).

Ce modèle répond à des enjeux importants, notamment l'autonomie alimentaire et le renforcement de l'économie locale, des préoccupations croissantes pour de nombreux citoyens. Selon une enquête menée par le Laboratoire Agriculture Urbaine (AULAB) au Québec, l'acceptabilité sociale des fermes aquaponiques est forte, et la moitié des personnes interrogées se disent prêtes à modifier leurs habitudes d'achat pour soutenir de tels projets. Toutefois, le modèle économique reste un point de questionnement, avec un prix de vente des produits encore trop élevé pour une large mise sur le marché (Dupéré-Poundja et al., 2022).

De nombreuses études ont été menées sur l'aquaponie à l'échelle mondiale, et en France, notamment via le projet APIVA, piloté par ASTREDHOR Auvergne Rhône-Alpes et l'ITAVI. La filière aquaponique se structure progressivement, avec la création en 2017 de la Fédération Française d'Aquaponie (FFDA), qui regroupe les acteurs et entreprises du secteur.

Pour les aquaculteurs, l'aquaponie représente une solution pour valoriser les effluents de l'élevage, qui posent souvent des problèmes de traitement réglementaires. Pour les cultivateurs hors-sol, elle offre une fertilisation organique gratuite grâce aux rejets piscicoles, et réduit voire supprime l'usage des intrants chimiques. Ce modèle ouvre également des perspectives de diversification économique dans des territoires où la surface cultivable, l'accès à l'eau ou à de nouveaux sites pour la pisciculture est limité. L'aquaponie permet, selon les types de végétaux cultivés, de réduire l'utilisation des engrains minéraux, puisque les effluents des poissons servent de fertilisants. En outre, le caractère « hors-sol » du système permet de cultiver des plantes dans des zones non arables tout en économisant jusqu'à 95 % de l'eau par rapport à la culture conventionnelle en plein champ.

Cependant, la combinaison de ces deux systèmes de production rend la conception du processus complexe et augmente les risques de problèmes techniques. Ce système nécessite des compétences dans de nombreux domaines : aquaculture en recirculation, horticulture, chimie de l'eau et agroéquipements. Une main-d'œuvre compétente et formée est donc indispensable pour gérer les multiples défis. Plusieurs facteurs influent sur la dynamique du système, rendant difficile la transposition d'un site à un autre sans modélisation préalable et période d'adaptation : la qualité de l'eau, le climat, les espèces animales et végétales, leur stade de développement, la ration alimentaire des poissons, la composition des aliments, ainsi que les aspects thermiques et énergétiques (mouvement de l'eau, filtration, éclairage des plantes, régulation thermique des élevages et cultures).

Le projet que nous proposons vise à fournir un outil permettant de comparer précisément les performances de l'aquaponie par rapport à l'hydroponie dans des conditions contrôlées. Ces données pourront faciliter le transfert de connaissances et la répétabilité des résultats, tout en soutenant les opérateurs de la région Normande dans l'implantation et le développement de systèmes aquaponiques efficaces.

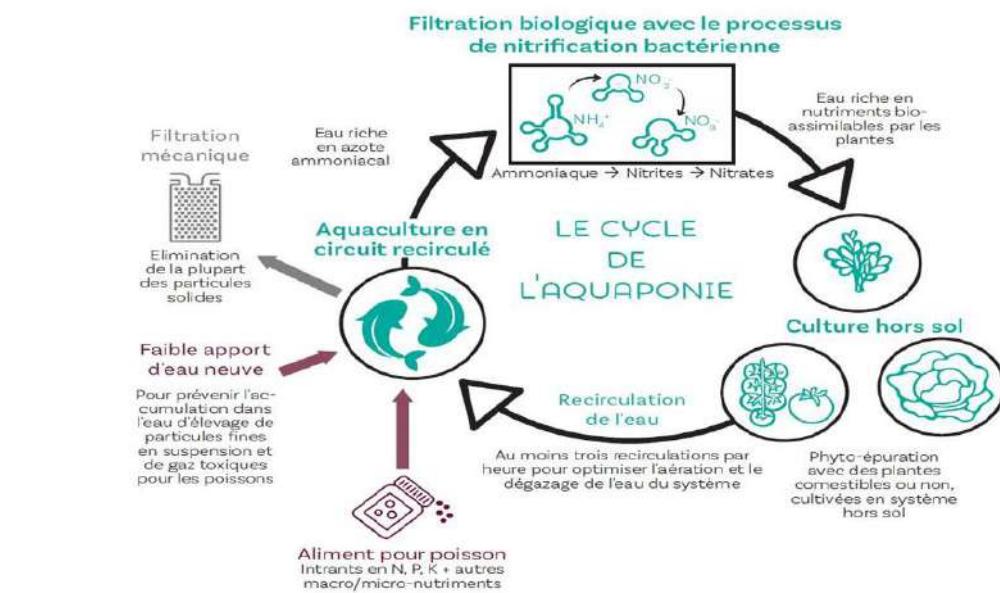
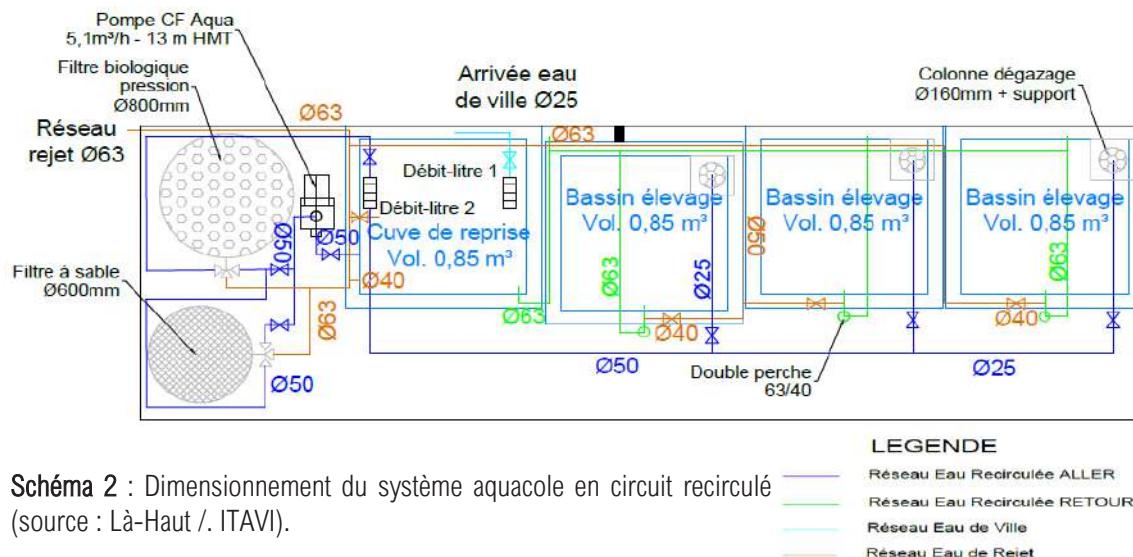


Schéma 1 : Principe d'un système aquaponique (ITAVI, Foucard, Tocqueville et al., 2018).

■ 2. Système aquaponique

2.1 - Mise en place du système

Après une phase de conception et d'adaptation aux contraintes spécifiques du site (telles que la surface disponible, l'approvisionnement et la gestion de l'eau, ainsi que l'adaptation au système d'irrigation préexistant), le système aquaponique a été validé pour être intégré dans la serre 2, en remplacement d'une tablette existante. Ce système aquacole en circuit recirculé a ainsi été installé selon les spécifications suivantes :



Le fonctionnement du système aquaponique a été testé dans une configuration « découpée », c'est-à-dire sans retour de l'eau d'irrigation vers le système aquacole. Ce choix a été fait pour les essais du projet, bien que le système soit conçu pour rester évolutif et puisse être modifié à l'avenir. Ce système après finalisation du dimensionnement présente les caractéristiques suivantes :

Fonctionnement hydraulique :

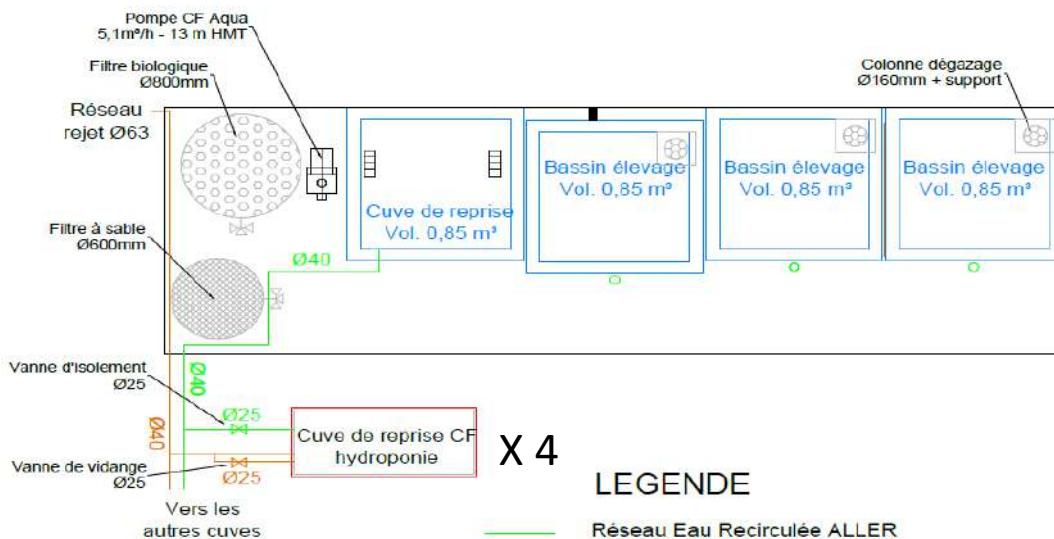


Schéma 3 : Dimensionnement du système aquacole en « découpé » (source : Là-Haut / ITAVI).

- Apport d'eau neuve via l'eau du réseau,
- Volume utile d'élevage de 2 700 litres,
- Fosse de reprise de 800 litres,
- Débit circulant de 5m³/h,
- Renouvellement de l'eau des bassins d'élevage ajustable avec un calage technique pendant les essais d'1.5 à 2 renouvellements par heure,

- Oxygénation des bassins d'élevage via un apport d'oxygène à saturation par bullage,
- Apport d'eau neuve dans le système de 5 à 10% du volume par jour pour un débit de l'ordre de 5 à 10 litres par heures,
- Apport vers les fosses horticoles par débordement de la cuve de reprise.

Fonctionnement du compartiment de filtration :

- Mise en place d'une filtration mécanique via filtre à sable pression de 200 litres présentant 175 kg de médias filtrants ;
- Mise en place d'un biofiltre pression de 800 litres présentant 650 kg de médias filtrants (de type biogrog) pour une capacité d'épuration sur une surface spécifique de l'ordre de 1500 à 2000 m²/m³.

Biomasse animale et alimentation

- Choix d'espèces ornementales (carassins et carpes koïs) pour une biomasse en place au démarrage de l'ordre de 40 kg,
- Mise en place d'un rationnement alimentaire par distributeur automatique avec distribution fractionnée de la ration sur la journée en 3 à 4 repas,
- Distribution alimentaire ajustable selon les périodes mais fixée pendant les essais à un maximum de 0.8 kg d'aliment par jour.



Photo 1 : Module d'aquaponie et vue d'ensemble de la serre. 1/ Compartiment piscicole avec 3 cuves d'élevage de 900 L et une fosse de reprise ; 2/ Compartiment épuratoire avec un filtre à sable (en bas) et un biofiltre (en haut) ; 3/ Compartiment horticole avec le « bloc aquaponie » au second plan, le « bloc classique » au premier plan.

2.2 - Suivi du fonctionnement et des performances

Suivi quotidien du système aquaponique (protocole ITAVI réalisé par le CFA NaturaPôle) :

- Suivi des niveaux d'eau et ajustement en cas de besoin,
- Contrôle du taux d'apport d'eau neuve dans le système,
- Backwash (nettoyage par inversion du flux d'eau) des filtres selon les besoins sur une évolution de pression (via manomètre de contrôle), avec enregistrement des volumes d'eau apportés à chaque backwash,
- Gestion des zones de décantation dans la fosse de reprise,
- Contrôle des niveaux des fosses horticoles,
- Contrôle et apport si nécessaire d'aliments dans les distributeurs automatiques,
- Gestion et enregistrement de la mortalité.

- Contrôle des concentrations en NO_3^- , NH_4^+ , K^+ via le transmetteur d'une sonde multiparamètres à prise et affichage de données en continu

Suivi hebdomadaire (ITAVI, ASTREDHOR) :

- Mesure des paramètres physico-chimique des différents compartiments du système (Bassin, Fosses de reprise et horticoles, RAFT)
- Adaptation de la quantité d'aliment distribuée pour maintien d'un taux de rationnement adapté au poids moyen des poissons et à la température/disponibilité en oxygène
- Contrôle de l'état nutritionnel des cultures (adaptation du taux d'ouverture du système : volume d'eau ajouté/quantité d'aliment distribué)

Suivi des performances zootechniques des différents bassins en élevage (ITAVI) :

- Suivi de la croissance (contrôle de l'évolution du poids et de la taille via des mesures individuelles, des pesées par batch, sur un échantillon de 20% des individus par bassin ou sur l'intégralité du cheptel en fin de cycle de production)
- Purge des bassins et backwash général du système (en passant d'un coût en eau de 4 à 2 m³ au cours du projet)
- Contrôle des effectifs (vérification de la concordance entre effectif théorique, calculé à partir des suivis de mortalités, et de l'effectif réel)
- Contrôle sanitaire (traitement éventuel par balnéation au vert de malachite, sel ou par application topique pour des blessures externes) et qualité des poissons (pour l'estimation des valeurs commerciales)
- Tri, déplacement, allégement des bassins entre chaque cycle de production (pour une limitation de la densité et un maintien de l'homogénéité)
- Ces données ont permis de suivre les performances du système et de valider les hypothèses initiales prises lors du dimensionnement.

Des suivis en continu, via des sondes températures ont été réalisés à la fois dans l'eau du système et dans l'air ambiant de la serre aquaponique.

L'ensemble de ces données ont été partagées en temps réel entre les partenaires du projet via une plateforme de partage en ligne.

Installation de sondes pour surveillance, acquisition et visualisation de données à distance

La surveillance des paramètres d'eau est un point crucial de la viabilité du système et assure la prévention de crises (pannes techniques, dégradation de la qualité d'eau...). Pour cela, le système piscicole est équipé d'une sonde multi paramètres, installée dans la fosse de reprise du « système poisson ».

Ce système, testé pour la première fois par l'ITAVI, permet de suivre les paramètres clés du cycle de l'azote (nitrates NO_3^- , ammonium NH_4^+ ainsi que le potassium K^+) dont la réalisation est indispensable à la production d'un effluent nutritif pour les plantes et au maintien de bonnes conditions d'élevage. Des seuils ont été fixés et le système relié au réseau de la serre pour permettre la surveillance à distance. Ce suivi continu et précis a permis l'identification du taux de renouvellement optimal à l'élevage des poissons et à la croissance végétale (consommation minimisée à 6-8 L/h pour un système fermé à 94-96%) en fonction de la densité d'élevage (admissible et rentable entre 10 et 25 kg/m³ pour notre système), ainsi que de la nécessité de nettoyage des filtres à sable et biologique (permettant d'optimiser l'eau de renouvellement amenée pour les BackWash).



Photo 2 : Sonde ODEON pour le suivi de paramètres physico-chimiques de l'eau des bassins d'élevage.



Photo 3 : Sonde multiparamètres VARION w/DIQ/S 284 E XYLEM installée dans la fosse de reprise aquacole (à gauche) et son transmetteur/afficheur pour la visualisation en direct des paramètres suivis (à droite) (ITAVI).

2.3 - Ajustement du système

Un ajustement des systèmes de distribution alimentaire des poissons a été effectué avant le démarrage des essais afin de permettre une plus grande autonomie et un meilleur rationnement via des distributeurs automatiques adaptés.

Enfin les protocoles de nettoyage des filtres ont été ajustés et optimisés en adaptant les taux de nourrissage et les intervalles des backwash ont été revu.

L'ensemble de ces suivis et ajustements ont permis d'aboutir à un fonctionnement stable du système, adapté à un contexte sous serre, avec une faible mortalité piscicole et une qualité d'eau conforme aux attendus pour la production végétale.

Ces suivis ont permis de définir à la fois des protocoles de suivis de routine nécessaire au pilotage de ce type de système et des procédures de gestion des incidents ; pouvant être transposables dans toute installation aquaponique de ce type.

La santé et le développement des poissons est également un des paramètres suivis. L'ITAVI procède régulièrement à des biométries pour évaluer la croissance de la population et ajuste l'alimentation en fonction des besoins. Un suivi hebdomadaire de la qualité de l'eau est aussi effectué par une analyse des différents éléments présents dans l'eau et notamment l'azote (nitrite, nitrate et ammonium).



Photo 4 : Suivi de l'état sanitaire et de la croissance de l'élevage. Matériel pour l'analyse de l'eau, au centre ; équipement pour effectuer des biométries, à droite.

■ 3. Elevage piscicole

3.1 – Suivi général du système aquaponique

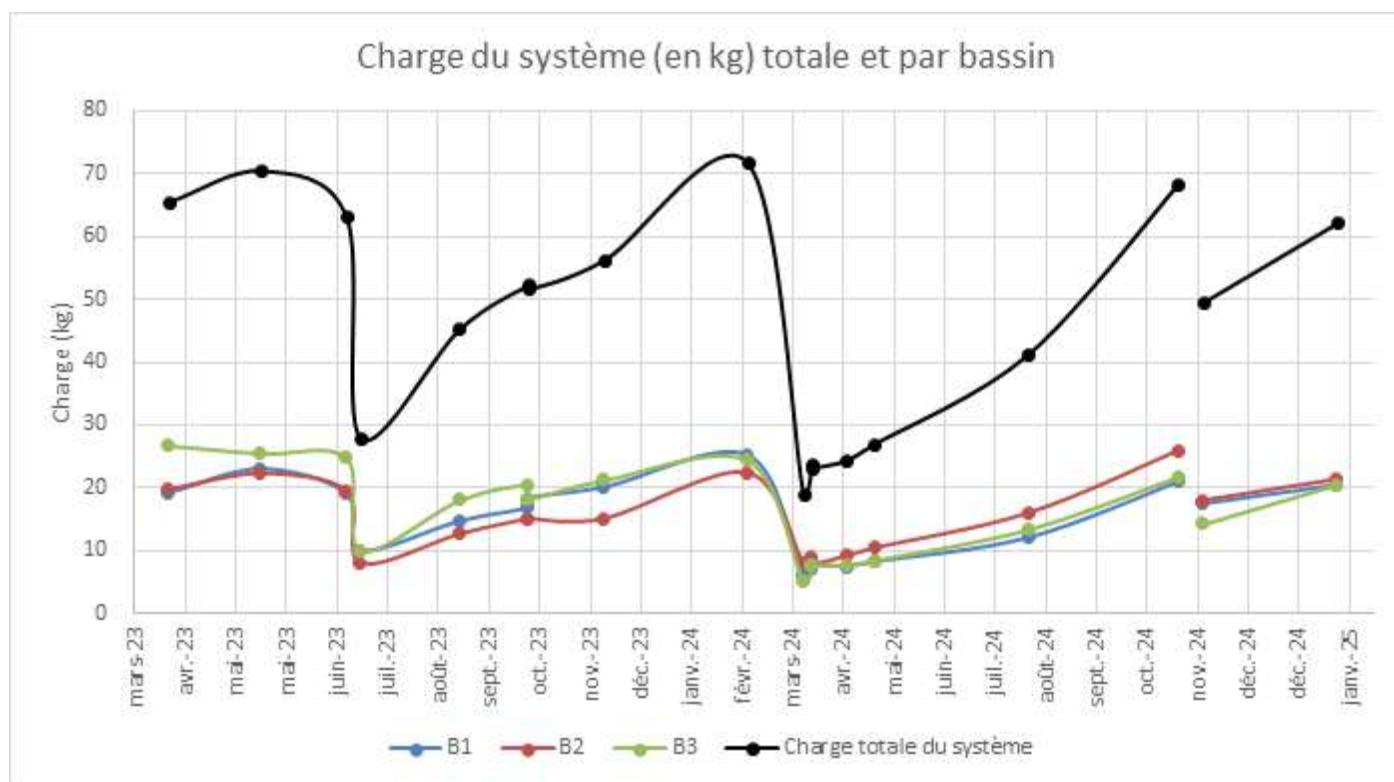
Objectifs de l'élevage : Le système piscicole recirculé a été dimensionné dans le but premier de fournir un effluent nutritif aux cultures horticoles en aval.

Le choix des espèces en élevage est conditionné par :

- Les conditions de production : sous serre, forte densité, faible apport d'eau
- Les objectifs de production : la greffe d'un module piscicole à une production horticole ornementale existante

Les espèces retenues pour cet essai sont des espèces piscicoles tolérant de fortes amplitudes thermiques, une eau chargée en nitrate, peu oxygénée. La greffe à une production horticole existante oriente le choix de production vers de l'ornementale et non du comestible pour pouvoir plus facilement s'intégrer dans les circuits de distribution du professionnel installé. Ainsi, deux espèces sont élevées dans les bassins de la serre aquaponique : le poisson rouge *Carassius auratus* (Linnaeus, 1758) et le carpe koï *Cyprinus carpio* (Linnaeus, 1758).

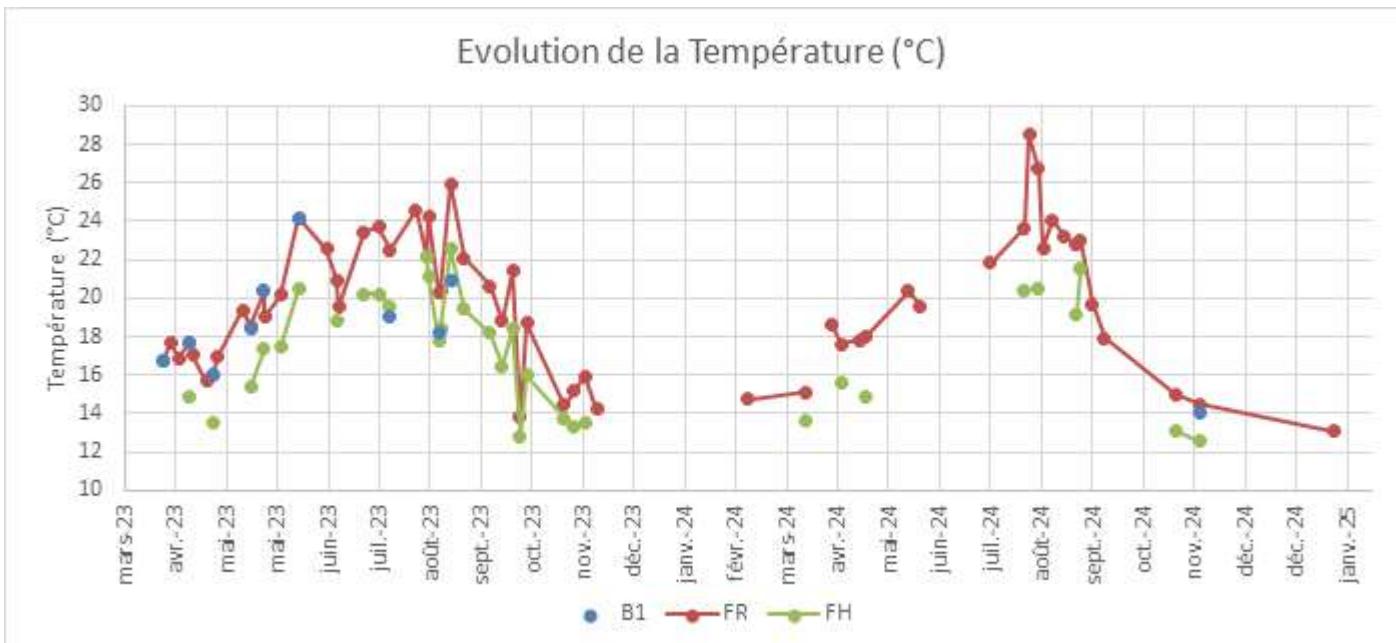
Entre mars 2023 et janvier 2025 se succèdent 3 cycles d'élevage. Les fortes chutes de biomasses correspondent aux détassements entre chaque cycle. La charge poisson évolue entre 20 et 70 kg, soit entre des densités comprises entre 7.5 et 26 kg/m³. L'activité de production (piscicole comme végétal) est saisonnalisée, expliquant la plus grande fréquence de suivis de mars à octobre chaque année sur les périodes de plus fortes croissances.



Graphique 1 : Charge du système totale et par bassin (en kg de poisson). Légende : B = Bassin d'élevage n°X. Charge totale = Somme de B1 + B2 + B3

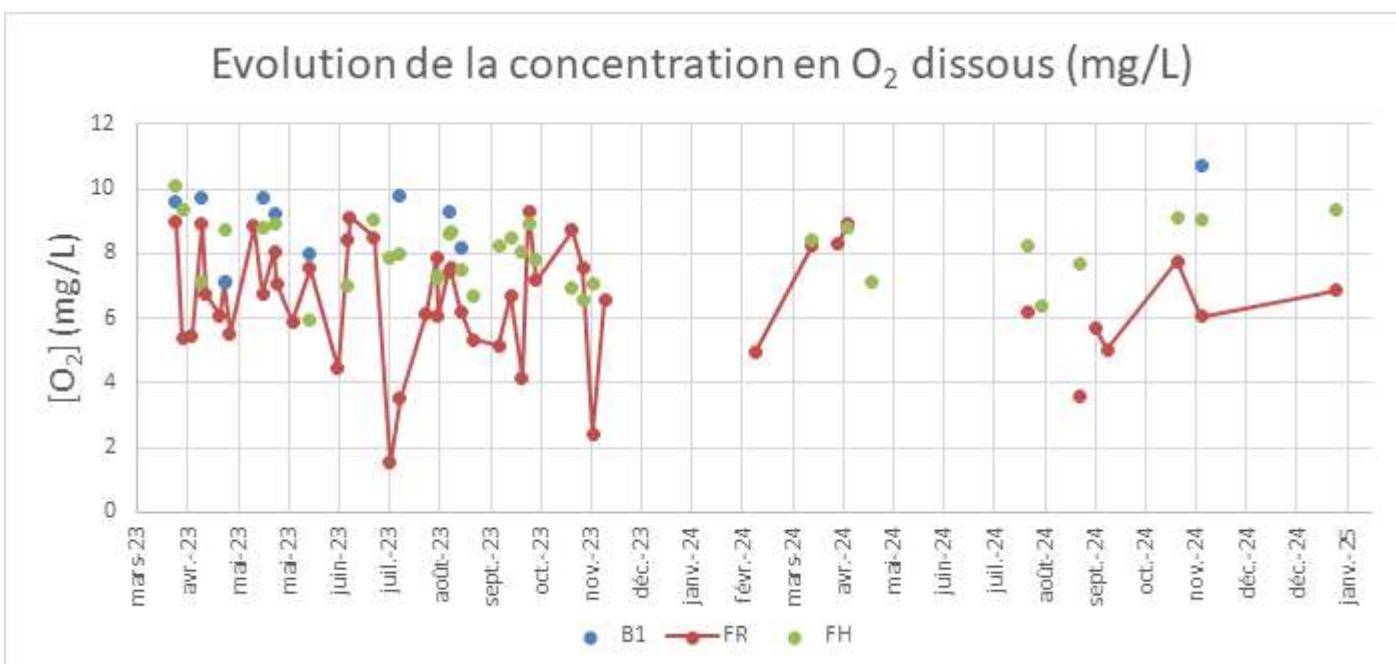
Les paramètres physico-chimiques sont suivis dans les différents compartiments du système :

- **B1 (en bleu)** : Bassin d'élevage n°1.
- **F1 (en rouge)** : Fosse de reprise aquacole.
- **FH (en vert)** : Fosses horticoles (eau de ferti-irrigation des cultures, moyenne des 4 fosses suivies).



Graphique 2 : Evolution de la température (°C) dans les différentes cuves au cours du projet.

La température entre les différents compartiments évolue de manière très liée avec l'eau du circuit recirculé en moyenne de 2 °C plus chaud que les fosses végétales. En effet, le positionnement des cuves horticoles sous les tablettes de culture et l'irrigation discontinu limite leurs réchauffements.



Graphique 3 : Evolution de la concentration en oxygène dissous (mg/L) dans les différentes cuves au cours du projet.

La disponibilité en oxygène est différente selon les compartiments. Malgré des variations de concentration en oxygène dissous dans la fosse aquacole (lié au débit variable de recirculation, à l'ouverture du système et à la qualité d'eau en sortie de bassin), ce paramètre est maintenu à quasi-saturation dans les bassins en élevage par des diffuseurs de fond.

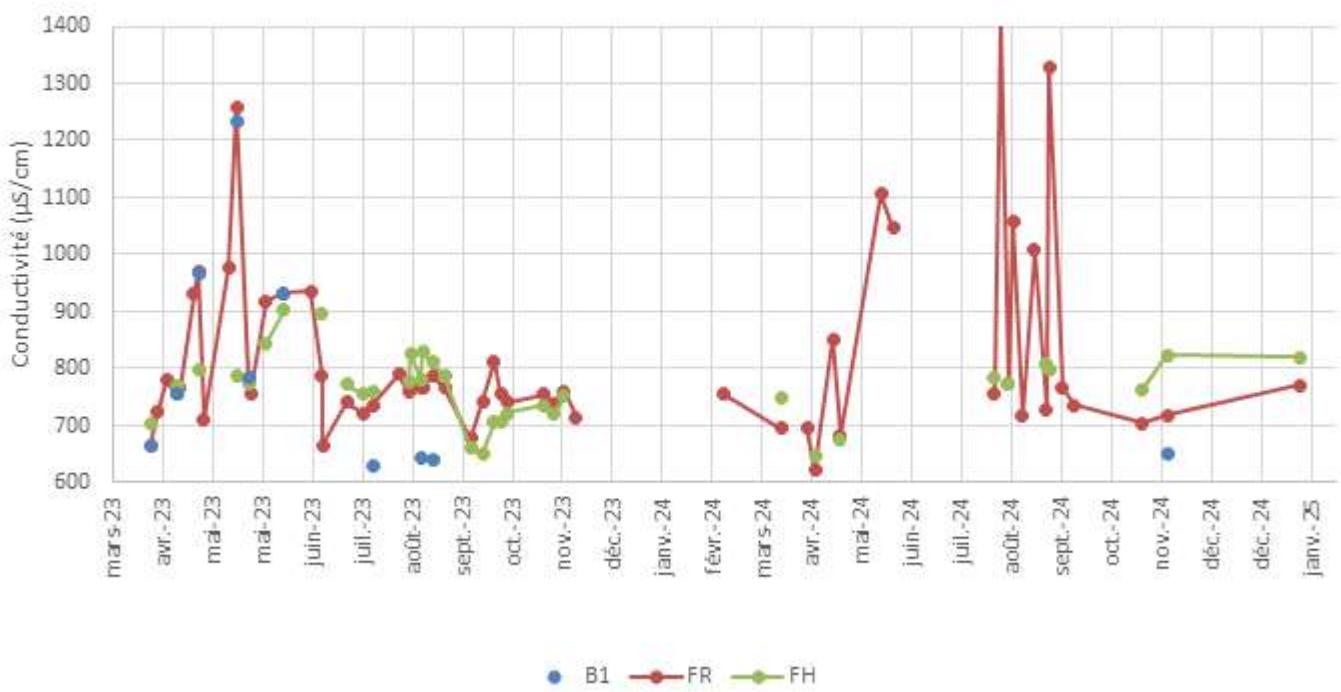
Evolution du pH



Graphique 4 : Evolution pH dans les différentes cuves au cours du projet.

La sortie par surverse de l'eau de l'élevage vers les fosses horticoles induit une remontée du pH dont l'origine n'a pas été clairement identifié mais sans doute lié à l'abattement par les plantes d'une proportion d'éléments acidifiants.

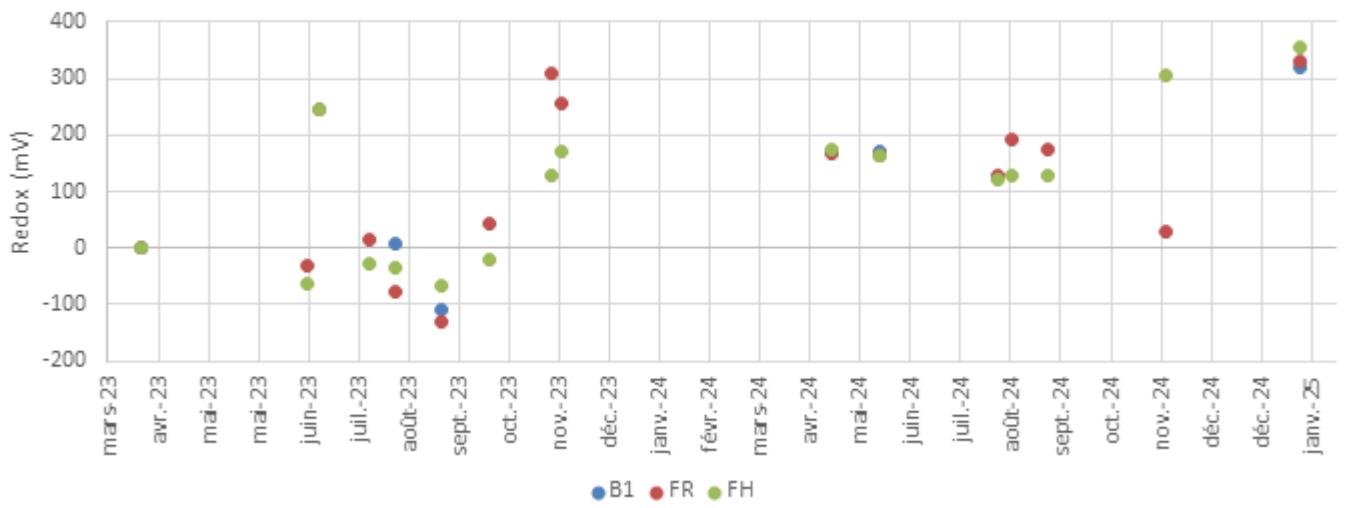
Evolution de la Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)



Graphique 5 : Evolution de la conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$) dans les différentes cuves au cours du projet.

La conductivité des différents compartiments est relativement stable, le suivi c'est tout de même caractériser pour une diminution de la conductivité dans la fosse de reprise piscicole lié à une baisse de la densité d'élevage et une augmentation du taux d'ouverture du système à partir d'avril 2024. Cette conductivité semble très corrélée aux variations du pH de l'eau neuve amenée dans le système. Au niveau des fosses horticoles cette conductivité est plus faible et beaucoup plus stable : toujours comprises entre 600 et 1000 μS .

Evolution de potentiel Redox (mV)



Graphique 6 : Evolution du potentiel Redox (mV) dans les différentes cuves au cours du projet.

Le redox est un paramètre moins suivi dans le système mais sa diminution à des valeurs négatives est indice d'un disfonctionnement du système : les problèmes techniques sur le filtre à sable et la réalisation du cycle de l'azote en août/septembre 2023 sont clairement visible sur ce graphe.

3.2 Cycles d'élevages durant l'étude

3.2.1 – Cycle 1 : du 23/04/23 au 04/07/23 - 102 jours

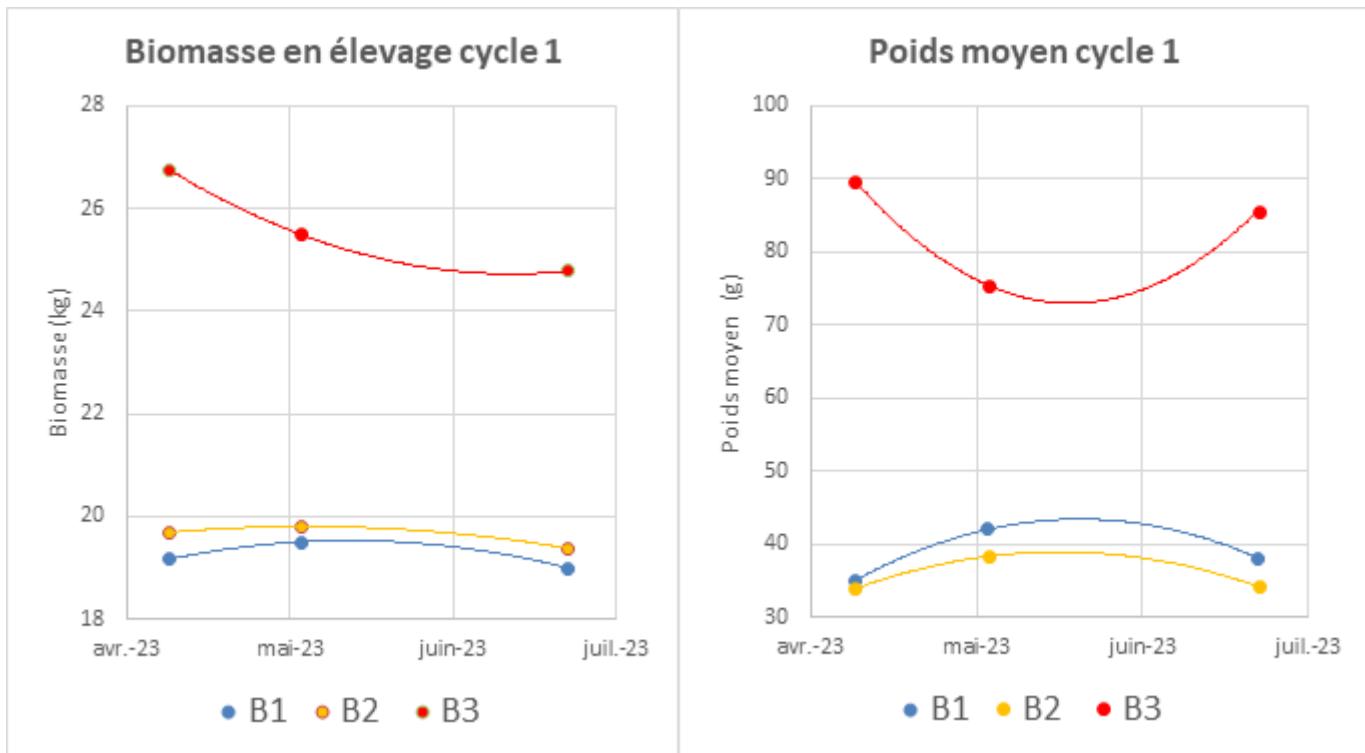
Le Cycle 1 « Forte densité – Faible nourrissage » a pour objectif :

- Remise en route du système en sortie d'hiver après une période de sous-rationnement (période inter-projets)
- Identification des limites du système et de leur évolution depuis sa mise en route en 2019 (taux d'ouverture minimal et quantité maximale d'aliment distribué)
- Production d'un effluent concentré pour la ferti-irriguation des cultures pour la phase de screening végétale
- Acquisition de données zootechniques sur les différents bassins en élevage

Des biométries sont réalisées durant le cycle (3). Le système a été rapidement marqué par une saturation rapide du filtre à sable par les MES émises par les poissons suite à la reprise d'une alimentation à des TR plus élevés que durant la période hivernale. La quantité d'aliment distribuée est inférieur à sa limite théorique de 3 kg/ semaine, établi par le bureau d'étude chargé de la conception de l'outils.



Photo 5 : Photos des bassins d'élevage lors du 1^{er} cycle d'élevage



Graphique 7 : Evolution de la biomasse et du poids moyen du cheptel lors du 1^{er} cycle d'élevage.

Le 1^{er} cycle d'élevage se caractérise par une stagnation de la biomasse en charge avec une compensation de la faible croissance par la mortalité pour les bassins B1 et B2. Un problème technique en milieu de cycle a causé un arrêt de la recirculation générée par la mise à jeun de cheptel. Les performances d'élevage pour ce cycle test ne sont pas satisfaisantes.

Les bassins B1 et B2 suivent la même évolution en termes de charge totale, croissance et mortalité. Les performances de B1 (monospécifique carassins) sont légèrement meilleures que B2 (mélange de carassin et de carpe koi). Le bassin B3 (mélange carassin/koi) est composé d'individus plus gros et à plus forte densité et est sous nourri par rapport aux autres bassins : on observe une diminution du poids moyen des individus le composant.

PARAMETRES D'ELEVAGE - CYCLE 1	
TEMPERATURE (°C)	17.6 (+- 1.2)
DENSITE (KG/M3)	23.4-24.3
TAUX DE RATIONNEMENT (TR) (%)	0.8
INDICE DE CONVERSION (IC)	Ø croissance significative
MORTALITE (%/MOIS)	< 1
[N-NH4] (MG/L)	0.23 (+- 0.13)
[N-NO2] (MG/L)	0.03 (+- 0.02)
[N-NO3] (MG/L)	42.3 (+- 10.7)
[P-PO4] (MG/L)	1.56 (+- 0.05)
PH	7.3 (+- 0.7)
CONDUCTIVITE (µS/CM)	875 (+- 146)

Tableau 1 : Paramètres moyens du 1^{er} cycle d'élevage

Conclusions – Cycle 1 :

- Production d'un effluent riche concentré
- Performance du système piscicole limité par l'usure du matériel, notamment le système de filtration.
- Mélange d'espèce induit une hétérogénéisation plus importante dans les bassins et une baisse des performances d'élevage

3.2.2 – Cycle 2 : du 07/09/23 au 19/02/24 - 267 jours

Le Cycle 2 « Dissociation des espèces – Recherche de croissance » a pour objectif :

- La comparaison des performances zootechniques carpes koï / carassin
- La comparaison des performances de croissance carassin selon le poids moyen

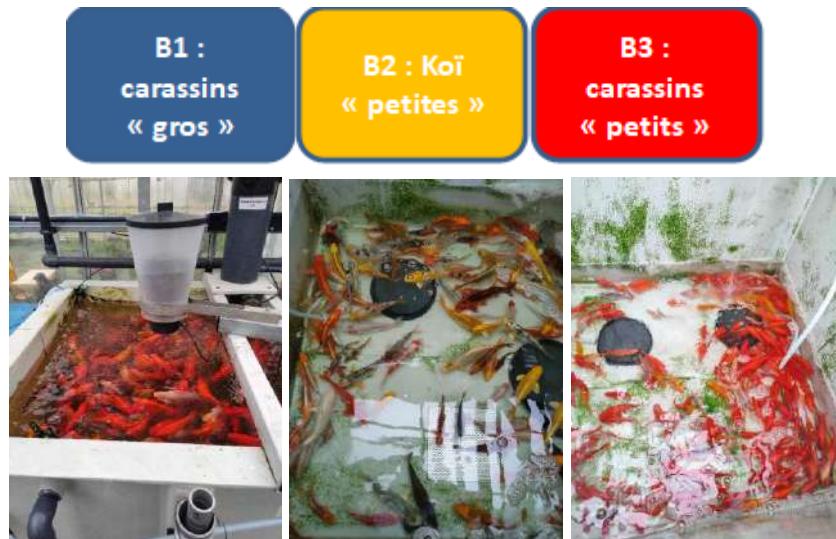
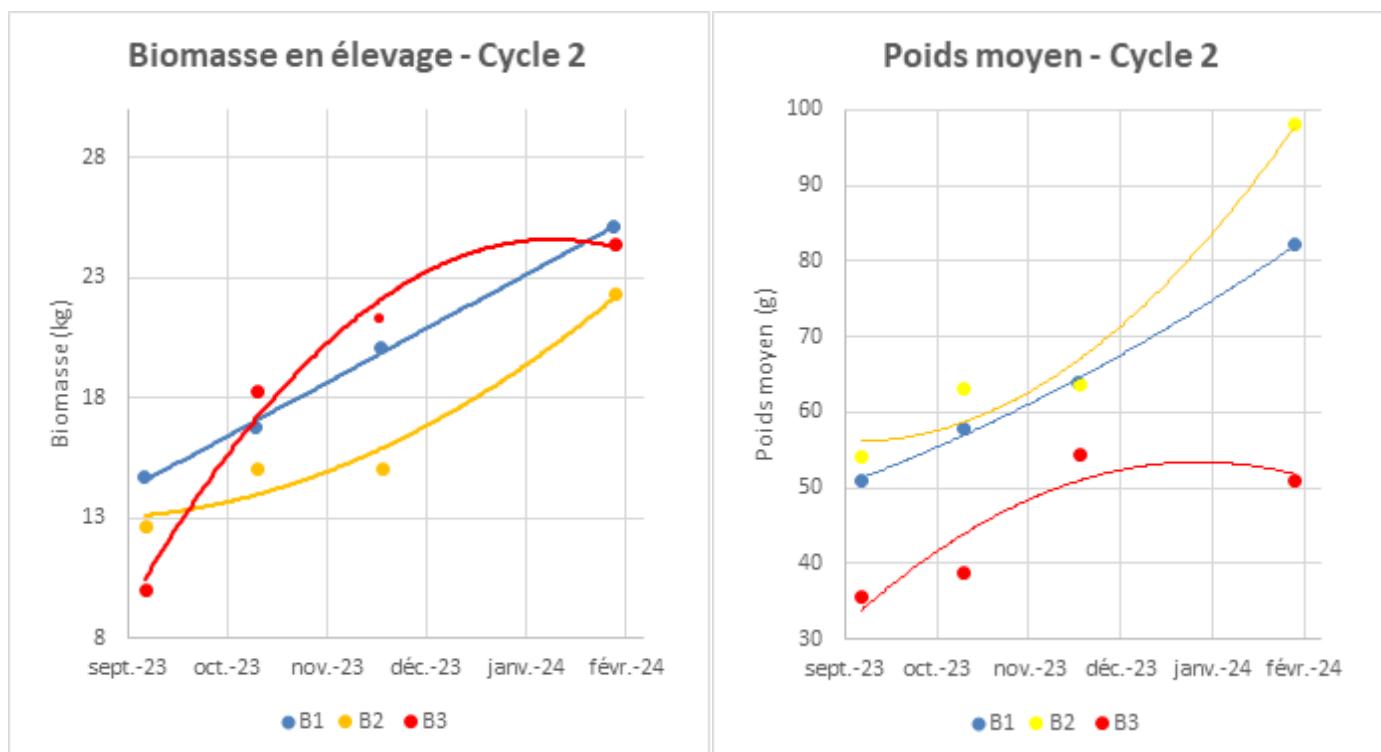


Photo 6 : Photos des bassins d'élevage lors du 2nd cycle d'élevage



PARAMETRES D'ELEVAGE - CYCLE 1	
TEMPERATURE (°C)	21.3 (+- 3.3)
DENSITE (KG/M3)	7.4 - 13.4
TAUX DE RATIONNEMENT (TR) (%)	1
INDICE DE CONVERSION (IC)	2.57
MORTALITE (%/MOIS)	< 0.5
[N-NH4] (MG/L)	0.17 (+- 0.04)
[N-NO2] (MG/L)	0.02 (+- 0.01)
[N-NO3] (MG/L)	31.7 (+- 7.7)
[P-PO4] (MG/L)	1.41 (+- 0.60)
PH	7.9 (+- 0.1)
CONDUCTIVITE (µS/CM)	763 (+- 17)

Tableau 2 : Paramètres moyens du 2nd cycle d'élevage

Conclusions – Cycle 2 :

- L'optimisation de la croissance carassin implique un détassemement plus régulier pour éviter l'effet « palier » observé à 50 g de poids moyen pour le bassin « petit »
- La mortalité carassin est supérieure à celle de la carpe koï
- La qualité d'eau et la propreté des bassins est bien meilleur pour l'élevage de carpes koï : à densité égale, la gestion sanitaire est plus simple

Les deux premiers cycles d'élevage, ainsi que l'aspect économique de la production piscicole nous orientent vers une recommandation sur l'élevage de la carpe koï.

3.2.3 – Cycle 3 : du 27/03/24 au 22/01/25 - 301 jours

Le Cycle 3 « Optimisation de l'élevage de la carpe koï » a pour objectif :

- Le suivi des performances zootechnique de la carpe koï sur 3 classes de poids distincts
- L'établissement d'une méthode d'estimation de la valeur de la production en élevage basée sur la cotation des individus et le relation poids/taille de l'élevage

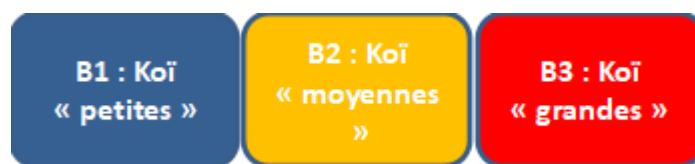
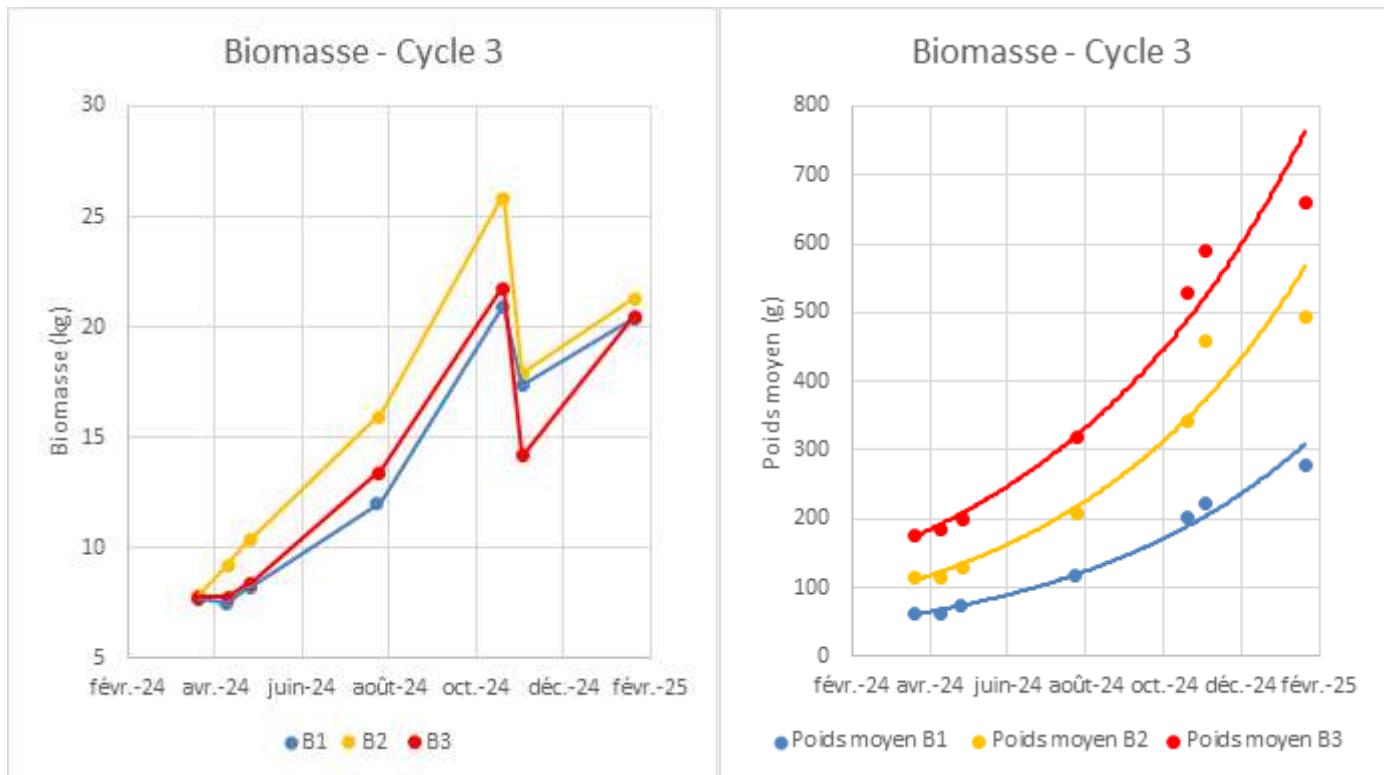


Photo 7 : Photos des calibres de carpes koï lors du 3^{ème} cycle d'élevage



Graphique 9 : Evolution de la biomasse et du poids moyen du cheptel lors du 3^{ème} cycle d'élevage.

Un détassement en octobre 2024 explique la diminution de biomasse dans les 3 bassins.

Le cycle 3 est témoin de l'identification, par les deux cycles précédents des paramètres zootechniques à viser.

PARAMETRES D'ELEVAGE - CYCLE 1	
TEMPERATURE (°C)	19.3 (+- 2.2)
DENSITE (KG/M3)	8.6-15.2
TAUX DE RATIONNEMENT (TR) (%)	1.2
INDICE DE CONVERSION (IC)	3
MORTALITE (%/MOIS)	0
[N-NH4] (MG/L)	0.46 (+- 0.13)
[N-NO2] (MG/L)	0.01 (+- 0.01)
[N-NO3] (MG/L)	20.2 (+- 5.5)
[P-PO4] (MG/L)	1.00 (+- 0.19)
PH	8.6 (+- 0.1)
CONDUCTIVITE (µS/CM)	666 (+-29)

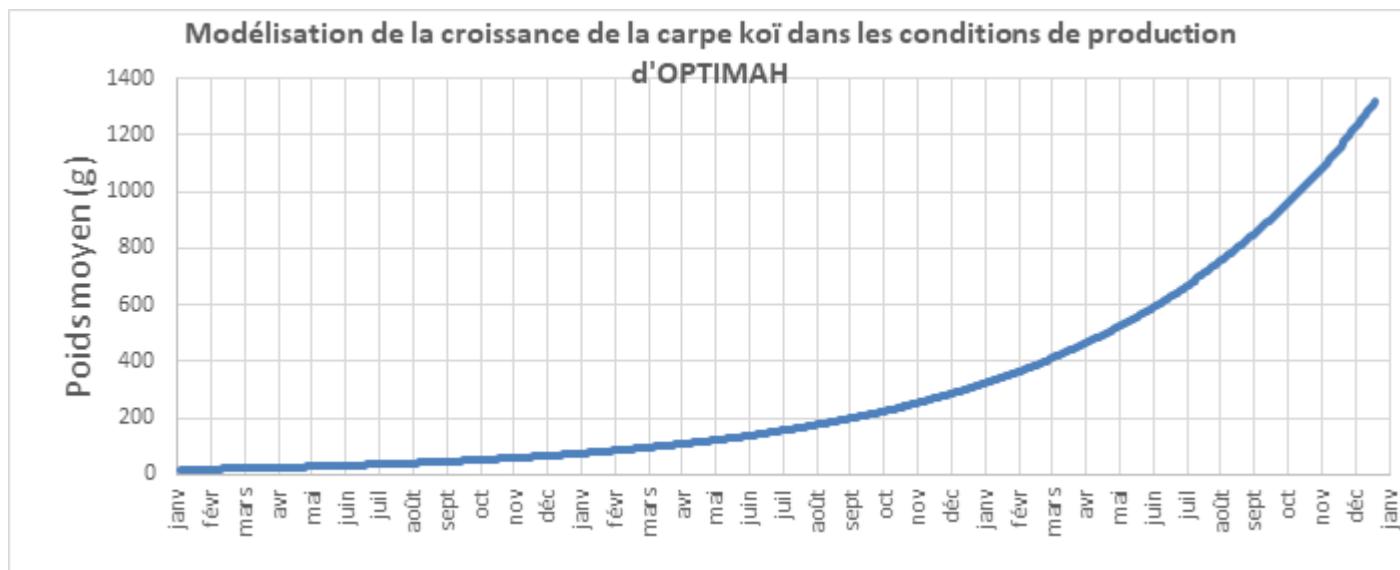
Tableau 3 : Paramètres moyens du 3^{ème} cycle d'élevage

Conclusions cycle 3 :

- Croissance efficace pour une densité de 30 kg/m3. (Détassement en octobre 2024)
- Taux de rationnement limite du système à 1.2 %/jour, au-delà le refus alimentaire entraîne le colmatage du filtre à sable et une baisse de la productivité du système
- Aucune mortalité à ces densités et à ces poids
- Pas de carence particulière sur le végétal malgré la diminution de la quantité d'aliment distribuée

3.3 – Modèle de croissance forte densité faible nourrissage carpe koi

Le suivi des bassins monospécifiques koi des cycles 2 (B2) et 3 (tous les bassins) permet de modéliser la croissance des koi dans nos conditions de productions.



Graphique 10 : Modélisation de la croissance de la carpe koi dans les conditions de production d'OPTIMAH

Ce modèle se base sur les températures du système et les TR appliqués, en moyenne 2.5x inférieur aux préconisations des formateurs d'aliments. Ce modèle se base sur :

- Une mortalité de 2.5%/mois (jusqu'à 30g), puis d'1%/mois
- Un TR faible entre 0.4 et 1.2 % variant selon le poids moyen et la température
- Un IC variant entre 1.5 et 3 (fonction de la température et du TR)
- Un maintien de la densité en dessous de 40 kg/m³
- L'utilisation d'un aliment spécial ornement

La distribution en bassin assure une consommation totale de l'aliment par rapport à une distribution sur un plan d'où, ou beaucoup d'aliment sont « perdus ».

La conformation actuelle du système limite la quantité d'aliment distribuée et impose un renouvellement en eau limitant l'augmentation de la température l'été, période préférentiel de croissance des carpes. Pour ces raisons, les performances de croissances sont inférieures à celle d'un élevage extensif en étang, et de certains système recirculés sous serre.

Les résultats observés restent très encourageants. Établir de nouvelles références pour ce type de couplage élevage-culture nécessiterait d'investir dans un nouveau système de filtration plus efficace et de revoir le circuit hydraulique.

3.4 – Vers un dimensionnement des systèmes aquaponiques ornementaux ?

3.4.1 – Approche Bilan de Masse – Dimensionnement aquaponique comestible

Une approche bilan de masse, à partir de la composition (tableau ci-après) et de la quantité d'aliment distribué par jour, permet de calculer les surfaces végétales pouvant être ferti-irriguées.

Pour un couplage de cet élevage avec une culture Tomates/Aubergine/Basilic/Poireaux/Laitue :

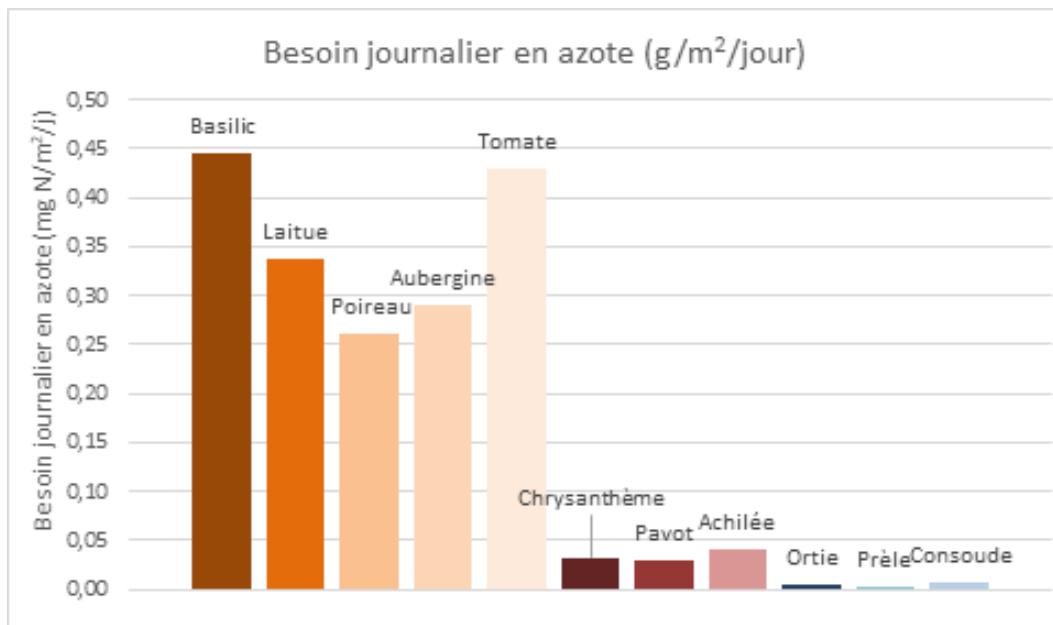
TAUX DE PROTEINES	47%
TAUX DE LIPIDES	8%
TAUX DE GLUCIDES / ENERGIE DIGESTIBLE	18%
TAUX DE PHOSPHORE	1,0%
TAUX DE FIBRES	3%
TAUX DE CENDRES	8%

Tableau 4 : Paramètres moyens du 3^{ème} cycle d'élevage

- Taux d'ouverture de 500 L/kg d'aliment distribué
- Surface conseillée est de 50 m².
- RASV (Ratio Aliment/Surface Végétale) serait de 8g/m² en culture pour un dimensionnement sur la base du Phosphore comme élément limitant.
- Un taux de N-NO3 de 70 mg/L et 11 mg/L de P-PO4 dans le système piscicole est un abattement quasi-total par les plantes en cultures.

3.4.2 – Lien pour un dimensionnement ornemental

Le projet OPTIMAH a permis l'acquisition de nouvelles connaissances concernant les besoins nutritionnels de plusieurs variétés de plantes ornementales et d'intérêt industriel. La comparaison de ses besoins nutritionnels permet d'établir de nouvelles préconisations de RASV et donc de surface de culture limite associé à l'élevage.



Graphique 11 : Besoin journalier en azote (g/m²/jour) en fonction des espèces (alimentaires ou ornementales)

Des analyses compositionnelles sur des plantes ornementales (chrysanthème, pavot, achillée) et d'intérêt industriel (ortie, prèle, consoude) révèle des besoins nutritionnels presque 10 x inférieur par rapports aux plantes comestibles. Le volume d'élevage de poissons à associer à des cultures de ce type sont donc théoriquement bien inférieurs à ce qui est actuellement préconisé en aquaponie. Ces premiers éléments permettent la construction d'un premier modèle de couplage poisson/plante d'ornement sur lequel se base l'approche économique décrite ci-après.

■ 4. Matériels et méthodes : expérimentations végétales

4.1 - Implantation de l'essai

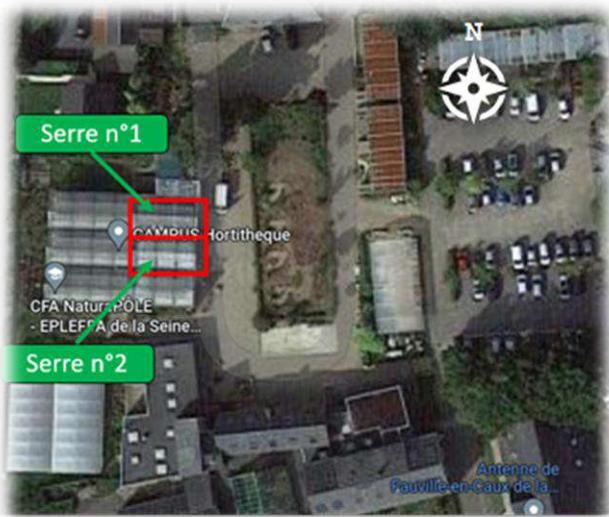


Photo 8 : Vue satellite des serres d'expérimentation de Terres-de-Caux (76).

4.2 - Organisation des essais

La serre n°1 sert de témoin et accueille un itinéraire classique de production. La serre n°2 intègre le système de production en aquaponie.

Les cultures sont disposées selon le même plan d'implantation dans chacune des serres à chaque essai (tablette 1 aquaponie = tablette 1 classique).

Les expérimentations sont menées dans 2 blocs de serre. Le premier contient le module d'aquaponie et les tablettes de culture sont irriguées avec ce dernier. Dans le second bloc, les tablettes sont irriguées avec une eau provenant de la station de fertilisation minérale de la serre (fertilisation classique en horticulture). Les deux blocs contiennent les mêmes cultures pour effectuer une comparaison « en miroir » des deux types de fertilisation.

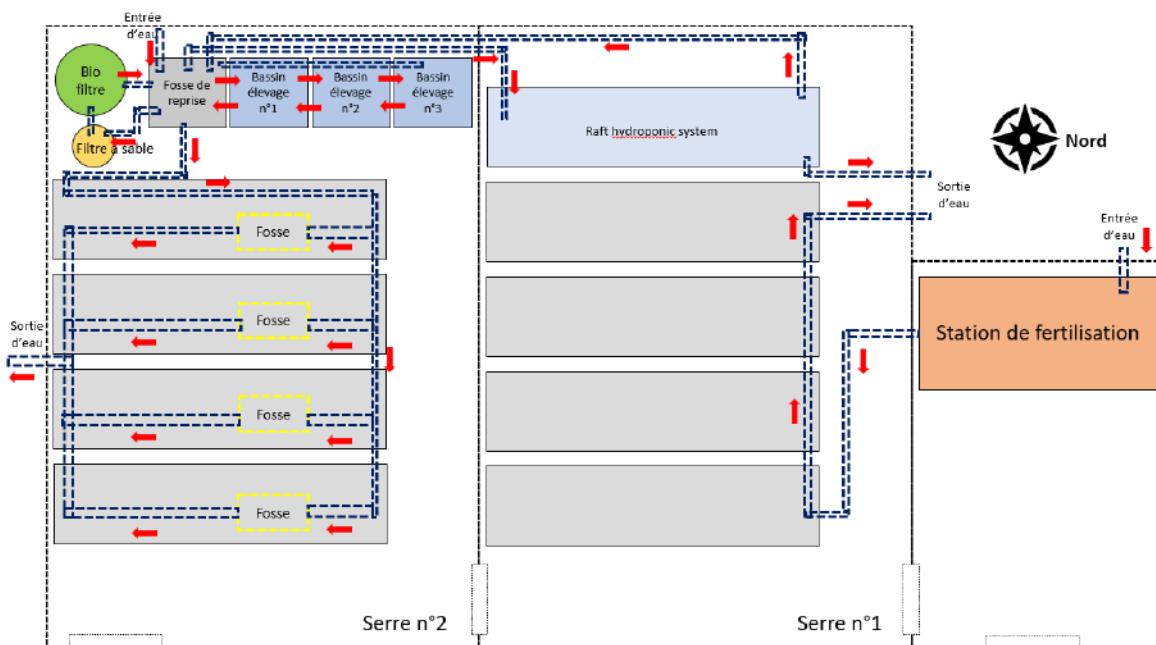


Schéma 4 : Représentation schématique du dispositif expérimental

4.3 – Installation d'un système « Raft »

Au cours de l'été 2024, un module « Raft » a été installé en remplacement d'une tablette de culture. Ce système qui est utilisé fréquemment dans les fermes aquaponiques n'est pas utilisé en production horticole. Ce système permet de cultiver des plantes en les laissant flotter au-dessus d'un bac rempli d'eau et constamment alimenté par un flux d'eau chargée provenant du compartiment aquacole. Les racines se développent directement dans l'eau et captent les nutriments nécessaires.

Ce système a été installé pour procéder à un essai spécifique. Dans le cadre d'une production de plante d'intérêt industriel, la *Centella asiatica*, plante semi-aquatique dont les métabolites sont utilisés dans des formulations de produits cosmétiques notamment, a été produite dans ce système pour identifier l'impact sur le rendement grâce à ce procédé.

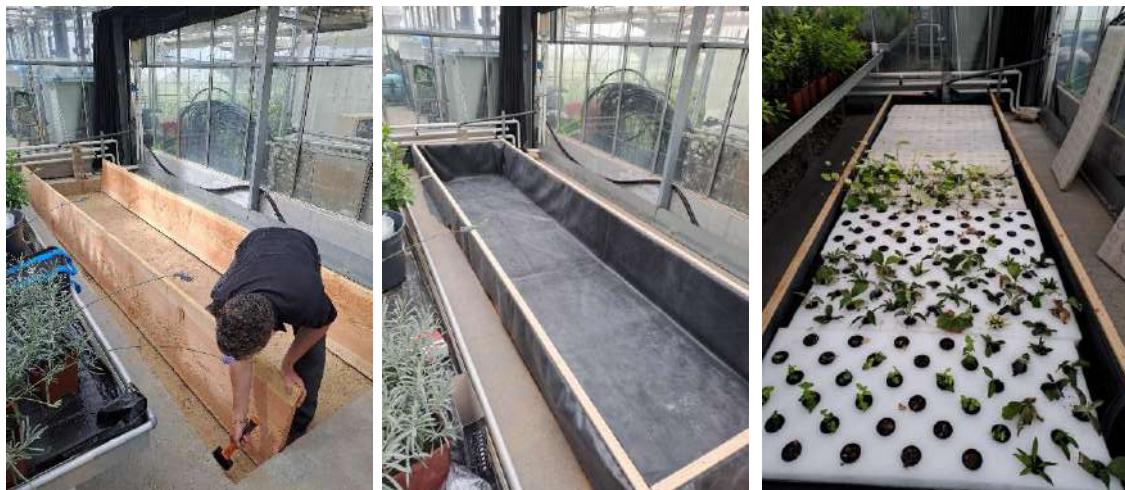


Photo 9 : Photos de l'installation du raft et de la mise en culture.

4.4 - Modalités testées

4.4.1 – Fertilisation

Le facteur étudié ici est le système de culture. On cherche à comparer deux modes de fertilisation sur une production végétale ornementale : une dite « organique » via le système en aquaponie et une dite « classique » à savoir une fertilisation minérale. Ces deux fertilisations sont apportées par un arrosage en subirrigation (technique d'irrigation dans laquelle l'eau est apportée aux plantes par capillarité, en humidifiant le substrat par le bas plutôt que par un arrosage en surface). Le module aquaponique a été intégré à un système de subirrigation déjà existant sur la structure.

La fertilisation et l'arrosage sont apportés selon le schéma suivant :

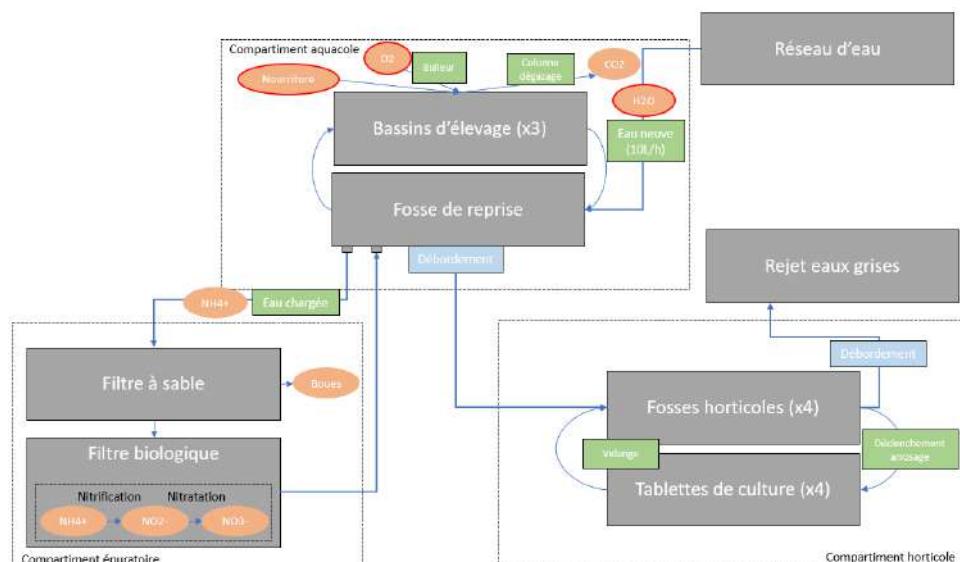


Schéma 5 : Circulation de l'eau et de la fertilisation dans le système aquaponique de Terre-de-Caux

Le système d'aquaponie utilisé pour les essais est un système découpé, c'est-à-dire qu'il est conçu de telle sorte que les flux d'eau sont à sens unique ; ils vont du compartiment aquacole vers le compartiment horticole avant d'être rejetés. Il existe cependant d'autres possibilités pour une recirculation de l'eau vers le compartiment aquacole mais qui n'ont pas été testées au cours de ce projet.

La fertilisation minérale a été apportée via une station de fertilisation. L'engrais utilisé est du Soluplant® 8-12-40+3.3MgO + nitrate de chaux.

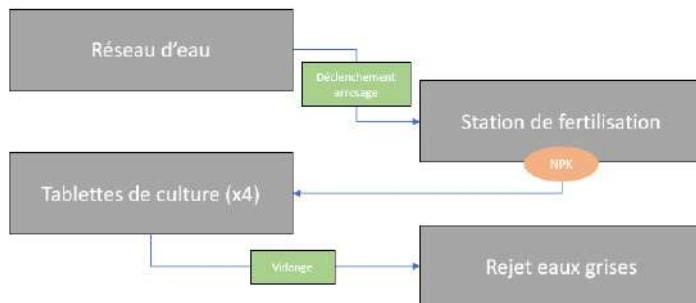


Schéma 6 : Circulation de l'eau et de la fertilisation dans le système de fertilisation minérale

4.4.2 – Substrat

L'un des facteurs étudiés dans ces essais est le substrat, avec un accent particulier sur l'évaluation de la faisabilité technique de plusieurs productions en utilisant un substrat sans tourbe. La tourbe, étant une ressource non renouvelable, est largement utilisée en horticulture pour constituer des supports de culture stables et rétenteurs en eau. Cependant, sa disponibilité est limitée, ce qui soulève des préoccupations environnementales. Il devient donc crucial d'explorer des alternatives viables pour réduire la dépendance à cette ressource tout en maintenant des performances de culture optimales.

- GTCH2 : substrat témoin : Tourbe blonde de sphagnum + Fibre de coco + engrais starter 12.12.17 / Fournisseur : Dumona
- GST : substrat sans tourbe : Fibre de bois + fibre de coco + engrais starter 12.12.17 + Micromax Premium + Floranid N31 / Fournisseur : Dumona

L'analyse physico-chimique des substrats est en annexe.

4.4.3 – Poteries sans plastique

La réduction du plastique pour la production horticole est une thématique qui touche particulièrement les professionnels et qui s'inscrit dans un changement des itinéraires de culture. Des pots fabriqués avec des matériaux innovants et renouvelables arrivent progressivement sur le marché. Cependant, il existe encore des questionnements sur l'impact de ces matériaux sur les conditions physico-chimiques du substrat et l'adaptation de l'itinéraire technique de culture (notamment l'irrigation). Des mesures ont été effectuées sur le substrat et la qualité des plantes doit être évaluée en fonction des pots utilisés.

4 références de pots issues de 3 fournisseurs différents ont été testées.

- Duo 12 cm 5° Altereco Bio, de chez Soparco. Pot en PLA.
- Fertilpot NT12++, de chez Fertil. Pot en fibre de bois.
- Pot R2 10 cm, de chez Jiffy, en fibre de bois bois.
- Jiffy Pots en sphagnum, de chez Jiffy. Pot en mousse de sphagnum.

Ces pots ont des diamètres différents, soit 10,5 soit 12cm, ils ont été comparés à 2 références de pot en plastique de ces deux diamètres.

4.5 - Critères étudiés pour la production végétale

Les productions à l'étude dans ce projet sont uniquement des cultures ornementales. Les critères étudiés sont donc majoritairement l'esthétique des végétaux produits et leur statut nutritionnel. Selon les essais, les critères étudiés sont différents.

4.5.1 – Qualité commerciale

La qualité commerciale d'une plante ornementale se base sur de nombreux critères esthétiques et est souvent dépendante de l'espèce commercialisée (intensité de la couleur des fleurs, port de la plante, apparence du feuillage, etc.). Lors de ce programme, les plantes ont donc toutes été évaluées en suivant les mêmes variables de notations : l'homogénéité et la densité du feuillage, sa couleur (liée aux carences visibles), la floraison, la présence de maladies sur la plante.

Le système de notation a été établi de la manière suivante :

- **A** : Homogénéité du feuillage et des fleurs, aucune carence visible, pas de maladie, plante attrayante pour un client, plante commercialisable
- **B** : Manque d'homogénéité du feuillage ou des fleurs, carences ponctuelles, pas de maladies, plante commercialisable mais déclassée
- **C** : Manque d'homogénéité du feuillage et des fleurs, carences marquées, présence de symptômes de maladie, plante non commercialisable
- **D** : Perte de la plante

Ce système de notation vise à classer ce qui est acceptable pour l'achat d'une plante (A et B) à ce qui est rédhibitoire (C et D).

4.5.2 – Développement racinaire

Le développement racinaire d'une plante se base sur le pourcentage de colonisation de la motte par les racines de la plante ainsi que sur la couleur de ces dernières. Des racines bien développées permettent d'avoir un aperçu de la santé de la plante. Si elles sont blanches, elles sont saines et permettent une bonne absorption des nutriments ; si elles sont brunes, elles sont dégradées et limitent l'absorption. La notation se fait par classes.

Le système de notation a été établi de la manière suivante :

- **A** : Racines saines et occupant + de 66% de la motte
- **B** : Racines saines et occupant 33 à 66% de la motte
- **C** : Racines dégradées et/ou occupant – de 33% de la motte
- **D** : Pas de racines visibles

4.5.3 – Indice de chlorophylle

L'indice de chlorophylle permet d'évaluer l'état nutritionnel de la plante. C'est un critère important dans cette étude car c'est le mode de fertilisation qui est directement évalué dans ce projet. D'un côté, un système de fertilisation minérale classique, de l'autre, une fertilisation organique dépendante du compartiment aquacole associé.

Pour pouvoir comparer ces deux modes de cultures, c'est le taux de chlorophylle qui est indirectement mesuré afin d'évaluer une différence dans la nutrition. Une pince SPAD502 a été utilisée pour ces mesures.

La pince SPAD502 mesure l'absorbance des feuilles dans le rouge et l'infrarouge pour donner un indice chlorophylle (sans unité). Cet indice est lui corrélé à une concentration en chlorophylle et par extension à une concentration en azote. Des modèles mathématiques ont été construits pour lier précisément cet indice à une concentration en azote sur grandes cultures, mais pas sur les cultures ornementales.

Dans le cadre de notre étude, c'est cet indice qui est comparé entre les deux modes de production afin de mettre en lumière une éventuelle différence dans leur nutrition. Cet indice est échelonné de 0 à 99,9. Les mesures ont été effectuées selon une même méthodologie, à savoir une mesure sur une feuille ancienne (tiers inférieur de la plante).



Photo 10 : Pince SPAD502.

4.5.4 – Croissance aérienne

Les mesures directes sur la physiologie des plantes permettent d'une part de comparer l'effet des différentes modalités sur leur développement aérien, et d'autre part d'estimer la vitesse de croissance en fonction des modalités. Cette croissance est évaluée en mesurant la hauteur de la plante, entre le collet et l'apex.

4.5.5 – Rendement floral

Le rendement floral est un indice utilisé pour évaluer la quantité de fleurs produites par pied cultivé. Il consiste à compter le nombre de fleurs récoltées en fonction des différentes modalités testées. Cette quantité est ensuite rapportée à la densité de culture afin de déterminer le rendement par m².

4.5.6 – Profil métabolique

L'étude du profil métabolique a été réalisée pour 3 espèces qui ont un intérêt dans le domaine de la cosmétique et de la pharmacologie. Elle vise à comparer les quantités de métabolites secondaires produites par ces plantes et pouvant servir d'ingrédients actifs dans ces domaines. L'objectif est de mettre en évidence des différences dans le « rendement en métabolite » en fonction de l'itinéraire technique de production.

Les résultats font partie d'un rapport technique disponible en annexe de ce document. Une vulgarisation sera présentée dans la partie « 5 – Expérimentation sur la production végétale ».

4.6 - Analyse statistique des données

Les analyses statistiques ont été conduites avec le logiciel statistique RStudio 2021.09.0. Après vérifications des postulats de normalité et d'homoscédasticité, avec les tests de Shapiro-Wilk et Bartlett, les données issues des mesures de l'indice chlorophylle ont été soumis à un test T de Student. Les données issues des notations par classe (« Qualité commerciale » et « Développement racinaire ») ont été soumis à un test du khi² au seuil alpha 0,5 %.

■ 5. Expérimentations sur la production végétale

Lors de ce projet, 6 essais ont été mis en place :

- « Screening végétal » pour identifier la qualité des végétaux horticoles en aquaponie.
- « Chrysanthème » pour évaluer la faisabilité de cette production sachant qu'elle est d'un intérêt économique majeure pour une partie des producteurs horticoles.
- « Fleurs comestibles » pour envisager une diversification de production en aquaponie.
- « Plantes d'intérêt industriel » pour évaluer l'intérêt de l'aquaponie pour la production d'ingrédients actifs en cosmétologie et pharmacologie.
- « Jeunes plants de pépinière » pour évaluer la fertilisation aquaponique sur un pas de temps long et la vitesse de production pour des espèces ligneuses.
- « Alternatives aux pots plastiques » pour améliorer l'itinéraire technique de culture en réduisant les l'usage du plastique en production.

5.1 – Essai « Screening végétal »

Contexte et objectifs

La filière horticole se distingue par la diversité des espèces ornementales cultivées, chacune étant adaptée à un biotope spécifique dans son milieu d'origine. Leurs besoins peuvent varier, tant en termes de conditions climatiques qu'en termes d'itinéraires culturaux. En aquaponie, les effets de la fertilisation organique sur la qualité et la santé de ces végétaux sont encore peu connus.

L'objectif de cette expérimentation est de réaliser un screening végétal sur des espèces ornementales, en suivant un itinéraire de production en aquaponie et en le comparant à un itinéraire classique utilisant une fertilisation minérale (Action 1). Parallèlement, différents substrats ont été évalués pour développer un itinéraire cultural innovant, en comparant un substrat contenant de la tourbe à un autre sans tourbe (Action 4).

Modalités étudiées

1. Espèces cultivées : dans cette expérimentation, 40 espèces horticoles ont été évaluées (cf. « Matériel végétal »).
2. Fertilisation : la fertilisation organique provenant du système aquaponique en comparaison à une fertilisation minérale.
3. Substrat : un substrat sans tourbe (GST) a été comparé à un substrat avec tourbe (GTCH2).

Conduite culturelle

REMPOTAGE	S11 / 2023 - motte de 3 cm Ø
CONTENANTS	Pot rond 12,5 cm / 0,6 L
SUBSTRAT	Tourbe (TCH2) / Sans tourbe (TCH2(ST)) – Fournisseur DUMONA
IRRIGATION	Subirrigation
FERTILISATION	<i>Aquaponie</i> : aucun complément <i>Minérale</i> : Soluplant® 8-12-40+3.3MgO + nitrate de chaux
PROTECTION SANITAIRE	PBI contre pucerons : Chrysopa 1.000 (auxiliaire <i>Chrysoperla sp.</i>) PBI contre thrips : Thripex 50.000 (auxiliaire <i>Neoseiulus cucumeris</i>)
INTERVENTIONS CULTURALES	Pincements, espacements, lâchers d'auxiliaire

Matériel végétal

N°	Nom scientifique	Cultivar	Fournisseur
1	<i>Acalypha pendula</i>	Cat's Tail	Haberschill
2	<i>Achillea ptarmica</i>	Summer Drift	Haberschill
3	<i>Achyranthes carminata</i>	Carminata	Haberschill
4	<i>Anagallis monelli</i>	Skylover	Haberschill
5	<i>Argyranthemum frutescens</i>	Double White	Haberschill
6	<i>Bacopa caroliniana</i>	Gulliver White	Haberschill
7	<i>Begonia x hybrida</i>	Dragon Wing rouge	Haberschill

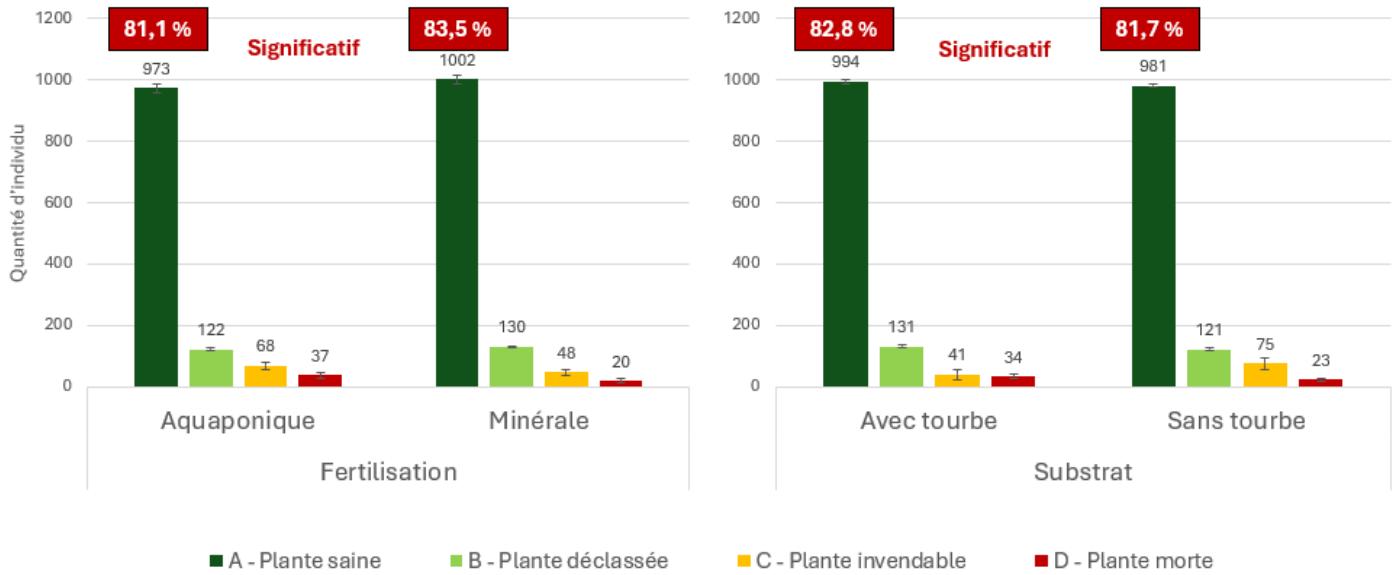
8	<i>Bidens ferulifolia</i>	Beedance Painted red	Haberschill
9	<i>Calibrachoa x hybrida</i>	Bright red	Haberschill
10	<i>Tropaeolum majus</i>	Tip Top	Haberschill
11	<i>Cléome hassleriana</i>	Clio Magenta	Haberschill
12	<i>Cosmos atrosanguineus</i>	New Choco	Haberschill
13	<i>Dianthus superbus</i>	Tiny pleasure rose	Haberschill
14	<i>Diascia barberae</i>	Trinity Sunset	Haberschill
15	<i>Erigeron karvinskianus</i>	Profusion	Haberschill
16	<i>Euryops pectinatus</i>	Sunshine Silver	Haberschill
17	<i>Gaura lindheimeri</i>	Steffi Dark Rose	Haberschill
18	<i>Helichrysum lanatum</i>	Gold	Haberschill
19	<i>Heuchera</i>	Fire Chief	Haberschill
20	<i>Isotoma axillaris</i>	Dark Pink	Haberschill
21	<i>Lamium galeobdolon</i>	Hermans Pride	Haberschill
22	<i>Lobelia erinus</i>	Electric Purple	Haberschill
23	<i>Lobularia maritima</i>	Purple steam	Haberschill
24	<i>Mentha suaveolens</i>	Verte	Haberschill
25	<i>Némésia x hybrida</i>	Sunpeddle Painted rose	Haberschill
26	<i>Pelargonium x domesticum</i>	Angels Perfume	Haberschill
27	<i>Pétunia x hybrida</i>	Black Mamba	Haberschill
28	<i>Pétunia x hybrida</i>	Sangria	Haberschill
29	<i>Phygelius capensis</i>	Crème	Haberschill
30	<i>Plectranthus purpurea</i>	Variegata	Haberschill
31	<i>Plumbago auriculata</i>	Bleu	Haberschill
32	<i>Rudbeckia hirta</i>	Marmelade	Haberschill
33	<i>Sauge x jamensis</i>	Greggi Belle de Loire	Haberschill
34	<i>Sauge péruvienne</i>	Salvia discolor	Haberschill
35	<i>Scaevola aemula</i>	Surdiva Snow Blanket	Haberschill
36	<i>Sedum reflexum</i>	Lemon ball	Haberschill
37	<i>Stipa tenuifolia</i>	Pony Tails	Haberschill
38	<i>Streptocarpus saxorum</i>	Bleu	Haberschill
39	<i>Torenia x hybrida</i>	Moon Magenta	Haberschill
40	<i>Verveine x hybrida</i>	Vanessa Compact White	Haberschill

Résultats

L'ensemble des plantes de l'essai a été évalué en fonction de leur qualité commerciale en fin de culture. Elles ont été classées en 4 catégories selon leur état (voir « 4.3 – Critères étudiés pour la production végétale »). Cette évaluation de la qualité a pris en compte le mode de fertilisation, d'une part, et le substrat utilisé, d'autre part. La fertilisation minérale et le substrat contenant de la tourbe servent de références, étant les pratiques classiques en production horticole. Une différence significative indique qu'un système produit un résultat supérieur à l'autre, bien que des nuances soient nécessaires. Les résultats sont présentés ci-dessous.

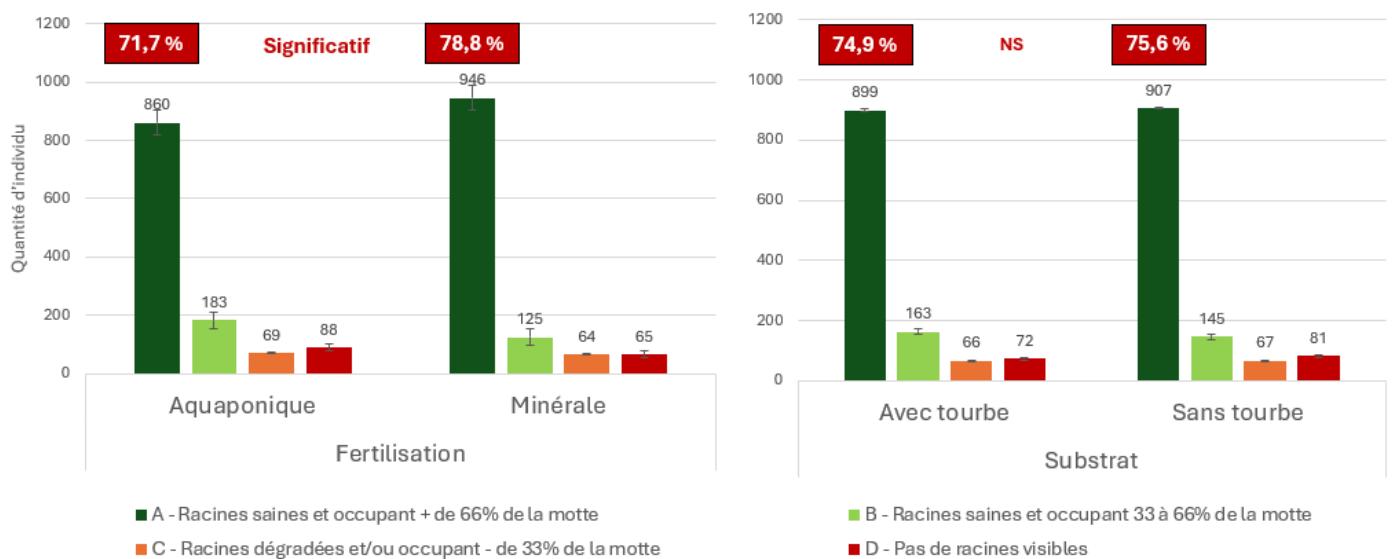
Concernant le facteur fertilisation, les deux modalités enregistrent peu de perte, les classes A et B représentent plus de 90% des individus. Après analyse statistique, on peut mettre en évidence une différence significative entre les deux systèmes. Le système minéral montre un meilleur résultat. Cependant, aux vues du faible écart (2,4% entre les classes « Plantes saines »), on peut difficilement mettre en défaut la fertilisation aquaponique. Cette notation étant effectuée sur la globalité de l'essai, cette différence est due à quelques espèces qui s'adaptent moins facilement à la fertilisation organique. De manière globale, on peut dire que la production en aquaponie permet une production tout aussi qualitative qu'avec une fertilisation minérale.

Concernant le facteur substrat, après analyse statistique, on peut également mettre en évidence une différence significative qui est, là aussi, très faible (1,1% entre les classes « Plantes saines ») entre les deux substrats utilisés. Cette notation étant, elle aussi, globale il est nécessaire de discriminer les résultats par espèces. De manière générale, le substrat a été relativement peu impactant sur la production.



Graphique 11 : Histogramme représentant la qualité commerciale des plantes à la fin de l'essai.

Le développement racinaire de la plante joue un rôle important dans la capacité à prélever les nutriments, qu'ils soient d'origine minérale ou organique. Il a donc été évalué (cf. « 4.3 – Critères étudiés pour la production végétale ») et les résultats sont les suivants :



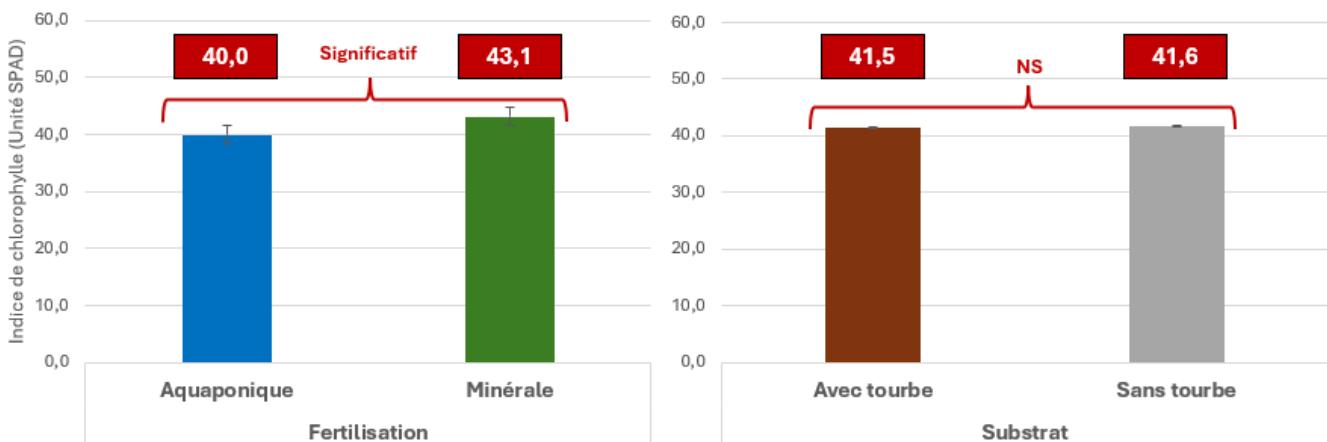
Graphique 12 : Histogramme représentant le développement racinaire des plantes à la fin de l'essai.

Concernant le facteur fertilisation, on peut mettre en exergue un développement racinaire moins important pour les plantes ayant été fertilisées en aquaponie que celles ayant été fertilisées par un engrais minéral. On observe une différence significative entre les deux systèmes avec un écart de 7,1% entre les plantes classées « A ».

Concernant le facteur substrat, aucune différence significative n'a pu être observée. L'utilisation d'un substrat sans tourbe n'a globalement pas d'effet sur le développement racinaire.

Ces résultats sont également à nuancer par espèce.

Dans l'objectif de suivre plus précisément l'aspect nutritionnel des plantes, une mesure a été effectuée en fin d'essai pour identifier des différences entre les plantes en fonction des modalités de fertilisation et de substrat. La méthodologie est décrite dans le paragraphe « 4.3 – Critères étudiés pour la production végétale ». Les résultats sont les suivants.



Graphique 13 : Histogramme représentant l'indice de chlorophylle des plantes à la fin de l'essai.

L'indice de chlorophylle que l'on obtient est lié au taux d'azote/nutrition de la plante. Il est utilisé dans ces essais pour effectuer des comparaisons entre deux modalités.

L'analyse statistique des données met en avant une différence significative concernant l'indice de chlorophylle en fonction de la modalité de fertilisation. Les plantes ayant été fertilisées avec une fertilisation minérale montrent un indice de chlorophylle plus important que celles ayant suivi une fertilisation organique. Cette différence permet de mettre en lumière un problème dans la nutrition de la plante dans la modalité de fertilisation par l'aquaponie.

On peut donc émettre l'hypothèse que la fertilisation aquaponique induit certaines carences qui limitent la production de chlorophylle au sein de la plante, et expliquer les différences de qualité et d'enracinement.

Concernant la modalité de substrat, elle ne semble pas avoir d'impact sur le statut nutritionnel de la plante.

Les résultats par espèces sont développés dans les tableaux suivants.

Concernant la modalité de fertilisation, l'interprétation est la suivante :

- « NS » : Le critère évalué n'est pas impacté par le système de fertilisation.
- « Minérale » : Le critère évalué est impacté par la modalité de fertilisation et c'est la fertilisation minérale qui donne le meilleur résultat.
- « Aquaponie » : Le critère évalué est impacté par la modalité de fertilisation et c'est la fertilisation aquaponique qui donne le meilleur résultat.

Concernant la modalité de substrat, l'interprétation est la suivante :

- « NS » : Le critère évalué n'est pas impacté par le substrat utilisé.
- « Tourbe » : Le critère évalué est impacté par la modalité de substrat et c'est le substrat avec tourbe qui donne le meilleur résultat.
- « Sans tourbe » : Le critère évalué est impacté par la modalité de substrat et c'est substrat sans tourbe qui donne le meilleur résultat.

Conclusion

Le screening végétal réalisé a permis de démontrer qu'une production horticole conduite avec une fertilisation issue d'un système aquaponique peut atteindre un niveau de qualité équivalent à celui d'une culture menée de manière plus conventionnelle avec une fertilisation minérale. Ces résultats doivent néanmoins être nuancés selon les espèces. Certaines, comme *Acalypha pendula*, *Petunia hybrida*, *Rudbeckia hirta* ou encore *Streptocarpus saxorum*, se montrent plus sensibles et réticentes à ce mode de culture. Cela pourrait être le résultat d'une difficulté à assimiler les nutriments ou des besoins en fertilisation plus important que les autres espèces. Malgré cela, plus de 85 % des espèces testées se révèlent compatibles avec une fertilisation aquaponique, ce qui ouvre des perspectives intéressantes pour la diversification des pratiques horticoles.

Concernant le choix du substrat, les écarts sont légèrement plus marqués. Environ 25 % des espèces étudiées présentent une préférence notable pour l'un ou l'autre des substrats testés. L'absence de tourbe, dans certains mélanges, réduit la capacité de rétention en eau, ce qui peut affecter la croissance des plantes selon leur degré de sensibilité à ce facteur hydrique.

L'objectif principal de ces essais était de comparer des itinéraires techniques innovants avec des itinéraires de production plus classiques. L'absence de différence significative observée (« NS ») dans de nombreux cas indique que ces méthodes alternatives peuvent être aussi efficaces que les approches traditionnelles. Il apparaît donc tout à fait envisageable de cultiver la grande majorité des espèces horticoles en s'appuyant sur ces techniques innovantes, notamment l'aquaponie, tout en maintenant des niveaux de qualité et de rendement satisfaisants.

Espèce	N°	Qualité commerciale	Dvlp. racinaire	Indice chlorophylle	Espèce	N°	Qualité commerciale	Dvlp. racinaire	Indice chlorophylle
<i>Acalypha pendula</i>	1	Minérale	Minérale	Minérale	<i>Lamium galeobdolon</i>	21	NS	NS	NS
<i>Achillea ptarnica</i>	2	NS	NS	NS	<i>Lobelia erinus</i>	22	NS	NS	Minérale
<i>Achyranthes carminata</i>	3	NS	NS	X	<i>Lobularia maritima</i>	23	NS	NS	Minérale
<i>Anagallis monelli</i>	4	NS	NS	NS	<i>Mentha suaveolens</i>	24	NS	NS	Minérale
<i>Argyranthemum frutescens</i>	5	NS	NS	X	<i>Némésia x hybrida</i>	25	NS	NS	NS
<i>Bacopa caroliniana</i>	6	NS	NS	Minérale	<i>Pelargonium x domesticum</i>	26	NS	Aquaponie	Minérale
<i>Bégonia x hybrida</i>	7	NS	Aquaponie	Minérale	<i>Pétunia x hybrida</i>	27	Minérale	Minérale	Minérale
<i>Bidens ferulifolia</i>	8	NS	NS	NS	<i>Pétunia x hybrida</i>	28	NS	NS	NS
<i>Calibrachoa x hybrida</i>	9	Aquaponie	Minérale	NS	<i>Phygelius capensis</i>	29	NS	NS	Minérale
<i>Tropaeolum majus</i>	10	NS	NS	NS	<i>Plectranthus purpurea</i>	30	NS	NS	NS
<i>Cléome hassleriana</i>	11	NS	NS	NS	<i>Plumbago auriculata</i>	31	NS	Minérale	Minérale
<i>Cosmos atrosanguineus</i>	12	NS	NS	Minérale	<i>Rudbeckia hirta</i>	32	Minérale	Minérale	Minérale
<i>Dianthus superbus</i>	13	NS	NS	NS	<i>Sauge x jamensis</i>	33	NS	NS	Minérale
<i>Diascia barberae</i>	14	NS	NS	NS	<i>Sauge péruvienne</i>	34	NS	NS	NS
<i>Erigeron karvinskianus</i>	15	NS	NS	Minérale	<i>Scaevola aemula</i>	35	NS	NS	Minérale
<i>Euryops pectinatus</i>	16	NS	NS	NS	<i>Sedum reflexum</i>	36	NS	Minérale	X
<i>Gaura lindheimeri</i>	17	NS	NS	NS	<i>Stipa tenuifolia</i>	37	NS	NS	X
<i>Helichrysum lanatum</i>	18	NS	Minérale	Minérale	<i>Streptocarpus saxorum</i>	38	Minérale	Minérale	Minérale
<i>Heuchera</i>	19	NS	Aquaponie	Minérale	<i>Torenia x hybrida</i>	39	NS	NS	Minérale
<i>Isotoma axillaris</i>	20	NS	NS	NS	<i>Verveine x hybrida</i>	40	NS	NS	Minérale

Tableau 5 : Synthèse de l'effet de la fertilisation en fonction de l'espèce.

Espèce	N°	Qualité commerciale	Dvlp. racinaire	Indice chlorophylle	Espèce	N°	Qualité commerciale	Dvlp. racinaire	Indice chlorophylle
<i>Acalypha pendula</i>	1	Tourbe	Tourbe	Tourbe	<i>Lamium galeobdolon</i>	21	NS	NS	NS
<i>Achillea ptarnica</i>	2	NS	NS	NS	<i>Lobelia erinus</i>	22	NS	NS	NS
<i>Achyranthes carminata</i>	3	NS	NS	X	<i>Lobularia maritima</i>	23	NS	NS	NS
<i>Anagallis monelli</i>	4	NS	NS	NS	<i>Mentha suaveolens</i>	24	NS	NS	NS
<i>Argyranthemum frutescens</i>	5	NS	NS	X	<i>Némésia x hybrida</i>	25	NS	NS	Tourbe
<i>Bacopa caroliniana</i>	6	NS	NS	Sans tourbe	<i>Pelargonium x domesticum</i>	26	NS	NS	NS
<i>Bégonia x hybrida</i>	7	Sans tourbe	Sans tourbe	NS	<i>Pétunia x hybrida</i>	27	Tourbe	Tourbe	Tourbe
<i>Bidens ferulifolia</i>	8	Tourbe	NS	NS	<i>Pétunia x hybrida</i>	28	NS	NS	NS
<i>Calibrachoa x hybrida</i>	9	NS	NS	NS	<i>Phygelius capensis</i>	29	NS	NS	NS
<i>Tropaeolum majus</i>	10	Tourbe	NS	NS	<i>Plectranthus purpurea</i>	30	NS	NS	NS
<i>Cléome hassleriana</i>	11	NS	NS	NS	<i>Plumbago auriculata</i>	31	Tourbe	Sans tourbe	NS
<i>Cosmos atrosanguineus</i>	12	NS	NS	NS	<i>Rudbeckia hirta</i>	32	NS	NS	NS
<i>Dianthus superbus</i>	13	NS	Sans tourbe	NS	<i>Sauge x jamensis</i>	33	NS	NS	NS
<i>Diascia barberae</i>	14	NS	NS	NS	<i>Sauge péruvienne</i>	34	Sans tourbe	Sans tourbe	NS
<i>Erigeron karvinskianus</i>	15	NS	NS	NS	<i>Scaevola aemula</i>	35	NS	NS	NS
<i>Euryops pectinatus</i>	16	NS	NS	NS	<i>Sedum reflexum</i>	36	NS	NS	X
<i>Gaura lindheimeri</i>	17	NS	NS	NS	<i>Stipa tenuifolia</i>	37	NS	NS	X
<i>Helichrysum lanatum</i>	18	NS	NS	NS	<i>Streptocarpus saxorum</i>	38	Sans tourbe	Tourbe	NS
<i>Heuchera</i>	19	NS	Tourbe	Tourbe	<i>Torenia x hybrida</i>	39	NS	NS	NS
<i>Isotoma axillaris</i>	20	NS	NS	NS	<i>Verveine x hybrida</i>	40	NS	NS	NS

Tableau 6 : Synthèse de l'effet du substrat en fonction de l'espèce.

5.2 – Essai « Chrysanthème »

Contexte et objectifs

La production de chrysanthèmes représente un élément économique crucial pour de nombreux horticulteurs, constituant pour certains la part la plus importante de leur chiffre d'affaires annuel. Cette production s'étend de l'été jusqu'à la Toussaint, période pendant laquelle les chrysanthèmes sont particulièrement demandés. Il est donc essentiel d'évaluer la faisabilité de cette culture en fertilisation aquaponique. Deux cultivars de chrysanthèmes ont été testés, en comparant les résultats obtenus avec les deux modes de fertilisation.

Simultanément, un test d'abattement a été réalisé sur un 3^{ème} cultivar afin d'estimer la capacité de ces plantes à absorber les nutriments et donc vérifier leur disponibilité dans l'eau d'arrosage.

Modalités étudiées

1. Fertilisation : la fertilisation organique provenant du système aquaponique en comparaison à une fertilisation minérale.
2. Substrat : un substrat sans tourbe (GST) a été comparé à un substrat avec tourbe (GTCH2).

Conduite culturale

REMPOTAGE	S27 / 2023 – micro-mottes
CONTENANTS	Pot rond 12,5 cm / 0,6 L
SUBSTRAT	Tourbe (TCH2) / Sans tourbe (TCH2(ST)) – Fournisseur DUMONA
IRRIGATION	Subirrigation
FERTILISATION	<i>Aquaponie</i> : aucun complément <i>Minérale</i> : Soluplant® 8-12-40+3.3MgO + nitrate de chaux
PROTECTION SANITAIRE	PBI contre pucerons : Chrysoline (auxiliaire <i>Chrysoperla sp.</i>) PBI contre thrips : Montyline (auxiliaire <i>Ambliseius montdorensis</i>) Nutari (nourrissement des auxiliaires)
INTERVENTIONS CULTURALES	Pincements, distançage

Matériel Végétal

Espèce	Cultivar	Fournisseur
<i>Chrysanthemum morifolium</i>	'Alpha White'	Syngenta
<i>Chrysanthemum morifolium</i>	'Monza Red'	Syngenta

Résultats

Lors de cette expérimentation visant à comparer la croissance de chrysanthèmes en culture aquaponique et en fertilisation minérale, le protocole a dû être interrompu prématurément en raison d'une infestation sévère de thrips. Ces insectes, particulièrement agressifs en milieu confiné, ont rapidement proliféré sur l'ensemble des plants, provoquant des dégâts importants : déformation, décoloration des feuilles. Malgré la mise en place de mesures de lutte biologique, comme l'introduction de prédateurs naturels, l'infestation n'a pu être contenue à temps pour garantir des conditions expérimentales fiables. Cette attaque a rendu impossible toute comparaison rigoureuse entre les deux modes de culture.

Conclusion

Cette expérimentation, bien que compromise par une infestation sévère de thrips, met en évidence la fragilité des cultures en milieu confiné face aux ravageurs. L'échec du protocole souligne l'importance d'une prévention sanitaire rigoureuse pour garantir la fiabilité des essais agronomiques, en particulier dans les systèmes de culture intensifs. Ces résultats rappellent la nécessité d'anticiper les risques phytosanitaires afin de limiter les perturbations expérimentales et d'assurer des comparaisons valides entre les modes de culture.



Photo 11 : Cultures de chrysanthème infestées par le thrips avec dégâts visibles sur les feuilles

5.3 – Essai « Plantes à fleurs comestibles »

Contexte et objectifs

La diversification de la gamme de production est cruciale pour répondre aux évolutions des marchés et aux besoins des consommateurs. En horticulture, elle permet non seulement d'adapter les cultures aux tendances actuelles, mais aussi de renforcer la résilience des exploitations face aux risques sanitaires, climatiques et économiques. En intégrant des fleurs comestibles à une production aquaponique, on peut répondre à la demande croissante de produits à la fois esthétiques et nutritifs tout en optimisant l'utilisation des ressources naturelles.

Cet essai vise à évaluer une gamme de fleurs adaptées à la diversification de la production en aquaponie, en envisageant leur utilisation à des fins alimentaires. Bien que ce type de production reste encore un marché de niche dans le secteur horticole, l'aquaponie pourrait constituer un tremplin pour son développement en offrant une méthode durable et innovante pour la culture de fleurs comestibles.

Modalités étudiées

1. Espèces cultivées : 4 espèces sont évaluées (cf. « Matériel végétal »).
2. Fertilisation : la fertilisation organique provenant du système aquaponique en comparaison à une fertilisation minérale.
3. Substrat : un substrat sans tourbe (GST) comparé à un substrat avec tourbe (GTCH2).

Conduite culturale

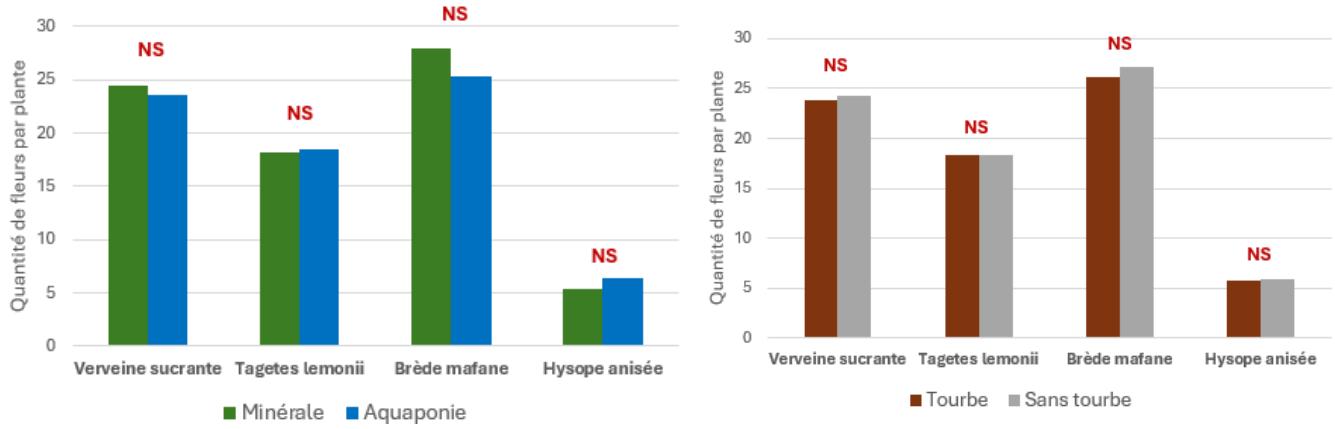
REMPOTAGE	S12 / 2024 – mottes de 3 cm Ø
CONTENANTS	Pot rond 12,5 cm / 0,6 L
SUBSTRAT	Tourbe (GTCH2) / Sans tourbe (GST) – Fournisseur DUMONA
IRRIGATION	Subirrigation
FERTILISATION	<i>Aquaponie</i> : aucun complément <i>Minérale</i> : Soluplant® 8-12-40+3.3MgO + nitrate de chaux
PROTECTION SANITAIRE	PBI contre pucerons : Chrysoline (<i>Chrysoperla sp.</i>) PBI contre thrips : Montyline (<i>Amblyseius montdorensis</i>) Nutari (nourrissage des auxiliaires)
INTERVENTIONS CULTURALES	Pincements, lâchers d'auxiliaire

Matériel végétal

N°	Nom scientifique	Nom vernaculaire	Fournisseur
1	<i>Lippia dulcis</i>	Verveine sucrante	Haberschill
2	<i>Tagetes lemonii</i> « Tangerine Marigold »	Œillet passion	Haberschill
3	<i>Spilanthes oleracea</i>	Brède Mafane	Haberschill
4	<i>Agastache foeniculum</i>	Hysope anisée	Haberschill

Résultats

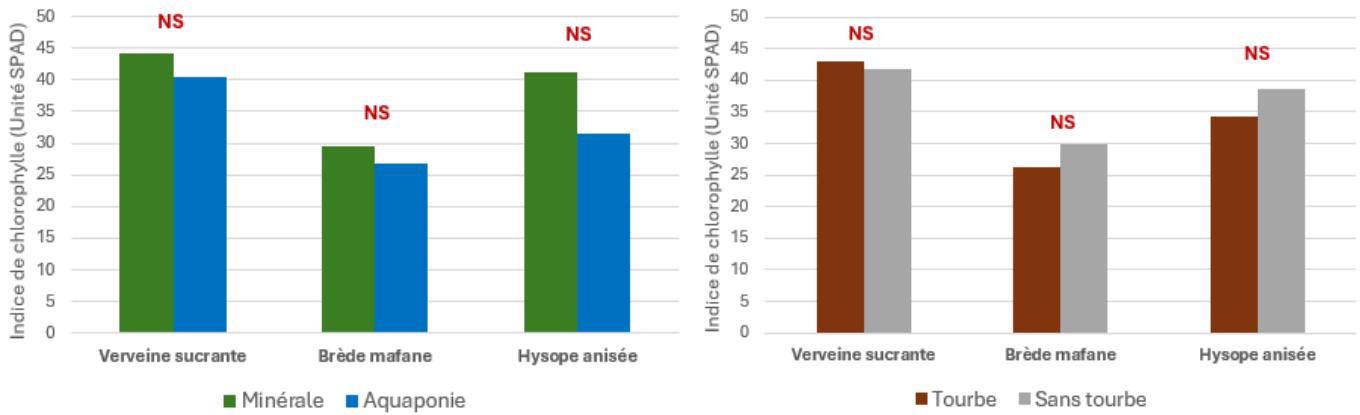
Au cours de cet essai, l'indice de chlorophylle a été suivi pour identifier des carences à l'instar de celles observées dans l'essai « Screening végétal ». Les résultats sont les suivants :



Graphique 14 : Histogramme représentant la quantité de fleurs produites en fonction de la modalité étudiée à la fin de l'essai. En fonction de la fertilisation, à gauche, et en fonction du substrat, à droite.

L'analyse statistique des résultats relatifs à l'indice de chlorophylle n'a révélé aucune différence significative entre les différentes modalités. Cela indique que les traitements appliqués n'ont pas eu d'effet mesurable sur la teneur en chlorophylle des feuilles, dans les conditions expérimentales évaluées

La quantité de fleurs produites a été évaluée. Les résultats sont les suivants :



Graphique 15 : Histogramme représentant l'indice de chlorophylle des plantes en fonction de la modalité étudiée à la fin de l'essai. En fonction de la fertilisation, à gauche, et en fonction du substrat, à droite.

Suite à l'analyse statistique des données récoltées, aucune différence significative n'a été mise en évidence quant à la quantité de fleurs produites entre les différentes modalités expérimentales. Cela suggère que, dans les conditions de culture testées, les variations entre les modalités n'ont pas eu d'impact notable sur le rendement floral. Les plantes ont été cultivées selon une densité de plantation de 30 plantes par mètre carré. Cette densité, choisie pour optimiser l'occupation de l'espace tout en assurant de bonnes conditions de croissance, permet une estimation précise de la production florale à l'échelle du mètre carré. Ainsi, pour les espèces étudiées dans le cadre de cette expérimentation, il est possible de déterminer les rendements floraux spécifiques, exprimés en quantité de fleurs ou en masse florale par mètre carré, comme suit :



Photo 12 : Verveine sucrante (*Lippia dulcis*) après 4 mois de culture
Production : 707 à 734 fleurs/m²



Photo 13 : Œillet passion (*Tagetes lemonii*) après 4 mois de culture
Production : 546 à 555 fleurs/m²



Photo 14 : Brède mafane (*Spilanthes oleracea*) après 4 mois de culture
Production : 761 à 837 fleurs/m²



Photo 15 : Hysope anisée (*Agastache foeniculum*) après 4 mois de culture
Production : 161 à 190 fleurs/m²

Conclusion

Certaines plantes à fleurs comestibles présentent un rendement comparable lorsqu'elles sont cultivées en système aquaponique ou avec une fertilisation minérale classique. Des espèces comme la verveine sucrante, l'œillet passion ou encore l'hysope anisée ont démontré leur capacité à s'adapter efficacement aux conditions de culture aquaponique, tirant partie des nutriments naturellement présents dans l'eau issue de l'élevage de poissons. Leur croissance, la qualité des fleurs et leur productivité restent similaires à celles observées avec la fertilisation minérale, tout en offrant l'avantage d'une production plus durable, sans recours aux engrains de synthèse. Cette équivalence de rendement ouvre des perspectives intéressantes pour une diversification de gamme, l'aquaponie et les circuits courts, en alliant esthétique, gastronomie et respect de l'environnement.

5.4 – Essai « Plantes d'intérêt industriel »

Contexte et objectifs

Cet essai a pour objectif d'évaluer la faisabilité et la pertinence de cultiver certaines espèces végétales dont les métabolites secondaires sont utilisés comme ingrédients actifs dans l'industrie cosmétique. Cette étude s'inscrit dans la continuité d'un programme antérieur ayant démontré que la culture hydroponique pouvait accroître le rendement en métabolites secondaires de ces plantes. Dans cette perspective, et dans une logique de diversification des productions, des expérimentations ont été menées afin de quantifier précisément ces rendements. Les analyses nécessaires ont été réalisées par l'université de Tours, au sein de son laboratoire spécialisé dans ce domaine.

Une première série de productions a été lancée en avril 2024 sur des cultures de Pavots et d'Achillées, et une seconde série au cours de l'été 2024, cette fois sur une culture de *Centella asiatica* (également connue sous le nom d'Herbe du Tigre). À cette occasion, un système de culture sur raft a été mis en place afin d'évaluer son impact sur le développement de la *Centella asiatica*, plante semi-aquatique particulièrement adaptée à ce type de dispositif. Ce système, qui permet la culture de plantes sans support solide (sans terreau), avec les racines directement immergées dans l'eau, pourrait stimuler la production de métabolites secondaires. Les résultats attendus concerteront principalement le rendement de ces espèces, tant en termes de concentration en métabolites d'intérêt.

Modalités étudiées

1. Espèces cultivées : 3 espèces sont évaluées (cf. « Matériel végétal »).
2. Fertilisation : la fertilisation organique provenant du système aquaponique en comparaison à une fertilisation minérale.
3. Substrat : un substrat sans tourbe (GST) sera comparé à un substrat avec tourbe (GTCH2).

Conduite culturale

REMPOTAGE	S12 / 2024 – Micro-mottes
CONTENANTS	Pot rond 12,5 cm / 0,6 L
SUBSTRAT	Tourbe (GTCH2) / Sans tourbe (GST) – Fournisseur DUMONA
IRRIGATION	Subirrigation
FERTILISATION	<i>Aquaponie</i> : aucun complément <i>Minérale</i> : Soluplant® 8-12-40+3.3MgO + nitrate de chaux
PROTECTION SANITAIRE	PBI contre pucerons : Chrysoline (<i>Chrysoperla sp.</i>) PBI contre thrips : Montyline (<i>Amblyseius montdorensis</i>) Nutari (nourrissage des auxiliaires)
INTERVENTIONS CULTURALES	Aucune

Matériel végétal

N°	Nom scientifique	Nom vernaculaire	Fournisseur
5	<i>Achillea millefolium</i>	Achillée millefeuille	Syngenta
6	<i>Papaver nudicaule</i>	Pavot d'Islande	Syngenta
	<i>Centella asiatica</i>	Herbe du tigre	LeaderPlant

Résultats

Le rapport technique « Profilage métabolique » est inclus en annexe. Le résumé des résultats est le suivant :

Centella asiatica

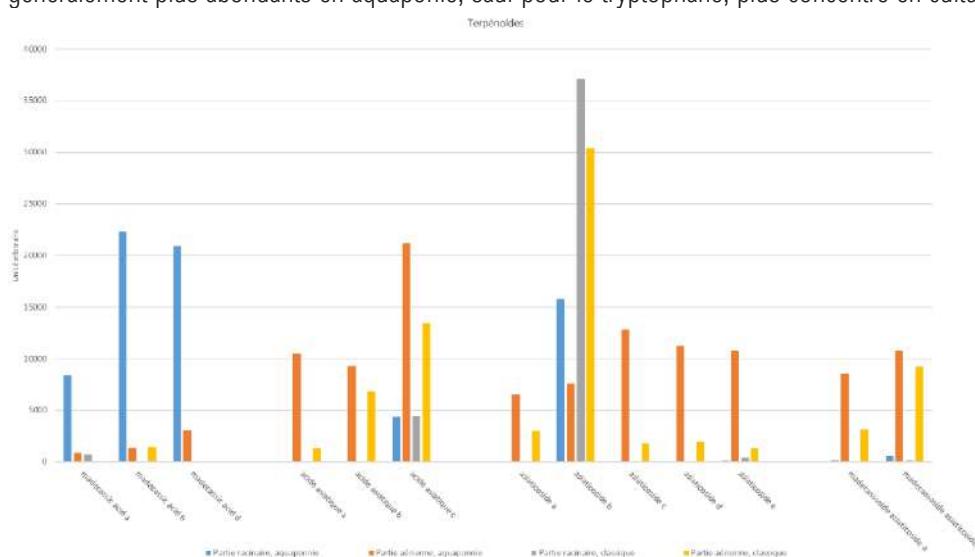
Les extraits de *Centella asiatica* contiennent majoritairement :

- Du tryptophane, utilisé en cosmétique pour ses propriétés anti-âge, apaisantes et réparatrices, et en pharmacologie pour le traitement des troubles neurologiques et inflammatoires.

- Des flavonols glycosylés, qui possèdent des vertus anti-âge, photoprotectrices et apaisantes en cosmétique, tout en contribuant à réguler la pigmentation cutanée. En pharmacologie, ils agissent comme antioxydants naturels aux effets anti-inflammatoires, cardiovasculaires et neuroprotecteurs.
- Des acides cafféoylquiniques, qui sont reconnus pour leurs propriétés antioxydantes, anti-inflammatoires, hépatoprotectrices et antimicrobiennes en pharmacologie. En cosmétique, ils offrent des effets photoprotecteurs, apaisants et régulateurs de la pigmentation, utiles dans les soins anti-âge et pour peaux sensibles.
- Des triterpènes pentacycliques (centelloïdes comme le madécassoside et l'asiaticoside), qui possèdent des propriétés anti-inflammatoires, cicatrisantes et neuroprotectrices en pharmacologie. En cosmétique, ils favorisent la réparation cutanée, la fermeté et l'apaisement, notamment dans les soins anti-âge et cicatrisants.

Les parties aériennes sont plus riches en cafféoylquinate et triterpénoïdes que les racines.

En aquaponie, les parties aériennes contiennent légèrement plus de tryptophane, quercétine-3-O-glucuronide et asiaticoside c, tandis que certains di-CQA et l'acide madécassique sont plus présents en culture classique. Dans les racines, les métabolites secondaires sont généralement plus abondants en aquaponie, sauf pour le tryptophane, plus concentré en culture classique.



Légende :

- En bleu : Parties racinaires en aquaponie
 En orange : Parties aériennes en aquaponie
 En gris : Parties racinaires en fertilisation minérale
 En jaune : Parties aériennes en fertilisation minérale

Graphique 16 : Histogramme représentant la quantité de terpénoïdes présente dans la plante *Centella asiatica* en fonction des organes et de la fertilisation utilisée.

Pour les terpénoïdes, on peut clairement identifier une modulation de la composition en fonction du système de fertilisation. En aquaponie, la production d'acides madécassiques, qui sont connus pour leurs propriétés anti-inflammatoires, antioxydantes et cicatrisantes, est largement stimulée.

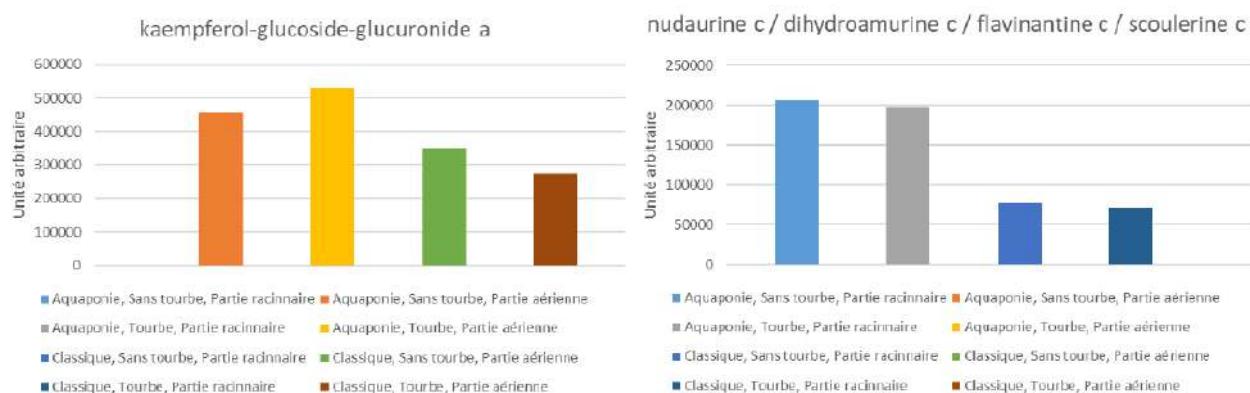
Papaver nudicaule

Les extraits de *Papaver nudicaule* contiennent majoritairement :

- 2 acides aminés : Phénylalanine et Tryptophane. La phénylalanine est un acide aminé essentiel précurseur de neurotransmetteurs, impliqué dans la régulation de l'humeur, la gestion de la douleur et les fonctions neurologiques. En cosmétique, elle participe à la synthèse de la mélanine, possède des propriétés antioxydantes et réparatrices, et est utilisée dans les soins anti-âge et cicatrisants.
- Des alcaloïdes. qui sont des composés naturels aux propriétés neuroactives, analgésiques, antimicrobiennes et cardioprotectrices en pharmacologie. En cosmétique, certains comme la caféine sont utilisés pour leurs effets stimulants, raffermissants et antioxydants.
- Des flavonols glycosylés (voir « *Centella asiatica* »).

Le mode de culture par fertilisation minérale favorise la production de l'acide aminé phénylalanine et d'un alcaloïde spécifique (cf. annexe 'Profilage métabolique »).

Le mode de culture par fertilisation aquaponique augmente la quantité de cinq molécules dont 2 alcaloïdes (c4 et c10), et 3 flavonols glycosylées (cf. annexe « Profilage métabolique »). Enfin, les modes de cultures aquaponie et sans tourbe favorisent la production d'un autre alcaloïde.



Graphique 17 : Histogramme représentant les quantités de flavonol glycosylée (à gauche) et d'alcaloïde (à droite) présentent dans la plante *Papaver nudicaule* en fonction des organes, du substrat et de la fertilisation utilisée.

Le kaempférol-glucoside-glucuronide est légèrement plus abondant dans les parties aériennes du pavot cultivé en aquaponie, tandis que l'alcaloïde est deux fois plus concentré dans les racines du pavot cultivé par ce même système. Ces résultats confirment que la fertilisation en aquaponie peut moduler et améliorer la production de métabolites secondaires.

Achillea millefolium

Les extraits de *Achillea millefolium* contiennent majoritairement :

- Des acides chlorogéniques, qui sont des antioxydants aux propriétés anti-inflammatoires, hépatoprotectrices et antimicrobiennes en pharmacologie. En cosmétique, ils offrent des effets photoprotecteurs, apaisants et régulateurs de la pigmentation.
- Des flavones, qui sont des composés polyphénoliques ayant des propriétés antioxydantes, anti-inflammatoires et anticancéreuses. En cosmétique, elles sont utilisées pour leurs effets anti-âge, protecteurs contre les UV et apaisants pour la peau.
- Des acides dicaféoylquiniques, qui sont des antioxydants puissants, avec des propriétés anti-inflammatoires, hépatoprotectrices et antimicrobiennes. En cosmétique, ils offrent des effets photoprotecteurs, apaisants et aident à réguler la pigmentation de la peau.

Les racines sont riches en acide dicaféoylquinique, dont la quantité augmente en culture aquaponique, tout comme les autres métabolites racinaires. De plus, les flavones sont absentes des racines.

Dans les parties aériennes, la plupart des composés augmentent légèrement en culture aquaponique, et l'acide dicaféoylquinique est bien plus favorisé en aquaponie.

Conclusion

La culture en aquaponie permet de moduler la production de métabolites secondaires, qui peuvent servir d'ingrédients actifs dans les produits pharmaceutiques et cosmétiques. Cette modulation favorise souvent l'augmentation de la concentration de métabolites d'intérêt, tels que les alcaloïdes et les flavonols. Toutefois, dans certains cas, une diminution de ces métabolites est observée, ce qui nécessite d'adapter les résultats en fonction des composants recherchés. Bien que de nombreux métabolites soient présents dans les racines, leur extraction reste complexe. L'utilisation d'un raft, qui immerge les racines dans l'eau sans support de culture, permet de surmonter cette difficulté. Pour *Centella asiatica*, les effets sont très variables : certains métabolites augmentent tandis que d'autres sont inhibés. Il est donc crucial de choisir l'itinéraire technique en fonction des métabolites à extraire.



Photo 16 : Culture de Pavots (à gauche), d'Achillées (au centre) et de *Centella asiatica* sur raft (à droite).

5.5 – Essai « Alternatives aux pots plastiques »

Contexte et objectifs

Les pots en plastique sont largement utilisés en horticulture pour leur légèreté et leur faible coût. Cependant, ils posent un réel problème environnemental. Souvent non recyclés en raison des matériaux utilisés, ces pots finissent incinérés ou enfouis, contribuant à la pollution et aux émissions de gaz à effet de serre. Leur fabrication repose en outre sur des ressources fossiles, accentuant leur impact écologique. Face à ces enjeux, des alternatives émergent : pots biodégradables en fibres naturelles (coco, chanvre), pots compostables ou encore systèmes de réutilisation. Encourager leur adoption est essentiel pour réduire l'empreinte environnementale du secteur horticole.

Cet essai s'inscrit dans une démarche d'amélioration de l'itinéraire technique en production horticole. Il vise à tester l'usage de pots fabriqués à partir de matériaux innovants, en alternative aux pots plastiques traditionnels. L'objectif est double : d'une part, évaluer la qualité des végétaux cultivés dans ces différents contenants, les matériaux pouvant influencer les paramètres chimiques du substrat, comme le pH ; d'autre part, analyser les propriétés mécaniques de ces pots et leur compatibilité avec les systèmes de production horticole, notamment la mécanisation et la subirrigation. Les pots testés proviennent de trois fournisseurs distincts.

Modalité étudiée

1. Poterie : 4 références de pots sans plastiques sont comparées à 2 références de pots plastiques.

N°	Référence	Composition	Fournisseur
1	Duo 12 cm 8° Bas	Plastique	Soparco
2	Duo 12 cm 5° Altereco Bio	PLA	Soparco
3	Fertilpot NT12 ++	Fibre de bois	Fertil
4	Pot 10,5 cm	Plastique	Teku
5	Pot R2 10 cm	Fibre de bois	Jiffy
6	Jiffy Pots en sphagène 10 cm	Mousse de sphagène	Jiffy

Conduite culturelle

REMPOTAGE	S12 / 2024
CONTENANTS	Cf. tableau ci-dessus
SUBSTRAT	Tourbe (GTCH2) – Fournisseur DUMONA
IRRIGATION	Subirrigation
FERTILISATION	Aquaponie : aucun complément Minérale : Soluplant® 8-12-40+3.3MgO + nitrate de chaux
PROTECTION SANITAIRE	PBI contre pucerons : Chrysoline (auxiliaire <i>Chrysoperla sp.</i>) PBI contre thrips : Montyline (auxiliaire <i>Amblisieus montdorensis</i>) Nutari (nourrisage des auxiliaires)
INTERVENTIONS CULTURALES	Pincements, espacements, lâchers d'auxiliaire

Matériel végétal

Espèce	Cultivar	Fournisseur
<i>Gaura lindheimerii</i>	'Gauriella'	Haberschill

Résultats

L'essai a été lancé au printemps 2024, et les premiers suivis ont été réalisés après deux mois de culture afin d'évaluer l'influence des matériaux des pots sur les conditions physico-chimiques du substrat.

Les résultats obtenus sont les suivants :

Pot		pH			EC (en µS)		
Diamètre	Référence	To	T+2 mois	T final	To	T+2 mois	T final
Pot 12 cm	Plastique	5,77	6,47	X	1290	1704	X
	PLA		6,69	X		1459	X
	Fibre de bois		6,58	X		1785	X
Pot 10,5 cm	Plastique	5,77	6,55	X	1290	1733	X
	Fibre de bois		6,74	X		1418	X
	Mousse de sphaigne		6,38	X		2450	X

Les analyses concernant l'impact des pots sur le pH du substrat n'ont pas révélé de différence marquée entre les différentes modalités testées et le témoin en plastique. En revanche, une augmentation significative de l'électroconductivité (EC) a été observée dans les pots en mousse de sphaigne, avec une valeur doublée par rapport au T0 après deux mois de culture.

L'électroconductivité est un indicateur de la concentration en sels dissous dans le substrat, notamment les éléments nutritifs tels que les nitrates, phosphates, potassium, etc. Une hausse de l'EC peut être liée à une libération de sels minéraux par le matériau du pot lui-même ou à une concentration excessive due à une rétention d'eau inadaptée. Des niveaux trop élevés d'EC peuvent induire un stress osmotique chez les plantes, perturbant l'absorption de l'eau et des nutriments, ce qui peut impacter leur développement.

Cette observation suggère que les pots en mousse de sphaigne peuvent modifier la dynamique du substrat au fil du temps, et qu'il est nécessaire d'adapter la gestion de la fertilisation ou de l'irrigation pour éviter un déséquilibre néfaste à la croissance des végétaux.

Les pots testés n'ont pas montrés de signe d'affaissement ou de dégradation sur la période de l'essai.

Au mois de mai, les cultures ont été sévèrement touchées par une attaque d'oïdium, entraînant un affaiblissement rapide des plantes. En raison de la progression de la maladie, l'essai a dû être interrompu prématièrement, ce qui a rendu la collecte de données incomplète.

Conclusion

Les résultats montrent que le type de pot n'a pas eu d'effet notable sur le pH du substrat, mais que les pots en mousse de sphaigne ont entraîné une augmentation significative de l'électroconductivité, pouvant affecter l'équilibre nutritif des plantes. Cette observation souligne la nécessité d'adapter la gestion de la fertilisation et de l'irrigation pour éviter un stress osmotique. Toutefois, l'essai a été interrompu prématièrement en raison d'une attaque sévère d'oïdium, limitant ainsi la collecte de données et l'interprétation des résultats sur le long terme.



Photo 17 : Pots testés lors de l'essai. A gauche, les pots témoins en plastique ; au milieu et à droite, les pots alternatifs sans plastique (cf. « Conduite culturale » pour la référence des pots).

5.6 – Essai « Jeunes plants de pépinière »

Contexte et objectifs

L'essai a évalué la faisabilité d'une production de plants ligneux avec une fertilisation organique issues du système aquaponique. Jusqu'à aujourd'hui, les expérimentations ont été effectuées sur des espèces dont la période de culture n'excédait pas 4 à 5 mois. Cet essai a donc deux fonctions : évaluer la faisabilité, d'une part, et observer la capacité de la fertilisation organique à subvenir aux besoins nutritionnels d'une culture sur le long terme (ici environ 8 à 9 mois).

Modalités étudiées

1. Espèces cultivées : 10 espèces ligneuses sont évaluées.
2. Fertilisation : la fertilisation organique provenant du système aquaponique en comparaison à une fertilisation minérale.
3. Substrat : un substrat sans tourbe (GST) comparé à un substrat avec tourbe (GTCH2).

Conduite culturale

REMPOTAGE	S16 / 2024
CONTENANTS	Pot rond 12,5 cm / 0,6 L
SUBSTRAT	Tourbe (GTCH2) / Sans tourbe (GST) – Fournisseur DUMONA
IRRIGATION	Subirrigation
FERTILISATION	<i>Aquaponie</i> : aucun complément <i>Minérale</i> : Soluplant® 8-12-40+3,3MgO + nitrate de chaux
PROTECTION SANITAIRE	PBI contre pucerons : Chrysoline (auxiliaire <i>Chrysoperla sp.</i>) PBI contre thrips : Montyline (auxiliaire <i>Amblisieus montdorensis</i>) Nutari (nourrissage des auxiliaires)
INTERVENTIONS CULTURALES	Pincements, distançage

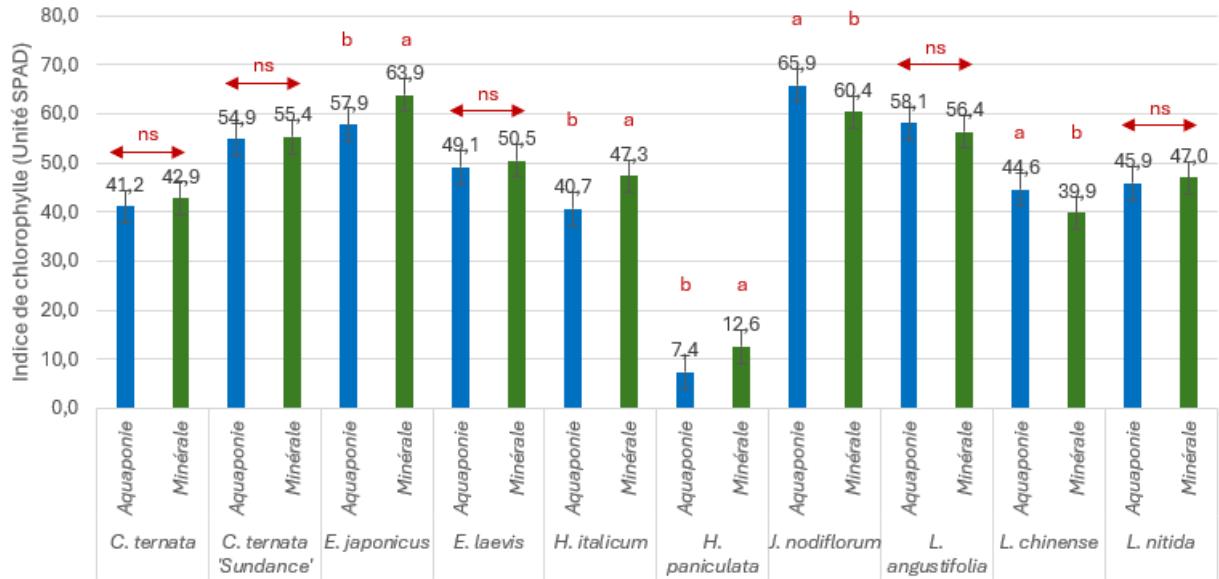
Matériel végétal

N°	Nom scientifique	Nom vernaculaire	Cultivar	Fournisseur
1	<i>Choisya ternata</i>	Oranger du Mexique	/	Astredhor
2	<i>Choisya ternata</i>	Oranger du Mexique	'Sundance'	Astredhor
3	<i>Lavandula angustifolia</i>	Lavande	/	Astredhor
4	<i>Lonicera nitida</i>	Chèvrefeuille	'Angelii'	Pépinière La Forêt
5	<i>Jasminum nudiflorum</i>	Jasmin d'hiver	/	Pépinière La Forêt
6	<i>Euonymus japonicus</i>	Fusain du Japon	'Benkomazaki'	Pépinière La Forêt
7	<i>Escallonia laevis</i>	Escallonia	'Pink Elle'	Pépinière La Forêt
8	<i>Helichrysum italicum</i>	Immortelle d'Italie	'Weisses Wonder'	Pépinière La Forêt
9	<i>Hydrangea paniculata</i>	Hortensia	'Sunlight'	Pépinière La Forêt
10	<i>Loropetalum chinense</i>	Loropétale de Chine	'Pipa's Red'	Pépinière La Forêt

Résultats

L'objectif était d'évaluer si la durée prolongée d'une culture pouvait poser un problème dans un système en aquaponie. En effet, les cultures de vivaces et d'annuelles s'étendent sur une période de 3 à 5 mois, et l'une des hypothèses concernant l'efficacité de la fertilisation était que le substrat utilisé pouvait suffire à assurer une production de qualité. Afin de déterminer si la fertilisation aquaponique joue un rôle essentiel dans la croissance des plantes, il était nécessaire de vérifier si celles-ci pouvaient se maintenir sur le long terme, même après l'épuisement des réserves du substrat.

Pour mesurer cet impact, l'indice de chlorophylle a été analysé pour chaque modalité, permettant ainsi d'identifier d'éventuelles limites à la fertilisation aquaponique.



Graphique 18 : Histogramme représentant l'indice de chlorophylle pour les jeunes plants en fonction de la modalité de fertilisation.

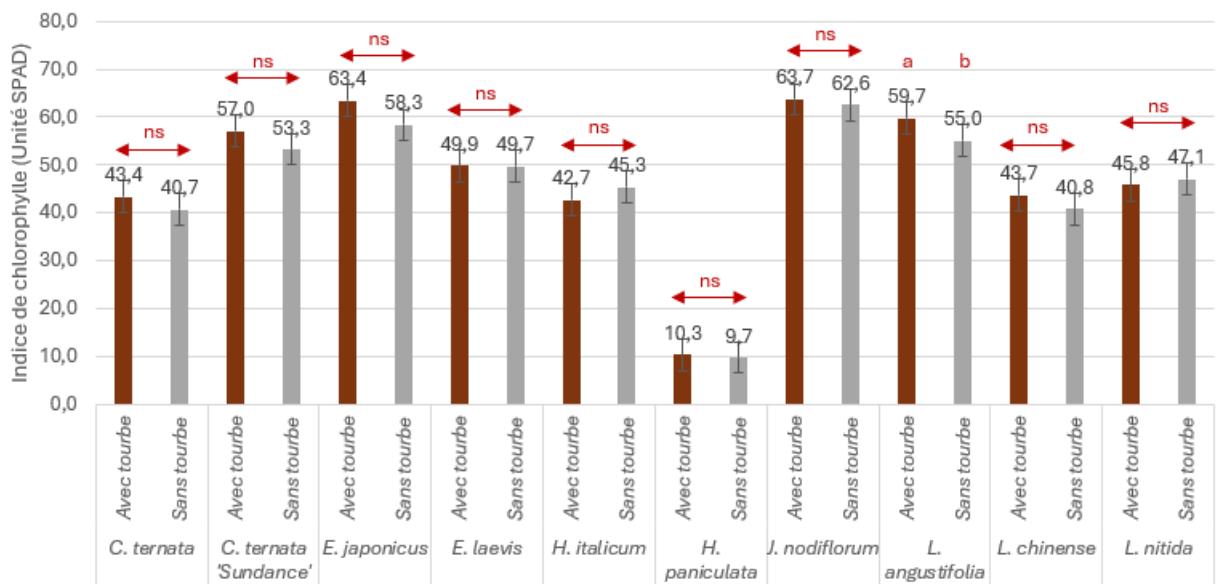
Les résultats montrent que, pour la moitié des espèces étudiées, l'indice de chlorophylle ne semble pas affecté par le mode de fertilisation. Cela suggère que le système aquaponique assure une fertilisation suffisante sur le long terme pour ces plantes, confortant ainsi l'hypothèse d'une fertilisation pérenne.

Cependant, des différences significatives ont été observées pour l'autre moitié des espèces. En particulier, le Fusain du Japon (*Euonymus japonicus*), l'Escallonia (*Escallonia laevis*) et l'Hortensia (*Hydrangea paniculata*) présentent un indice de chlorophylle plus élevé sous fertilisation minérale qu'en aquaponie, ce qui suggère une possible carence nutritionnelle dans ce dernier système.

À l'inverse, le Jasmin (*Jasminum nodiflorum*) et le Loropétale de Chine (*Loropetalum chinense*) affichent un indice de chlorophylle supérieur en aquaponie, indiquant que ce mode de fertilisation leur est plus favorable.

Ces résultats ne permettent donc pas de conclure à une équivalence globale entre la fertilisation minérale et aquaponique. Ils suggèrent plutôt que l'efficacité de la fertilisation dépend fortement des espèces cultivées.

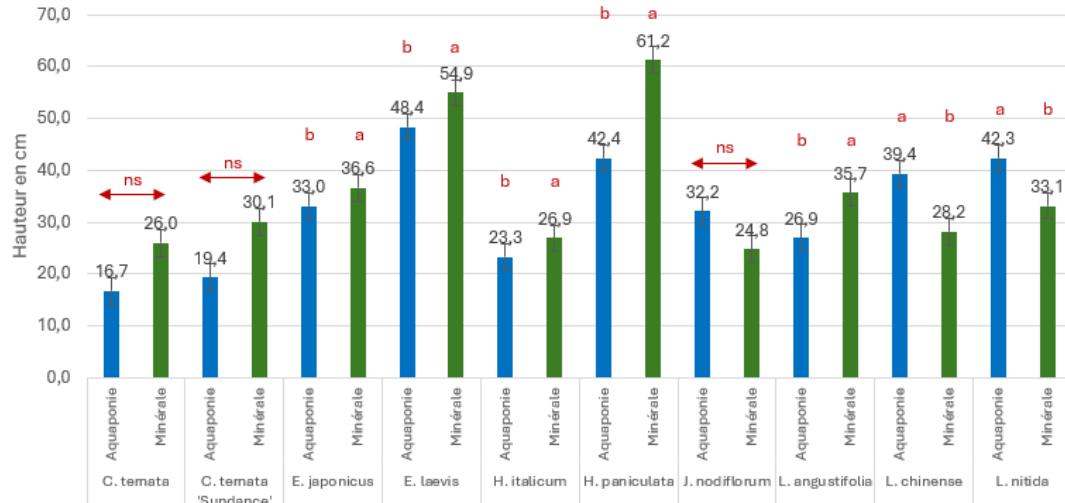
L'impact du substrat a également été évalué. Les résultats sont les suivants :



Graphique 19 : Histogramme représentant l'indice de chlorophylle pour les jeunes plants en fonction de la modalité de substrat.

L'idée était de valider l'hypothèse que la fertilisation présente à la base dans la composition du substrat n'influencait pas les résultats. Seule une espèce a démontré des résultats significativement différents : la Lavande (*Lavandula angustifolia*). Cela ne permet de conclure à un impact du substrat sur ce paramètre. On peut cependant conforter l'hypothèse que, dans le cadre de cet essai, le substrat n'affecte pas les résultats sur la nutrition des plantes.

La production de jeunes plants de pépinière sous serre optimise leur enracinement et leur croissance. Une première année en serre permet d'obtenir des plants et des boutures de meilleure qualité en un temps réduit. Dans le cadre de l'aquaponie, l'objectif est d'évaluer si ce mode de culture peut accélérer cette phase de production ou, à minima, offrir une croissance équivalente à celle permise par les engrains minéraux. Les résultats sont les suivants :

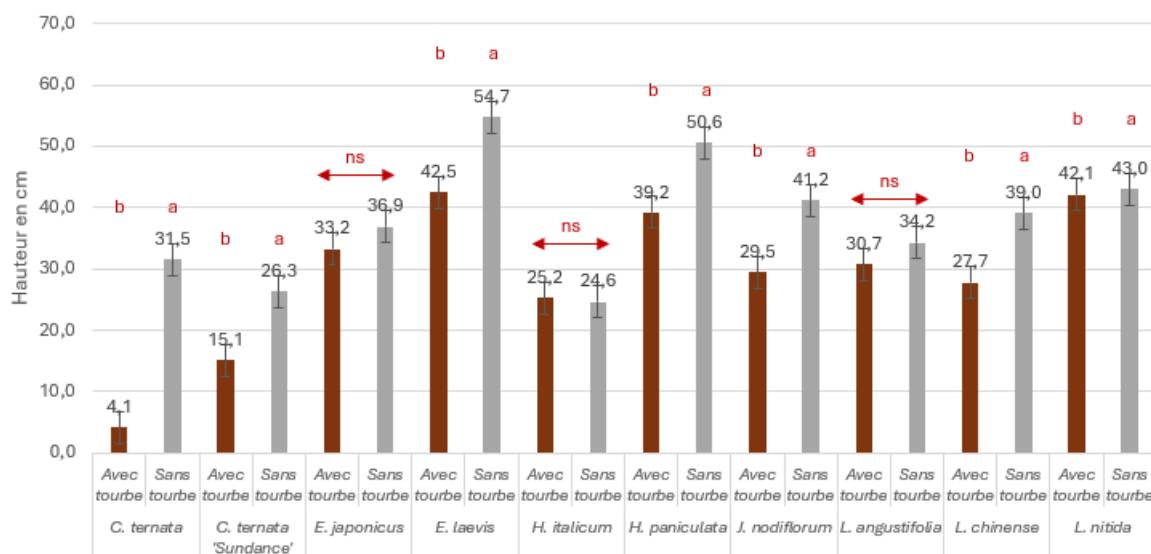


Graphique 20 : Histogramme représentant la hauteur des jeunes plants en fonction de la modalité de fertilisation.

Dans 7 cas sur 10, des différences significatives sont observées entre les deux systèmes de fertilisation. Pour le Fusain du Japon (*Euonymus japonicus*), l'Escallonia (*Escallonia laevis*), l'Immortelle d'Italie (*Helichrysum italicum*), l'Hortensia (*Hydrangea paniculata*) et la Lavande (*Lavandula angustifolia*), la fertilisation minérale favorise une croissance plus importante, avec des plantes mesurant entre 3 et 10 cm de plus, et jusqu'à 20 cm pour l'Hortensia.

À l'inverse, le Loropétale de Chine (*Loropetalum chinense*) et le Chèvrefeuille (*Lonicera nitida*) affichent une croissance supérieure en aquaponie, avec un gain moyen de 10 cm par rapport aux plantes cultivées en fertilisation minérale.

Ces résultats ne permettent pas de conclure à une équivalence générale entre les deux modes de fertilisation. Ils suggèrent plutôt que leur efficacité dépend largement des espèces cultivées.



Graphique 21 : Histogramme représentant hauteurs des jeunes plants en fonction de la modalité de substrat.

Une dernière évaluation a été réalisée pour évaluer l'impact du substrat sur la vitesse de croissance des plants. Les résultats montrent des différences très marquées entre les substrats. Pour 7 des 10 espèces testées, la croissance des plants cultivés dans un substrat sans tourbe est non seulement supérieure, mais parfois bien plus importante. Les écarts les plus significatifs concernent l'Oranger du Mexique (*Choisya ternata*), l'Escallonia (*Escallonia laevis*), l'Hortensia (*Hydrangea paniculata*), le Jasmin (*Jasminum nudiflorum*) et le Loropétale de Chine (*Loropetalum chinense*), avec des différences de hauteur moyenne allant de 11 à 27 cm selon l'espèce.

On peut donc largement conforter l'hypothèse que le substrat sans tourbe a un effet sur la croissance de la plante et qu'il permet de l'accroître de manière significative sur les espèces testées.

Conclusion

Cette étude démontre que l'efficacité de la fertilisation aquaponique et des substrats varie en fonction des espèces cultivées. Si pour certaines, l'aquaponie assure une fertilisation adéquate sur le long terme, d'autres bénéficient davantage d'une fertilisation minérale, suggérant une dépendance spécifique des plantes au mode de fertilisation. De plus, l'impact du substrat sur la croissance des plants est significatif, notamment pour les espèces cultivées dans un substrat sans tourbe, qui ont montré une croissance nettement supérieure. Ces résultats confirment l'importance d'adapter les systèmes de culture et les substrats en fonction des besoins spécifiques des plantes pour optimiser leur développement.



Photo 18 : Essai « Jeunes plants de pépinière ».

■ 6. Etude technico-économique du pilote

6.1 – Conception d'un outil pour l'évaluation des coûts de production et estimer la rentabilité du système

L'un des objectifs principaux de ce programme est de réaliser une étude économique de la production en aquaponie, notamment en comparant les coûts de production de ce système avec ceux d'une production horticole classique.

La compensation de l'énergie, de l'eau et de l'aliment utilisés pour l'élevage des poissons ainsi que le temps dédié à sa gestion doivent pouvoir être compensés par le coût de revient de la biomasse produite. Cette condition est indispensable au développement de cette association plantes-poissons novatrice.

Pour cela, différentes espèces (poissons rouges *Carassius auratus* et carpes koï *Cyprinus carpio carpio*) ont été élevés dans différentes conditions (élevage mixte ou mono spécifique) et à différentes densités. L'espèce présentant le meilleur intérêt économique et les meilleures performances de croissance et de survie a été identifié : la carpe koï en élevage mono spécifique à des densités autour de 15 kg/m³.

6.2 – Description de l'outil de calcul des coûts

L'outil de calcul des coûts a été développé sous Excel. Il permet de :

1. Calculer les coûts associés à une production de plantes en pot (finement par série, ou de façon plus grossière) ;
2. Calculer de façon simplifiée le coût de fonctionnement d'une production aquacole ;
3. Dresser un bilan annuel du module aquaponique décrit en termes de charges, recettes et excédent brut d'exploitation.

Cet outil a plusieurs limites dont l'utilisateur doit être bien conscient :

Il suppose le fonctionnement d'un système aquaponique en modèle ouvert, comme à Fauville en Caux (pas de circularité de l'eau d'arrosage), avec des productions en pot sur tablettes ;

L'estimation des charges liées à la production de poissons est simplifiée et moyennée sur une année.

Seule une partie des charges est estimée. Les résultats ne sont pas des coûts de production complets. Par ailleurs, l'outil ne permet pas d'estimer des charges liées à la commercialisation des produits.

L'outil ne présume pas de l'efficacité du système, c'est-à-dire de la capacité des plantes à capter les taux de nutriment dans les eaux d'arrosage. Il ne permet pas de juger si le ratio entre les surfaces plantées et le volume d'élevage est équilibré.

En perspective : cet outil nécessiterait d'être développé pour accompagner les professionnels dans l'optimisation de leur système aquaponique en intégrant pour différentes espèces horticoles et conditions de culture leur capacité d'abattement des nutriments (RASV : ratio aliment / surface végétalisée). Ces informations ne sont pas encore disponibles.

6.3 – Coûts de production et bilan annuel du système aquaponique : résultats

Pour estimer les coûts de production et dresser un bilan annuel des charges et recettes espérées d'un système aquaponique équivalent à celui de Fauville en Caux, nous avons :

Modélisé un itinéraire de production type annuel pour les plantes, triannuel pour les poissons ;

1. Fait des choix méthodologiques dans le calcul des charges ;
2. Estimé les charges en production de plantes ;
3. Estimé le coût de fonctionnement du système aquacole ;
4. Pour enfin conclure sur l'équilibre annuel du système aquaponique.

Les résultats sont présentés ci-dessous :

1/ Modélisation de l'itinéraire technique de production à partir de l'atelier de Fauville en Caux

Sur une année calendaire, l'élevage de poisson fonctionne en continu. De mars à octobre les eaux chargées sont utilisées pour arroser les cultures horticoles. Deux séries de plantes sont produites successivement : des annuelles de printemps puis des vivaces en pot de 10,5 cm. (Figure 1)

Le dispositif aquaponique installé sous serre compte trois bassins d'élevage d'un volume d'un mètre cube chacun, couplés à des tablettes d'une surface de 50 m². L'eau issue de l'élevage aquacole et chargée en effluents est envoyée sans retour vers le système horticole, puis elle est rejetée après avoir arrosé les plantes. Ce découplage plantes/poissons est lié au matériel et au mode d'arrosage des plantes par subirrigation sur tablettes.

Les serres où est installé le système aquaponique sont chauffées d'octobre à mai.

Notons que sur l'exploitation de Fauville, d'autres productions horticoles sont réalisées, sans couplage avec le module aquaponique - ce qui a des conséquences sur le calcul des coûts.

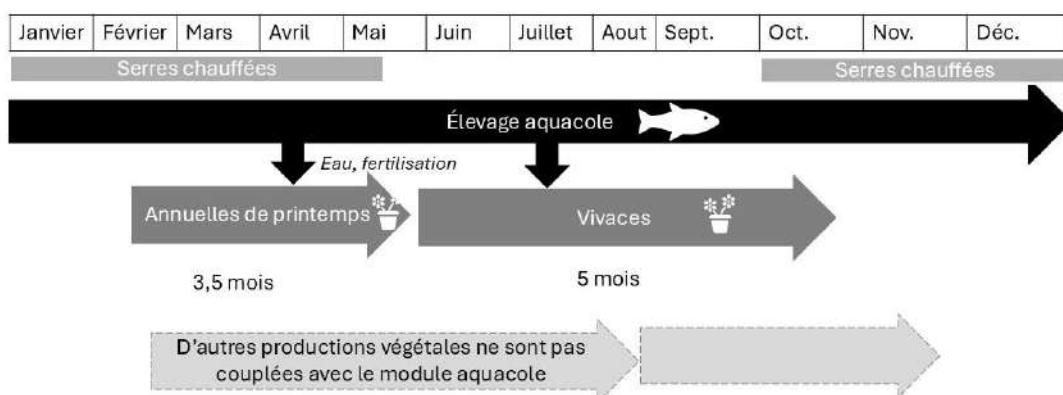


Figure 1 : Calendrier de production du système aquaponique

2/ Un choix méthodologique : le calcul de coûts partiels

Pour faciliter les calculs et permettre la comparaison entre les systèmes, nous avons fait les choix méthodologiques suivants :

Nous ne calculons pas de coût de production complet. *En effet, les charges que nous calculons ici ne prennent pas en compte les charges indirectes telles que les frais financiers, l'entretien des serres par exemple.*

Les charges liées à la commercialisation des produits ne sont pas considérées. De ce fait, nous ne calculons pas une marge commerciale mais une marge sur coûts directs (Figure 2).

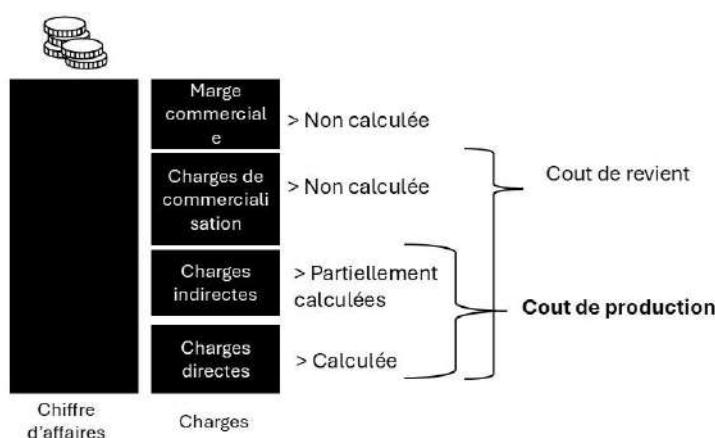


Figure 2 : Schéma explicatif des charges directes, indirectes, charges de commercialisation et marges

Par ailleurs, nous attirons l'attention du lecteur sur le fait que les résultats reflètent la situation des prix au moment de la rédaction du document.

Définitions :

Charges opérationnelles : charges qui varient en fonction du nombre d'unités produites (plants, pots, substrat) – au contraire des charges fixes ou de structure (entretien du matériel, fermage, assurances...).

Charges directes : charges que l'on peut directement affecter à une culture ou à une production (par exemple plants, pots, substrats, eau consommée par l'élevage piscicole) - au contraire des charges indirectes (chauffage des serres par exemple).

Excédent brut d'exploitation (EBE) : ressource économique dégagée par l'activité courante de l'entreprise (=produits moins les charges opérationnelles, les charges fixes et la main-d'œuvre). Elle traduit la capacité de l'entreprise à gagner de l'argent pour rembourser les emprunts, rémunérer les dirigeants, autofinancer les investissements et consolider sa trésorerie.

3/ Quelles sont les charges opérationnelles en production de plantes ?

Dans notre modèle, les plantes sont cultivées sur tablettes à raison de 30 pots par m² pendant 3,5 mois pour les annuelles et cinq mois pour les vivaces. Elles sont produites à partir de micro-mottes rempotées en pot de 10,5 cm. Les cultures de printemps sont chauffées à plus de 15°C durant 60 jours.

Pour une série occupant 50 m² et cultivée sur 3 mois, un temps de travail de 5 heures a été enregistré. Attention : il exclut la préparation des ventes et l'entretien de l'élevage aquacole – traité plus bas. Plusieurs apports d'auxiliaires de culture ont été réalisés, mais aucun traitement phytosanitaire.

Les charges opérationnelles pour la culture de printemps – hors eau et fertilisation – s'élèvent à 0,88 euros par plant mis en culture pour les plantes annuelles. Pour la culture de vivaces, elles s'élèvent à 0,92 euros par plant mis en culture, le temps de travail étant plus long (voir figure 3 ci-dessous).

Charges opérationnelles liées à la production de plantes, en €/plant mis en culture

hors fertilisation et arrosage

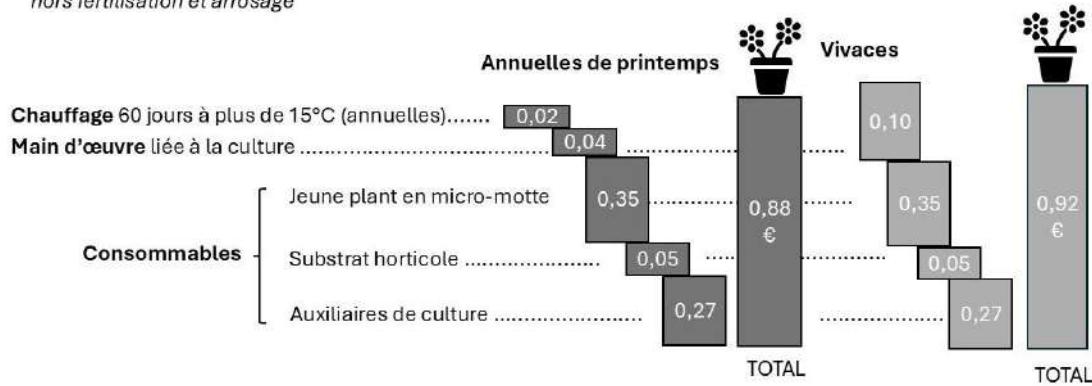


Figure 3 : Charges opérationnelles liées à la production de vivaces (par plant mis en culture)

Attention il ne s'agit pas d'un coût de production ! Les charges calculées ici ne prennent pas en compte les charges indirectes (frais financiers, entretien des serres, etc.) ni les pertes techniques.

Les coûts de l'eau et de la fertilisation sont estimés à partir du coût de fonctionnement de l'élevage aquacole.

Dans un système de culture conventionnel équivalent, nous estimons que les charges de fertilisation minérale s'élèveraient à 0,01 € par pot mis en culture, donc une charge très faible (les charges en eau sont négligées). L'intérêt du système aquaponique ne repose donc pas tant sur l'économie réalisée sur la fertilisation minérale mais sur la complémentarité entre les deux ateliers.

4/ quelles sont les charges opérationnelles en production aquacole ?

Le pilote de Fauville-en-Caux est un élevage monospécifique de carpes koï, ayant une croissance saisonnière atteignant son optimum à 26°C. C'est donc en été que leur croissance est la plus forte, que les carpes ont le plus fort besoin en aliments et que les effluents sont les plus concentrés. C'est à cette période de l'année qu'il est intéressant de coupler l'élevage avec la production horticole.

Nous avons estimé les charges liées au fonctionnement de l'élevage lissées sur trois années, depuis l'apport des alevins (1500 individus) à la vente de l'intégralité du lot (figure 4 ci-dessous).

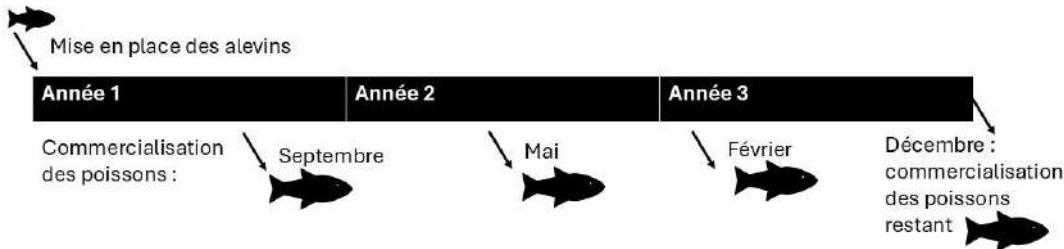


Figure 4 : Calendrier de production aquacole

Les charges de fonctionnement annuelles sont estimées à partir des paramètres suivants :

- la consommation en électricité d'une pompe de recirculation, deux bulleurs et un nourrisseur ;
- la consommation en eau pour l'alimentation quotidienne des bassins et le nettoyage régulier des filtres soit en moyenne 0,23 m³ par jour ;
- l'apport d'aliments (granulés extrudés, produits en France) : en moyenne 0,6 kg par jour ;
- un tiers des alevins apportés au démarrage de l'élevage (le lot étant sorti au bout de 3 ans) ;
- le temps de travail lié au suivi et à l'entretien de l'élevage aquacole : routine, nourrissage, nettoyage et sortie des poissons pour la vente. Il est estimé à 0,8 jour par mois en moyenne. Le coût du travail horaire choisi est le même qu'en horticulture.

L'ensemble des charges de fonctionnement rapportées à une journée s'élèvent à 10 euros par jour de fonctionnement, le temps de travail représentant un tiers des charges.

**Charges opérationnelles liées au fonctionnement de l'élevage aquacole
en € / jour (lissé sur trois années)**

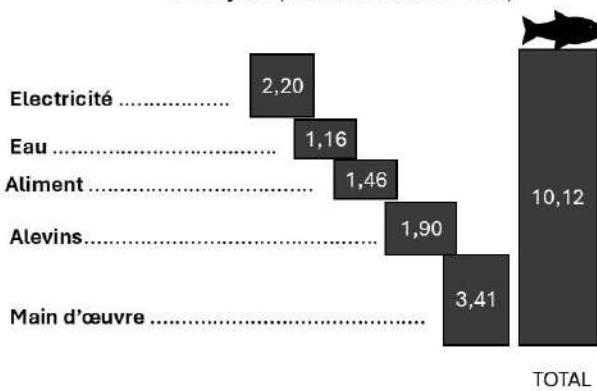


Figure 4 : Charges directes liées au fonctionnement de l'élevage aquacole (par jour)

5/ Bilan annuel du système aquaponique

Note importante : à l'échelle du module expérimental, le système piscicole de 3 m³ est correctement dimensionné au vu des volumes d'élevage, mais il est surdimensionné par rapport aux surfaces 50 m² de SAU du dispositif (une analyse des minéraux captés par les

plantes nous laisse penser que les effluents produits par les bassins d'élevage pourraient fertiliser une surface a priori beaucoup plus grande de plantes horticoles).

En conséquence, le bilan calculé ici est réalisé en considérant une surface théorique de SAU de 200 m².

Pour réaliser le bilan annuel du système aquaponique, les charges opérationnelles annuelles du système aquaponique sont comparées aux chiffres d'affaires générés :

En production de plantes : nous faisons l'hypothèse d'un prix de vente à 2,40€ par plante, avec un taux de perte en culture de 8%.

Pour l'élevage aquacole : plus les poissons sont longs et plus ils ont de la valeur. Le chiffre d'affaires est estimé sur trois ans à partir des biométries réalisées sur le pilote de Fauville-en-Caux et lissé sur une année moyenne.

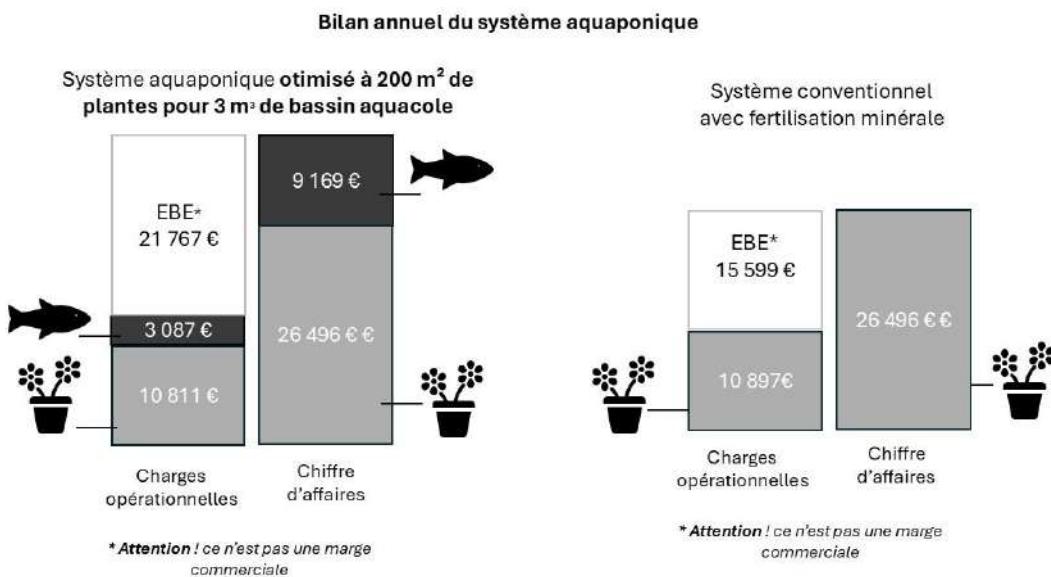


Figure 5 : bilan annuel des charges opérationnelles et du chiffre d'affaires

Dans le système optimisé, 78 % des charges opérationnelles sont portées par les plantes et 22 % par l'élevage aquacole, et on retrouve ce même ratio pour les chiffres d'affaires (26 % pour la commercialisation des poissons et 74 % pour les plantes). Par rapport à un système conventionnel, l'excédent brut d'exploitation (EBE) est multiplié par 1,4. Avec ce dimensionnement, l'apport d'un atelier piscicole est intéressant pour l'horticulteur, permettant de dégager un EBE supplémentaire par rapport à un système conventionnel.

On peut noter que le passage d'un système conventionnel à un système aquaponique n'a donc pas d'influence sur les performances de l'activité horticole.

Pour un horticulteur, l'aquaponie semble être une solution viable pour diversifier son activité et générer de nouveaux revenus. Pour de petites surfaces à ferti-irriguer (inférieures à 200 m² de SAU), la quantité de poissons en élevage reste faible par rapport à une structure à 100% aquacole. En choisissant des espèces piscicoles fortement valorisables et résilientes (tels les cyprinidés) : la technicité, le temps à passer et les risques diminuent. L'horticulteur en diversification garde ainsi une large dominante horticole, et s'appuie sur un système piscicole nécessitant le moins d'interventions possible.

Ces éléments sont présentés dans une synthèse destinée aux professionnels, accompagnés de conseils pour optimiser le système.

■ 7. Transfert et valorisation

7.1 – Valorisation du pilote d'aquaponie en tant que structure pédagogique

Depuis la mise en place du pilote d'aquaponie, les différentes formations se succèdent pour y intervenir. Du CAPA métiers de l'agriculture option productions horticoles aux BTS métiers du végétal, les jeunes en formation ainsi que des adultes en reconversion sont dans un premier temps, sensibilisés à cette technique de production avant d'y faire ensuite des interventions simples de suivi du bon fonctionnement, d'entretien courant pour la partie aquaculture ainsi que de l'entretien des cultures pour le second volet de l'aquaponie.

Plusieurs classes sont également intervenues dans le cadre de la mise en place du raft.

Les étudiants ont eu l'opportunité de participer activement à chaque étape du projet, de la conception à la mise en œuvre. Ils ont appris à gérer les aspects techniques tels que l'hydraulique et la gestion de l'espace, tout en acquérant des compétences pratiques en terrassement et en mise en eau. Ces expériences leur ont permis de comprendre les défis de l'aquaponie et de l'hydroponie, des méthodes de production durables qui combinent l'aquaculture et l'horticulture.

Sur la durée du projet, plus de 150 jeunes, tous niveaux confondus, ont ainsi pu se familiariser avec cette méthode de production. Compte tenu de l'intérêt pour cette technique et de l'expérience que nous avons accumulé au fil du projet, nous menons actuellement une réflexion pour proposer la mise en place d'une formation d'initiation à la technique de l'aquaponie. Cette formation d'initiation envisagée, visera à approfondir les connaissances sur l'hydraulique, la gestion de l'espace, les besoins des plantes et des poissons pour ainsi être capables de maîtriser cette technique innovante.

Le CFA organise par ailleurs chaque année, une journée de découverte de l'établissement à destination du grand public. À cette occasion, des visites et présentations du pilote sont organisées pour vulgariser cette pratique auprès d'amateurs. Sur l'édition 2024, plus de 200 personnes ont profité de ces visites.

Celles-ci contribuent également à sensibiliser le grand public à l'importance de l'aquaponie dans le contexte actuel de durabilité et de sécurité alimentaire. Ces journées sont l'occasion pour les visiteurs de voir de près le fonctionnement du pilote, de poser des questions et de comprendre les bénéfices environnementaux et économiques de cette pratique. Les retours positifs des participants encouragent le CFA à poursuivre ses efforts pour promouvoir l'aquaponie et à développer de nouvelles initiatives pour former les jeunes à cette technique prometteuse

7.2 – Valorisation auprès des acteurs du territoires

Comité de pilotage n°1 du projet OPTIMAH – 20 juin 2023 à Terres-de-Caux

Le 20 juin 2023 a eu lieu le Comité de Pilotage pour le lancement du programme OPTIMAH au sein du CFA NaturaPôle de Terre-de-Caux (76). Lors de celui-ci, ont été conviés les adhérents des deux instituts techniques agricoles (ASTREDHOR et ITAVI), l'ensemble des structures d'enseignement agricoles normandes ainsi que les représentants de la Région Normandie.

Parmi les participants, toutes les filières ont été représentées, aussi bien celle de l'horticulture, de la pisciculture que celle de l'aquaponie. Au programme, une présentation de la filière Piscicole par l'animateur du Syndicat des Pisciculteurs de Normandie et de d'Île-de-France (SPN-IDF), Marc Roze ; une présentation de la filière Aquaponie par le vice-président de la Fédération Française de l'Aquaponie (FFDA), Christian Pichenot ; suivi de la présentation des travaux déjà menés et de ceux à venir lors du projet OPTIMAH et un temps d'échange avec les participants.

Les échanges ont été nombreux, notamment autour de la législation sur les fermes aquaponiques.

Reportage France 3 Baie de Seine – Edition du 15 juillet 2023

Lors du Comité de pilotage n°1, une équipe de France 3 Baie de Seine est venue tourner un reportage sur l'aquaponie et a mis en lumière le projet. Ce dernier a permis de vulgariser pour un plus large public le principe général de l'aquaponie et ses atouts pour une production plus responsable.

Rencontres Normandes de la Bioéconomie – 9 novembre 2023 à l'UFR Sciences et techniques de l'Université de Rouen

La deuxième édition de ces rencontres avait pour but la présentation et l'échange autour de la stratégie de développement des filières de la bioéconomie en région Normandie et les projets en cours. L'ITAVI a participé à l'atelier : « Bioéconomie bleue : Production circulaire de biomasses aquatiques – focus Aquaponie », organisé par le pôle Aquimer. Durant cette session, plusieurs intervenant présentaient : M. Pascal Goumain (AMP / Saumon de France), M. Marc Roze (Syndicat des pisciculteurs de Normandie), M. Virgile Basuyau (ITAVI) avec un focus diversification par l'activité aquaponique et une présentation du projet OPTIMAH. Des représentants de la chambre d'agriculture de Normandie et d'instituts de recherche aquacole étaient également présents. Une restitution de échanges de cet atelier a été fait en plénière à destination des étudiants, membres de l'administration, scientifiques et enseignants présents à cette journée.

Comité de Pilotage n°2 de l'UMT Durabilité des Fermes Urbaines Professionnelles – 26 mars 2024 à Paris

Le programme OPTIMAH et ses avancées ont été présentés lors du Comité de Pilotage de l'UMT FUP le 26 mars 2024. Cet évènement a regroupé de nombreux acteurs de la recherche scientifique tel que l'INRAE et le CEREMA, des instituts techniques agricoles, des

représentants de la DRAAF, des Chambres d'Agriculture ainsi que des agriculteurs urbains implantés sur le territoire parisien. Lors de ce CoPil, de nombreux échanges ont eu lieu sur les faisabilités techniques d'une structure en aquaponie en milieu urbain.

8èmes Journées de la Recherche Piscicole – 2 et 3 juillet 2024 à Rennes.

Tous les deux ans sont organisés par l'ITAVI deux journées d'échange et de présentation autour de la recherche dans le domaine piscicole. L'ITAVI et ASTREDHOR ont préparé pour cet évènement une présentation du projet, ses premiers résultats et perspectives ainsi que la production d'un poster. Ces interventions ont eu lieu le 2 juillet 2024 dans le cadre de la thématique « Environnement et Systèmes d'élevage : pisciculture d'étang, aquaponie, AMTI et valorisation des coproduits aquacoles ».

Ces journées constituent une voie de communication et de valorisation très importante pour le projet OPTIMAH et sont l'occasion d'échanger avec d'autres structures de recherche de références (INRAE, IFREMER, SYSAAF), des représentants de la filière (FFA, CIPA) et des enseignants et étudiants de l'Institut Agro Rennes/Angers.

Réunions du Réseau des Ecoles de l'Aquaponie – 2024 (en visioconférence)

Tous les mois, l'ITAVI participe à des échanges autour de la formation et de la communication en aquaponie. Ces réunions regroupent des acteurs des secteurs public et privé tournés vers l'innovation en aquaponie et son intégration à des cursus scolaire (de l'école primaire jusqu'au BTS). Le projet OPTIMAH y a été à plusieurs reprises présenté.

Journée Porte Ouverte d'ASTREDHOR Seine-Manche – 25 septembre 2024 à sur la station d'expérimentation de Saint-Germain-en-Laye

Chaque année, ASTREDHOR organise une journée Porte Ouverte à destination des producteurs horticoles, pépiniéristes, paysagistes ou encore agrofournisseurs, afin de présenter les travaux de l'institut en matière de recherche. En 2024, le projet OPTIMAH a été présenté et un poster a été édité à cette occasion. L'aquaponie est un sujet que les professionnels de la production végétale commencent à appréhender et les retours positifs permettent d'amorcer un changement sur leur vision de cette technologie innovante. Quelques producteurs présents se sont dit enclin à tester ce système sur leur entreprise.

Salon de l'aquaponie – 18 et 19 octobre 2024 à Louverné

Ce salon national se tient tous les deux ans et est destiné aux professionnels de l'aquaponie. Lors de ces deux jours, de nombreux travaux de recherche sont présentés. Le projet OPTIMAH a fait l'objet d'une présentation devant plus d'une centaine de participants : aquaponiculteurs, porteurs de projets en aquaponie mais également des producteurs horticoles qui souhaitent diversifier leur production.

Journée technique sur « la gestion de l'eau en production horticole » - 5 novembre au CFA NaturaPôle de Mont-Saint-Aignan

Lors d'une journée technique organisée par le CFA NaturaPôle et deux de ses étudiants, les travaux sur le pilote d'aquaponie ont été présentés à des élèves, des professeurs ainsi qu'à des producteurs horticoles. Cette journée sur la thématique de la gestion de l'eau en production horticole a permis d'évoquer les possibilités d'économies en eau grâce à la synergie des deux productions : animale et végétale.

Reportage France 3 Normandie – Edition du 12 novembre 2024

A l'occasion d'un reportage sur l'aquaponie en Normandie, une équipe de France 3 Normandie s'est rendu au CFA NaturaPôle de Terres-de-Caux pour interviewer Aurélien Tocqueville, directeur scientifique de l'ITAVI. Il a rappelé l'intérêt de cette expérimentation pour documenter à la fois les clés techniques mais aussi économique nécessaires pour envisager l'aquaponie comme système de production. Ce reportage a également présenté la Ferme Aquaponique de l'Abbaye avec l'interview de Guillaume Schlur et la visite de ses serres de production.

Présentation du module d'aquaponie au grand public lors de la journée SNHF – 6 février 2025 à Terres-de-Caux

La Société National d'Horticulture de France (SNHF) a organisé son 17^{ème} colloque scientifique sur la commune de Terres-de-Caux et à laquelle le CFA Naturapôle, l'ITAVI et ASTREDHOR ont participé, sur la thématique « Sensibilité des plantes : mythes et réalités ».

■ 8. Conclusion et perspectives

Les expérimentations et le suivi de l'élevage démontrent que la production aquaponique sous serre est techniquement réalisable. Le matériel utilisé en horticulture, à savoir les tables à marées, est adaptable pour envisager ce système de production. La majorité des végétaux ornementaux supporte cette fertilisation organique et la qualité commerciale n'est globalement pas impactée.

Ces expérimentations confirment le potentiel de l'aquaponie comme alternative durable à la fertilisation minérale traditionnelle. Toutefois, son efficacité varie selon les espèces et les conditions de culture, nécessitant des ajustements techniques. Les résultats obtenus ouvrent des perspectives intéressantes pour la diversification des productions horticoles, notamment en circuit court et en agriculture urbaine. Cependant, la gestion des ravageurs et l'adaptation des substrats restent des défis à relever pour optimiser ces systèmes innovants.

Concernant l'élevage piscicole, la production de poissons ornementaux est possible, notamment la carpe koï compte tenu de sa robustesse face à une chaleur plus importante sous serre. De plus, en raison des espaces plus restreints qu'en pisciculture, il est nécessaire d'avoir des espèces avec une forte valeur ajoutée pour optimiser économiquement le système.

Annexes

Annexe 1 : Analyse physico-chimique du substrat avec tourbe (GTCH2)

ANALYSE DE SUPPORT DE CULTURE														
PARAMÈTRES PHYSIQUES														
Déterminations	Méthodes	Résultats exprimés sur sec	Autres déterminations		Méthodes	Résultats								
Matière sèche %	NF EN 13040	30.0	Capacité de rétention en eau (mll)		Méthode interne	621.59 (Estimée)								
Masse volumique apparente g/l			CEC (Cmol/kg)											
Calcaire total (CaCO ₃) %														
Matière organique %														
Azote total %														
Rapport C/N														
PARAMÈTRES CHIMIQUES														
Déterminations	Méthodes	Résultats		Très faible	Faible	Un peu faible	Satisfaisant	Un peu élevé	Élevé	Très élevé	Valeur souhaitable			
pH eau	- Méthode Interne 1/5 (mV)	5.77												
pH KCl	- Méthode Interne 1/5 (mV)	5.44												
Conductivité mS/cm	Méthode Interne (Ext 1/1.5 VV)	1.29												
Résistivité Ohm.cm	Méthode Interne (Ext 1/1.5 VV)	775												
Anions	Méthodes	mg/l d'extrait	meg/l d'extrait	mg/l d'eau à CRE*	Très faible	Faible	Un peu faible	Satisfaisant	Un peu élevé	Élevé	Très élevé	Valeur souhaitable		
Azote nitrique (N-NO ₃)	Extrait aqueux 1/1,5 vol	65.09	4.62	175.38										
Phosphore (P)	Extrait aqueux 1/1,5 vol	25.41	0.82	68.47										
Sulfates (SO ₄ ²⁻)	Extrait aqueux 1/1,5 vol	166.1	3.5	447.5										
Chlorures (Cl ⁻)	Ext 1/1.5 (VV) / Dos. MF 80 9297	112.5	3.2	303.1										
Cations	Méthodes	mg/l d'extrait	meg/l d'extrait	mg/l d'eau à CRE*	Très faible	Faible	Un peu faible	Satisfaisant	Un peu élevé	Élevé	Très élevé	Valeur souhaitable		
Azote ammoniacal (N-NH ₄ ⁺)	Extrait aqueux 1/1,5 vol	0.32	0.02	0.86										
Potassium (K ⁺)	Extrait aqueux 1/1,5 vol	190.3	4.9	512.7										
Magnésium (Mg ²⁺)	Extrait aqueux 1/1,5 vol	23.8	2.0	64.1										
Calcium (Ca ²⁺)	Extrait aqueux 1/1,5 vol	76.8	3.8	206.9										
Sodium (Na ⁺)	Extrait aqueux 1/1,5 vol	38.43	1.67	103.55										
Oligo-éléments	Méthodes	mg/l d'extrait	EDTA mg/kg MS	Très faible	Faible	Un peu faible	Satisfaisant	Un peu élevé	Élevé	Très élevé	Valeur souhaitable			
Cuivre (Cu ²⁺)														
Zinc (Zn ²⁺)														
Manganèse (Mn ²⁺)														
Bore (B)														
Fer (Fe ²⁺)														
Molybdène (Mo)														
Ratios d'équilibre	Commentaires													
N-NO ₃ / N-NH ₄	203.41	K / Ca	2.48											
N / K	0.34	K / (Ca + Mg)	1.89											
K / Mg	8.00	Ca / Mg	3.23											

* Les teneurs sont exprimées en mg/l d'eau du substrat à la capacité de rétention en eau.

Annexe 2 : Analyse physico-chimique du substrat sans tourbe (GST)

ANALYSE DE SUPPORT DE CULTURE

PARAMÈTRES PHYSIQUES

Déterminations	Méthodes	Résultats exprimés sur sec	Résultats exprimés sur brut	Autres déterminations	Méthodes	Résultats
Matière sèche %	NF EN 13040		34.5	Capacité de rétention en eau (mll)	Méthode interne	635.78 (Estimée)
Masse volumique apparente g/l				CEC (Cmol ^{+/kg})		
Calcaire total (CaCO ₃) %						
Matière organique %						
Azote total %						
Rapport C/N						

PARAMÈTRES CHIMIQUES

Déterminations	Méthodes	Résultats			Très faible	Faible	Un peu faible	Satisfaisant	Un peu élevé	Elevé	Très élevé	Valeur souhaitable
pH eau	- Méthode interne 1/5 (mV)	5.94										
pH KCl	- Méthode interne 1/5 (mV)	5.36										
Conductivité mS/cm	Méthode interne (Ext 1/1.5 Vm)	1.24										
Résistivité Ohm.cm	Méthode interne (Ext 1/1.5 Vm)	806										
Anions	Méthodes	mg/l d'extrait	meg/l d'extrait	mg/l d'eau à CRE*	Très faible	Faible	Un peu faible	Satisfaisant	Un peu élevé	Elevé	Très élevé	Valeur souhaitable
Azote nitrique (N-NO ₃)	Extrait aqueux 1/1,5 vol	40.98	2.91	111.16								
Phosphore (P)	Extrait aqueux 1/1,5 vol	15.08	0.49	40.90								
Sulfates (SO ₄ ²⁻)	Extrait aqueux 1/1,5 vol	174.9	3.6	474.4								
Chlorures (Cl ⁻)	B11f.5 (VW)/Dot.NF EO 9297	134.6	3.8	365.1								
Cations	Méthodes	mg/l d'extrait	meg/l d'extrait	mg/l d'eau à CRE*	Très faible	Faible	Un peu faible	Satisfaisant	Un peu élevé	Elevé	Très élevé	Valeur souhaitable
Azote ammoniacal (N-NH ₄ ⁺)	Extrait aqueux 1/1,5 vol	0.46	0.03	1.25								
Potassium (K ⁺)	Extrait aqueux 1/1,5 vol	251.5	6.4	682.2								
Magnésium (Mg ²⁺)	Extrait aqueux 1/1,5 vol	13.2	1.1	35.8								
Calcium (Ca ²⁺)	Extrait aqueux 1/1,5 vol	30.4	1.5	82.5								
Sodium (Na ⁺)	Extrait aqueux 1/1,5 vol	52.69	2.29	142.92								
Oligo-éléments	Méthodes	mg/l d'extrait	EDTA mg/kg MS		Très faible	Faible	Un peu faible	Satisfaisant	Un peu élevé	Elevé	Très élevé	Valeur souhaitable
Cuivre (Cu ²⁺)												
Zinc (Zn ²⁺)												
Manganèse (Mn ²⁺)												
Bore (B)												
Fer (Fe ²⁺)												
Molybdène (Mo)												

Ratios d'équilibre

N-NO ₃ / N-NH ₄	89.09	K / Ca	8.27
N / K	0.16	K / (Ca + Mg)	5.77
K / Mg	19.05	Ca / Mg	2.30

Commentaires

* Les teneurs sont exprimées en mg/l d'eau du substrat à la capacité de rétention en eau.

Membre des réseaux

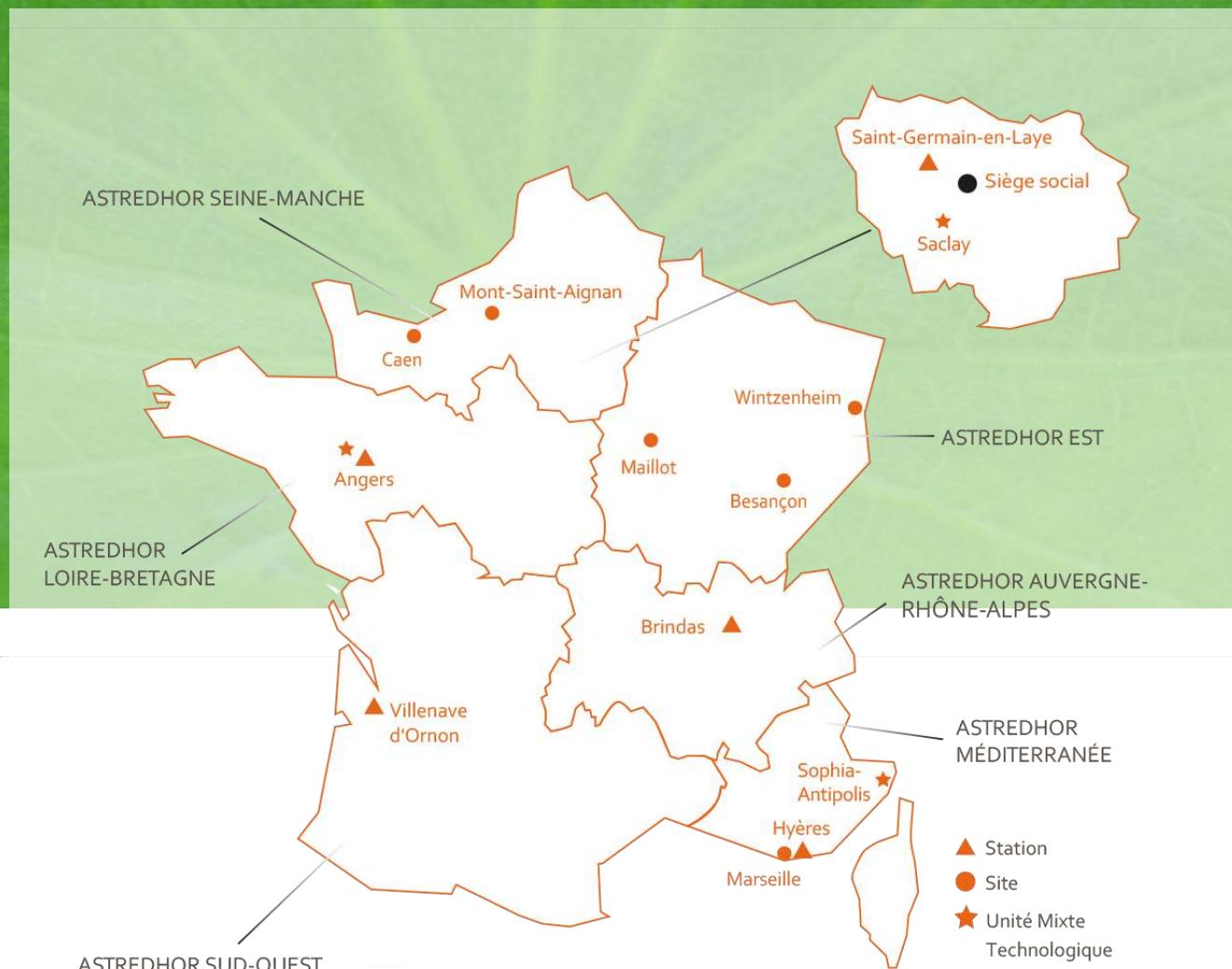


Partenaire technique ACTIA

Financeurs



1 INSTITUT - 6 TERRITOIRES



44 rue d'Alésia - TSA 51446 - 75158 Paris Cedex 14 - www.institut-du-vegetal.fr - info@astredhor.fr